

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

# **Potencjał innowacyjny w inżynierii materiałowej i zarządzaniu produkcją**

**Redakcja naukowa  
Agata Dudek  
Ewa Staniewska**

Częstochowa 2023

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

# Potencjał innowacyjny w inżynierii materiałowej i zarządzaniu produkcją

Monografia

redakcja naukowa  
Agata Dudek  
Ewa Staniewska



Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej

Częstochowa 2023



## **Recenzent**

prof. dr hab. inż. Tomasz Lipiński  
prof. dr hab. inż. Krzysztof Nowacki

## **Redakcja**

Anita Ganoun

## **Redakcja techniczna**

Dorota Boratyńska

## **Projekt okładki**

Dorota Boratyńska

e-ISBN 978-83-7193-945-7

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2023

© Copyright by Agata Dudek i Ewa Staniewska Częstochowa 2023



Publikacja udostępniona na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa –  
Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowa (CC BY-NC 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

---

Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 42-202 Częstochowa, al. Armii Krajowej 36 B

redakcja tel. 34 325 04 80, dystrybucja tel. 34 325 03 93

e-mail: [wydawnictwo@pcz.pl](mailto:wydawnictwo@pcz.pl), [www.wydawnictwo.pcz.pl](http://www.wydawnictwo.pcz.pl)

## Spis treści

Wstęp .....	7
-------------	---

### I. Innowacje w inżynierii materiałowej

#### Rozdział 1

Mikrostruktura i wybrane własności wytrzymałościowe stopu AlSi <sub>7</sub> Mg otrzymanego poprzez wyciskanie współbieżne wypraski z wiórów <i>Wiktoria Skonieczna, Krystian Zyguła</i> .....	11
--	----

#### Rozdział 2

Wpływ parametrów przetwarzania wiórów stalowych na mikrostrukturę i własności wytrzymałościowe po walcowaniu na gorąco <i>Sylwia Tomasiak, Nikodem Sroczyk, Krystian Zyguła</i> .....	21
--	----

#### Rozdział 3

Ocena skuteczności ceramiki tlenkowej w ochronie przed ładunkami kumulacyjnymi <i>Piotr Liguz, Piotr Zgliński, Michał Kwiecień, Wiktor Potaczek, Piotr Zbies</i> .....	31
---	----

#### Rozdział 4

Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę i właściwości mechaniczne stali niestopowej <i>Jakub Jadczyk, Grzegorz Golański</i> .....	39
---	----

#### Rozdział 5

Wpływ temperatury starzenia na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali TP347HFG <i>Michał Andrzejewski, Grzegorz Golański</i> .....	47
---	----

#### Rozdział 6

Badania struktury i właściwości kompozytu ceramicznego na bazie Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <i>Karolina Matyja, Zbigniew Bałaga</i> .....	56
---	----

#### Rozdział 7

Wybrane własności wielowarstwowych układów wytworzonych metodą elektrochemiczną <i>Kinga Pietrucha, Daria Gatner, Bartosz Dziergas, Anna Nowak, Daria Kowalcze, Wojciech Łoński, Monika Spilka, Monika Kciuk</i> .....	64
---	----

#### Rozdział 8

Wpływ powłok HfO <sub>2</sub> i Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> na dynamikę sieci nanodrutów GaN. Analiza statystyczna wyników spektroskopii Ramana <i>Radosław Szymon, Eunika Zielony, Marta Sobańska, Zbigniew R. Żytkiewicz</i> .....	69
--	----

#### Rozdział 9

Remont betonów części podwodnej stopnia wodnego <i>Agnieszka Gałuszka, Wacław Brachaczek</i> .....	81
---	----

**Rozdział 10**

Remont przelewów powierzchniowych zapory wodnej <i>Jakub Francuz, Waclaw Brachaczek</i> .....	90
--	----

**Rozdział 11**

Wielowarstwowe wkłady ceramiczne w konstrukcji pancerzy kompozytowych <i>Piotr Zbies, Piotr Liguz, Piotr Zgliński</i> .....	97
--	----

**Rozdział 12**

Optymalizacja własności oraz analiza technologii wykonania funkcjonalnego ostrza z materiałów łączonych wybuchowo <i>Jakub Długosz, Paulina Kąta, Bartłomiej Pabich, Łukasz Lisiecki</i> .....	106
---	-----

**Rozdział 13**

Wpływ dodatków materiałów niskoemisyjnych na właściwości zapraw cementowych <i>Waclaw Brachaczek, Adam Chleboś, Magdalena Kupczak, Sebastian Spisak, Michał Stybak, Katarzyna Żyrek</i> .....	116
--	-----

**Rozdział 14**

Charakterystyka ceramiczno-węglowych tarcz hamulcowych <i>Justyna Owczarek, Anna Zawada</i> .....	127
--	-----

**Rozdział 15**

Opracowanie technologii wytwarzania wielowarstwowego pancerza kompozytowego na bazie materiałów wysokoentropowych i ceramicznych <i>Hubert Sokół-Twarowski, Gabriel Płodowski, Szymon Rakoczy, Bartłomiej Pabich, Kamil Cichocki, Łukasz Lisiecki</i> .....	135
--	-----

**Rozdział 16**

Charakterystyka odporności korozyjnej materiałów stosowanych na układy wydechowe <i>Justyna Owczarek, Grzegorz Golański, Karina Jagielska-Wiaderek</i> .....	144
---	-----

**Rozdział 17**

Synteza i badanie tlenków wysokoentropowych (HEO) jako materiałów o dużym potencjale w technice termoelektrycznej <i>Michał Kozanecki</i> .....	151
--	-----

**Rozdział 18**

Cyfrowa oraz numeryczna analiza zużycia narzędzi w procesie kucia matrycowego <i>Piotr Bathelt, Aneta Łukaszek-Solek, Grzegorz Ficak, Łukasz Lisiecki</i> .....	161
--	-----

**Rozdział 19**

Popioły lotne ze spalania biomasy jako napełniacz w kompozytach poliamidowych <i>Szymon Dróżdż, Renata Caban</i> .....	171
---	-----

**Rozdział 20**

Właściwości sorpcyjne węgla względem wybranych składników gazu koksowniczego <i>Maria Rydzyk, Wojciech Szulik, Katarzyna Czerw, Katarzyna Zarębska</i> .....	180
---	-----

**Rozdział 21**

Wpływ degradacji abiotycznej na wybrane właściwości fizykomechaniczne i morfologię biodegradowalnych materiałów polimerowych <i>Joanna Tomasiak, Miłosz Wrotniak, Aleksandra Pszczoła, Damian Szopiński</i> .....	190
--	-----

## II. Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji

### Rozdział 22

Wpływ wybranych czynników na polepszenie wskaźnika OEE  
na wybranym odcinku procesu produkcyjnego

*Artur Leśniewski, Jakub Plaszczyk, Piotr Karchut, Anna Kiljan, Ewa Jonda* ..... 203

### Rozdział 23

Produktywność procesu produkcyjnego w wybranym przedsiębiorstwie

*Olga Sikora, Marzena Ogórek* ..... 213

### Rozdział 24

Innowacyjna makieta logistyczna – magazyn z Lego

*Anna Kapińska, Wiktoria Wojda, Bartosz Dawid Kramek* ..... 222

### Rozdział 25

Identyfikacja systemu logistycznego w firmie kurierskiej

*Dominika Strycharska, Rafał Wyczółkowski, Przemysław Dylikowski* ..... 231

### Rozdział 26

Ocena obciążenia statycznego na stanowisku spawacza

*Magdalena Blacha, Mateusz Gancarz, Bartłomiej Figarski, Anna Pecyna,  
Agnieszka Buczaj* ..... 241

### Rozdział 27

Ocena obciążenia fizycznego na stanowisku górnika

*Bartłomiej Figarski, Magdalena Blacha, Mateusz Gancarz, Anna Pecyna,  
Agnieszka Buczaj* ..... 249

### Rozdział 28

Obowiązek wykorzystania osiągnięć nauki i techniki do zapewnienia bezpiecznych  
i higienicznych warunków pracy

*Joanna Fik, Piotr Fik* ..... 258

### Rozdział 29

Activation of People with Disabilities with the Use of Modern IT Tools

*Aleksander Szarek* ..... 269

### Rozdział 30

Liderem się jest, a nie bywa, czyli jakie oczekiwania wobec liderów mają  
osoby pracujące

*Ada Żurawik, Miłosz Parczewski* ..... 275

### Rozdział 31

Pojęcie „zmiany organizacyjnej” a turbulentne otoczenie przedsiębiorstwa

*Marek Walczyński* ..... 286

### Rozdział 32

Wybrane metody zarządzania projektem technologicznym

*Marta Caban, Dorota Musiał* ..... 298

### Rozdział 33

Wpływ działań marketingowych na decyzje zakupowe klientów

*Julia Zub* ..... 307

**Rozdział 34**

Ramię diagnostyczne inspekcyjnego robota mobilnego w technologii druku 3D  
*Patrycja Krason, Kinga Dygudaj, Tomasz Kowalik, Jakub Gutze, Nadia Koperska, Tomasz Garstka, Marcin Kwapisz* ..... 313

**Rozdział 35**

Metody zapewnienia bezpieczeństwa informatycznego aplikacji webowych  
*Kacper Foks, Sabina Szymoniak* ..... 321

**Rozdział 36**

Wykorzystanie systemów wspomagania inżynierskiego w projektowaniu oraz analizie wytrzymałościowej felgi aluminiowej  
*Kamil Gryboś, Łukasz Lisiecki* ..... 331

**Rozdział 37**

Podłogi kinetyczne jako przyszłość odnawialnych źródeł energii  
*Aleksandra Marciniak* ..... 341

**Rozdział 38**

Koncepcja optymalizacji materiałowej i analizy metody wytwarzania biodegradowalnego kubka  
*Paulina Gohuch, Konrad Białek, Patryk Gańczorz, Maciej Stec, Anna Kiljan, Ewa Jonda, Piotr Sakiewicz* ..... 348

**Rozdział 39**

Analiza czynników determinujących właściwe gospodarowanie odpadami komunalnymi na przykładzie wybranych gmin w Polsce  
*Kinga Dygudaj, Patrycja Krason* ..... 355

**Rozdział 40**

Analiza właściwości fizykochemicznych materiału z biomasy w formie pelletu z łupiny orzecha włoskiego  
*Michał Nabiałczyk, Dorota Musiał, Agnieszka Bala-Litwiniak* ..... 367

**Rozdział 41**

Zachowania proekologiczne konsumentów względem opakowań w kształtowaniu jakości produktów z sektora FMCG  
*Alicja Kulik, Maciej Jaworek, Ewa Biazik* ..... 375

**Rozdział 42**

Instalacja akwaponiczna w obiegu zamkniętym  
*Natalia Soltysiak, Szymon Kupczyk, Daniel Śmigielski, Jakub Walentek, Małgorzata Worwąg* ..... 383

## Wstęp

Obecne uwarunkowania technologiczne oraz ekonomiczne wymuszają konieczność poszukiwania innowacyjnych rozwiązań, które można zastosować w praktyce gospodarczej, badaniach naukowych oraz życiu społecznym. Rozwój metod badawczych, dostępność nowoczesnych narzędzi i technologii informacyjnych, globalizacja czy konkurencja to tylko niektóre z czynników determinujących ciągły rozwój w każdej dziedzinie.

W monografii przedstawiono różnorodne zagadnienia z dyscypliny inżynierii materiałowej oraz zarządzania produkcją i usługami, które zostały omówione na 44. Studenckiej Konferencji Naukowej. Materiał badawczy opiera się na pracach studentów, członków kół naukowych oraz doktorantów z polskich uczelni. Teksty zawarte w monografii skupiają się na istotnych i aktualnych zagadnieniach oraz problemach, ze szczególnym uwzględnieniem idei zrównoważonego rozwoju.

Monografia składa się z dwóch części. Pierwsza część koncentruje się na innowacjach w inżynierii materiałowej i zawiera rozdziały dotyczące różnych tematów, takich jak analiza mikrostruktury, właściwości użytkowych czy zużycia materiałów inżynierskich.

Inżynieria materiałowa odgrywa kluczową rolę w dzisiejszym czasie, stanowiąc fundament wielu dziedzin nauki, technologii i przemysłu. Jej znaczenie wynika z potrzeby rozwijania i zastosowania nowych materiałów o pożądanych właściwościach, które mogą przyczynić się do postępu technologicznego, zrównoważonego rozwoju i poprawy jakości życia. Jednym z głównych obszarów, w których inżynieria materiałowa ma ogromne znaczenie, jest przemysł. Rozwój nowych materiałów o lepszych właściwościach mechanicznych, termicznych, elektrycznych czy chemicznych pozwala na projektowanie i produkcję bardziej wydajnych i zaawansowanych technologicznie produktów. Przykłady to zaawansowane materiały konstrukcyjne wykorzystywane w lotnictwie, samochodach, energetyce czy budownictwie, które umożliwiają zwiększenie wytrzymałości, redukcję masy i osiągnięcie większej efektywności energetycznej. Wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na odnawialne źródła energii i bardziej efektywne systemy przechowywania energii konieczne staje się opracowanie nowych materiałów, które umożliwią rozwój technologii związanych z energią słoneczną, wiatrową, wodorową czy bateriami o wyższej pojemności. Zaawansowane materiały magnetyczne, półprzewodniki czy materiały termoelektryczne są kluczowe dla rozwoju nowych generacji urządzeń energetycznych. Ponadto inżynieria materiałowa wpływa na rozwój technologii komunikacyjnych, elektroniki, robotyki,

a także na ochronę środowiska. Opracowanie materiałów o niskiej emisji zanieczyszczeń, recyklingu czy poprawie efektywności energetycznej to kluczowe wyzwania, którym inżynierowie materiałowi muszą sprostać.

Druga część monografii uwzględnia zagadnienia dotyczące zarządzania i inżynierii produkcji, których podstawowym obszarem rozważań jest zapewnienie wysokiego poziomu efektywności podejmowanych działań. Należy podkreślić, że powinny one dotyczyć wszystkich obszarów prowadzonej działalności, zarówno bezpośrednio produkcyjnej, jak i pomocniczej. Niezwykle istotnym i nieodłącznym elementem każdej działalności produkcyjnej jest czynnik ludzki, a w szczególności zastosowanie osiągnięć nauki i techniki w celu zapewnienia bezpiecznych i higienicznych warunków pracy oraz szeroko pojętej dostępności. Istotne kwestie poruszone w monografii dotyczą także kadry zarządzającej i jej roli w kształtowaniu środowiska pracy, podejmowaniu decyzji dotyczących zmian organizacyjnych, wdrażania nowych technologii czy szeroko pojętej skuteczności i efektywności działań. Wiele innowacyjnych rozwiązań wiąże się z zastosowaniem nowoczesnych technologii, w których szczególną rolę odgrywa informatyzacja oraz automatyzacja, dlatego w monografii uwzględniono także zagadnienia związane z systemami wspomaganiami inżynierskiego oraz bezpieczeństwem informatycznym.

Znaczna część monografii obejmuje niezwykle istotne zagadnienia dotyczące innowacyjnych rozwiązań ekologicznych. Dotyczą one różnych obszarów działalności, a także życia społecznego i obejmują zagadnienia z zakresu optymalizacji materiałowej, odnawialnych źródeł energii oraz efektywnego gospodarowania odpadami.

I.

Innowacje w inżynierii  
materiałowej





## Rozdział 1

# Mikrostruktura i wybrane własności wytrzymałościowe stopu AlSi<sub>7</sub>Mg otrzymanego poprzez wyciskanie współbieżne wypraski z wiórów

Wiktoria Skonieczna, Krystian Zyguła

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

**Streszczenie:** W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę przetwarzania poprzez przeróbkę plastyczną na gorąco wiórów ze stopu AlSi<sub>7</sub>Mg powstałych w wyniku obróbki ubytkowej. W tym celu zaprojektowano ścieżkę technologiczną, która obejmowała przygotowanie wiórów, zagęszczanie na gorąco, wyciskanie współbieżne na gorąco oraz obróbkę cieplną. Wióry zagęszczono w matrycach zamkniętych, w temperaturze 450°C na prasie hydraulicznej, stosując nacisk 150 MPa przez czas 5 minut. Gęstość względna materiału po tym etapie wynosiła 99,7%. Uzyskane w ten sposób wypraski nagrzano do temperatury 450°C i poddano procesowi wyciskania współbieżnego z prędkością 0,15 mm/s. Następnie dla jednej z próbek po wyciskaniu przeprowadzono obróbkę cieplną T6 złożoną z przesycania oraz starzenia. Przygotowano zgłady metalograficzne i za pomocą mikroskopii świetlnej dokonano obserwacji mikrostruktury. W celu określenia własności mechanicznych wytworzonego materiału wykonano statyczną próbę ściskania oraz pomiary twardości. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że zaproponowana ścieżka prowadzi do uzyskania materiału konkurencyjnego dla stopu AlSi<sub>7</sub>Mg wytworzonego poprzez odlewanie.

**Słowa kluczowe:** recykling aluminium, stopy aluminium, wióry metalowe, wyciskanie współbieżne

## Wprowadzenie

Pierwotne aluminium otrzymuje się w procesie złożonym z dwóch podstawowych etapów, w których prowadzona jest ekstrakcja tlenku aluminium z rudy boksytowej (proces Bayera), a następnie elektroliza uzyskanego Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (proces Halla-Heroult). W procesie elektrolizy wykorzystuje się prąd o bardzo wysokim natężeniu do pozyskania metalicznego aluminium. Przyczynia się to do dużego poboru energii, co generuje znaczące koszty oraz nadmierną emisję gazów

cieplarnianych do atmosfery (Kossakowski 2013, s. 36-41; Wagiman i in. 2020, s. 641-653). Źródła literaturowe (Haase i in. 2013, s. 191-207) podają, że do wyprodukowania tony pierwotnego aluminium wymagane jest zużycie ok. 168 GJ energii elektrycznej, co stanowi około ośmiokrotność zużycia energii niezbędnej do wytworzenia tony stali. Fakt ten przyczynia się do zwiększenia znaczenia recyklingu aluminium i jego produkcji wtórnej, która umożliwia redukcje zapotrzebowania energetycznego nawet o 94%. Trendy w światowej produkcji tego metalu wskazują, że znaczenie aluminium wtórnego na przestrzeni lat systematycznie wzrasta. Szacuje się, że do 2030 roku będzie stanowiło ono już niespełną połowę globalnie wytwarzanego i dostępnego na rynku aluminium.

Produkcja wtórna aluminium jest formą recyklingu, która wykorzystuje szeroko pojęty złom jako materiał wsadowy w procesie. Zazwyczaj obejmuje ona przetapianie złomu, późniejszą rafinację i odlewanie metalu do specjalnych form. Metoda ta, mimo wcześniej wspomnianych zalet oraz zdolności aluminium do ponownego przetwarzania bez utraty swoich właściwości, nie jest wolna od wad. Głównym problemem produkcji wtórnej są wysokie straty materiałowe. Na etapie przetapiania materiału występują m.in. takie zjawiska jak utlenianie czy rozpryski materiału, które przekładają się na straty rzędu ok. 4%. Natomiast w procesie odlewania straty te rosną aż do 8%, co spowodowane jest występowaniem m.in. jamy skurczowej (Wagiman i in. 2020, s. 641-653).

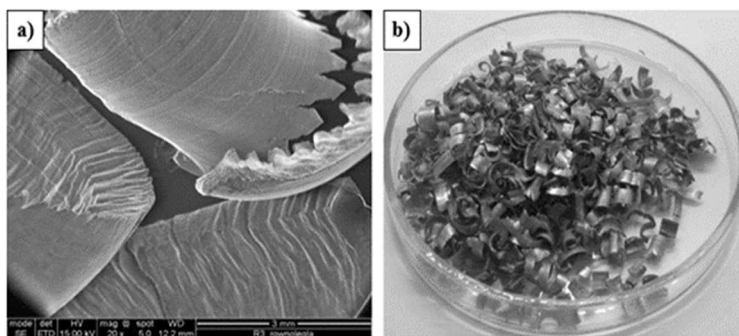
Wióry metalowe powstające w procesach obróbki ubytkowej są materiałem odpadowym, który określa się mianem złomu przemysłowego. Recykling wiórów aluminium stosowany w praktyce polega na ich wcześniejszym zbrykietowaniu, przetopieniu w piecach indukcyjnych, a następnie odlaniu ciekłego metalu (Korbel i in. 2016, s. 133-152; Wagiman i in. 2020, s. 641-653). Metoda ta jest efektywna, jednak przejawia wady produkcji wtórnej, dlatego też w ostatnich czasach zostało spopularyzowane podejście opierające się na bezpośrednim recyklingu wiórów. Ideą tej metody jest przetworzenie wiórów do postaci wyrobu o cechach materiału litego z pominięciem fazy ciekłej. W tym celu stosuje się różnego rodzaju procesy przeróbki plastycznej poprzedzone wstępnym zagęszczeniem materiału. Duża część technik recyklingu bezpośredniego wiórów bazuje na zastosowaniu metod SPD (ang. *Severe Plastic Deformation*), takich jak: przeciskanie przez kanał kątowy, cykliczne wyciskanie skręcające czy skręcanie pod wysokim ciśnieniem (Bingbing i in. 2017, s. 37-47). Pozwalają one na uzyskanie materiału o znikomej porowatości i zadowalających właściwościach wytrzymałościowych. W dużej liczbie badań stosuje się podejście wykorzystujące proces wyciskania na gorąco (Ab Rahim i in. 2015, s. 761-766), który nie wymaga zastosowania bardzo skomplikowanych narzędzi. Recykling wiórów tą metodą w połączeniu z odpowiednią obróbką umożliwia wytworzenie materiału o bardzo dobrych właściwościach, konkurencyjnych dla tożsamyh materiałów uzyskanych metodami odlewniczymi. Metodę tę podjęto w niniejszej pracy, gdzie przeprowadzono próbę przetwarzania wiórów ze stopu  $AlSi_7Mg$ , w oparciu o proces

zagęszczania na gorąco oraz wyciskania współbieżnego na gorąco i późniejszą obróbkę cieplną materiału.

## Metodyka badawcza

### Materiał do badań

Materiałem wykorzystanym w badaniach były wióry stopu  $AlSi_7Mg$  (A365) pochodzące z procesu toczenia. Morfologia ich zaliczała się do grupy wiórów łukowych typu luźnego oraz związanego, według klasyfikacji zgodnej z normą PN-ISO 3685. Wióry te cechowała rozbudowana powierzchnia (rys. 1.1a) oraz relatywnie niewielki rozmiar (rys. 1.1b), co sprzyjało ich podatności na zagęszczanie.



**Rysunek 1.1.** Wióry  $AlSi_7Mg$  wykorzystane w badaniach: a) zdjęcie SEM powierzchni wiórów; b) zdjęcie poglądowe materiału

Źródło: Opracowanie własne

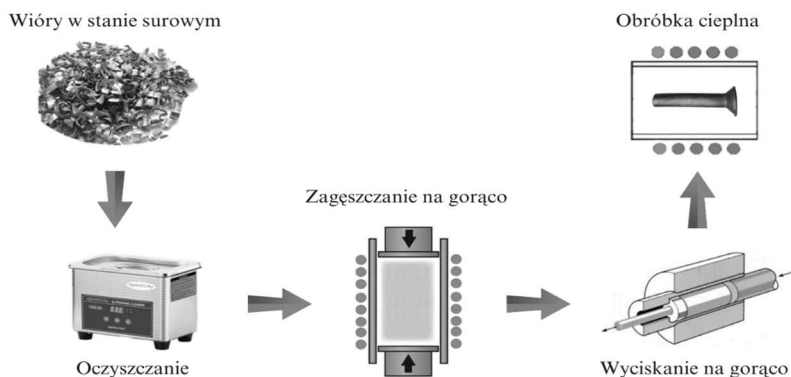
## Ścieżka technologiczna

Materiał badawczy wytworzono, stosując specjalnie opracowaną ścieżkę technologiczną, którą przedstawiono schematycznie na rys. 1.2.

Wióry w stanie surowym posiadały liczne zanieczyszczenia, takie jak pozostałości chłodziwa z procesu obróbki ubytkowej, tlenki powstałe w wyniku pasywacji materiału czy też inne zabrudzenia. W celu usunięcia chłodziwa z powierzchni wiórów wykorzystano myjkę ultradźwiękową Sonix PS-20A oraz roztwór izopropanolu i detergentu dedykowanego do tego typu urządzeń. Wióry myto przez 10 minut, a następnie suszono.

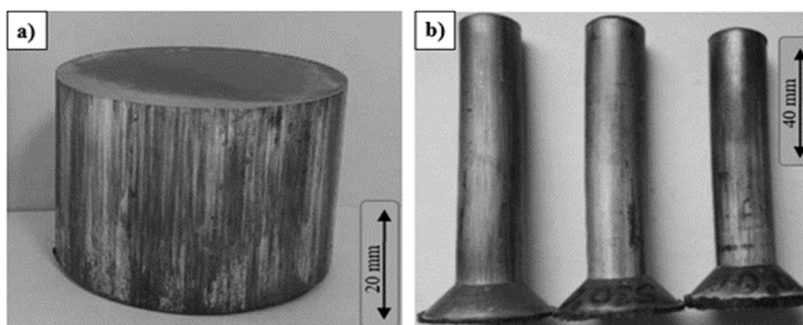
W kolejnym etapie wióry  $AlSi_7Mg$  zostały poddane procesowi zagęszczenia na gorąco w matrycach zamkniętych z zastosowaniem parsy hydraulicznej ZD-100. Zagęszczanie prowadzono w temperaturze  $450^{\circ}C$ , zadając nacisk  $150\text{ MPa}$  przez czas 5 minut. Uzyskane w ten sposób cylindryczne wypraski

(rys. 1.3a) zważono celem wyznaczenia gęstości względnej materiału, która wyniosła 99,7%.



**Rysunek 1.2.** Schemat ścieżki technologicznej recyklingu wiórów AlSi<sub>7</sub>Mg zastosowanej w badaniach

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 1.3.** Wytworzony materiał: a) wypraska; b) po procesie wyciskania

Źródło: Opracowanie własne

Materiał po procesie zagęszczenia przetworzono plastycznie, stosując proces wyciskania współbieżnego na gorąco. W tym celu wypraski nagrzano do temperatury 450°C i wygrzewano przez 15 minut, a następnie umieszczono w matrycy i wyciskano z prędkością 0,15 mm/s. Materiał po procesie wyciskania przedstawiono na rys. 1.3b.

Dodatkowo dla jednej z próbek po procesie wyciskania przeprowadzono obróbkę cieplną T6 charakterystyczną dla stopów aluminium. Polegała ona na przesycaaniu materiału w temperaturze 540°C przez okres 2 h i chłodzeniu w wodzie oraz procesie starzenia w temperaturze 175°C przez czas 6 h i powolnym chłodzeniu na powietrzu (Carneiro i in. 2018, s. 1-8; Carneiro, Puga 2019, s. 880-887; Manickam, Velukkudi Santhanam 2019, s. 281-285; Sigworth, Donahue 2021, s. 1031-1046).

## Preparatyka metalograficzna

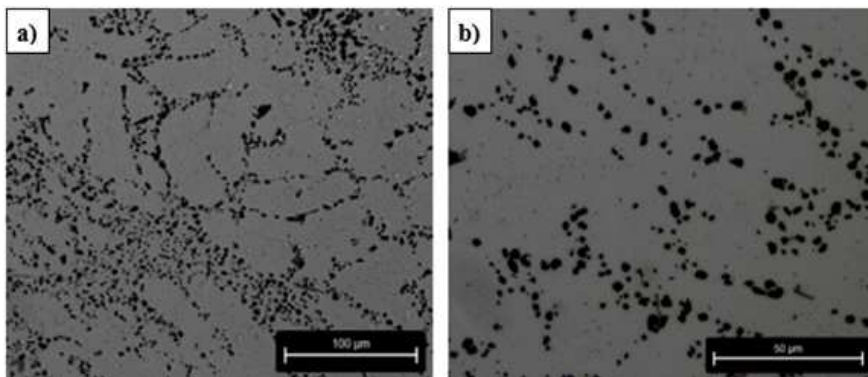
W celu kompleksowej analizy zmian mikrostruktury materiału po każdym z trzech etapów przetwarzania zostały przygotowane zglądy metalograficzne. Ich preparatyka polegała na wycięciu fragmentu materiału i zainkludowaniu go w żywicy epoksydowej. Zglądy szlifowano na papierach ściernych o gradacji od 320 do 2400 w skali FEPA. Do polerowania próbek użyto zawiesiny tlenku krzemu oraz dedykowanych sukien polerskich. Trawienia powierzchni próbek dokonano za pomocą odczynnika Kellera o składzie 0,5% HF, 1,5% HCl, 2,5% HNO<sub>3</sub>, 95,5% H<sub>2</sub>O, stosowanego dla stopów aluminium.

## Wyniki i dyskusja

### Analiza mikrostruktury

Obserwacje mikrostruktury prowadzono dla próbek uzyskanych po etapie zgęszczenia, wyciskania oraz po obróbce cieplnej. Do wykonania mikrofotografii wykorzystano mikroskop świetlny Leica DM4000M. Mikrostrukturę badanych materiałów przedstawiono na *rys. 1.4-1.6*.

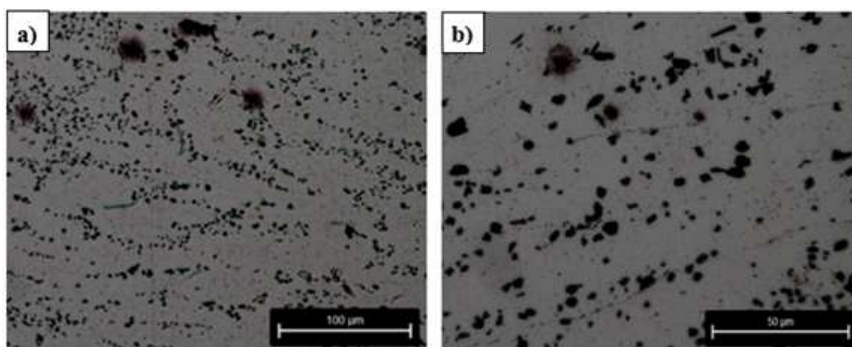
Mikrostruktura wypraski (*rys. 1.4*) złożona jest z równoosiowych wydzielań eutektycznych Si rozlokowanych quasi-ciągłe po granicach ziaren fazy  $\alpha$ . Rozkład wydzielań eutektycznych w mikrostrukturze jest niejednorodny. Istnieją obszary o zwiększonej akumulacji cząstek eutektycznych Si oraz obszary o mniejszym ich nagromadzeniu. Wielkość obserwowanych wydzielań jest niewielka, ich rozmiar jest dość zróżnicowany i zawiera się w przedziale 3-15  $\mu\text{m}$ . Przedstawiony stan był wyjściowym dla materiałów poddanych przetwarzaniu w dalszych etapach badań.



**Rysunek 1.4.** Mikrostruktura wypraski po zagęszczaniu na gorąco:  
a) powiększenie 20 $\times$ ; b) powiększenie 50 $\times$

Źródło: Opracowanie własne

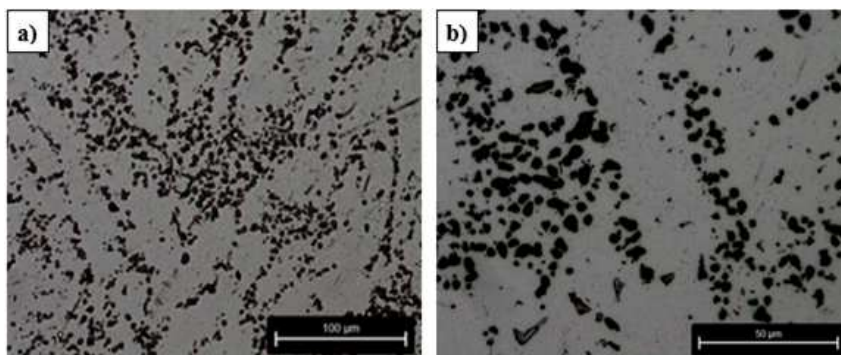
Zastosowanie wyciskania współbieżnego na gorąco przyczyniło się do ukierunkowania mikrostruktury materiału (rys. 1.5). Początkowe ziarna fazy  $\alpha$  o relatywnie równoosiowym kształcie na skutek zastosowanego odkształcenia uległy wydłużeniu zgodnie z kierunkiem płynięcia materiału w trakcie wyciskania. Ciągłość wydzieli eutektycznych na granicach ziaren osnowy została zaburzona w wyniku odkształcenia, jednak ich rozmiar oraz charakterystyka kształtu nie uległy zauważalnej zmianie.



**Rysunek 1.5.** Mikrostruktura materiału po wyciskaniu współbieżnym na gorąco: a) powiększenie 20×; b) powiększenie 50×

Źródło: Opracowanie własne

Przeprowadzona obróbka cieplna T6 przyczyniła się do ujednorodnienia mikrostruktury materiału. Zauważalny jest wzrost wielkości wydzieli eutektycznych rozłożonych w osnowie. W mikrostrukturze po obróbce cieplnej przeważają wydzielania eutektyki o średnim rozmiarze 8-10 μm. Gdzie dla poprzednich materiałów rozmiar ten opowiadał większym cząstkom, które występowały mniej licznie w mikrostrukturze (rys. 1.6).



**Rysunek 1.6.** Mikrostruktura materiału po wyciskaniu połączonym z późniejszą obróbką cieplną: a) powiększenie 20×; b) powiększenie 50×

Źródło: Opracowanie własne

## Badania twardości

Twardość próbek została zmierzona dla materiałów w stanie po zgęszczaniu, wyciskaniu na gorąco oraz obróbce cieplnej, a zbiorcze wyniki przedstawiono w *tab. 1.1*. Pomiarów twardości dokonano za pomocą twardościomierza Duramin-40 firmy Struers, stosując metodę Vickersa i obciążenie 0,5 kg.

**Tabela 1.1. Twardość materiałów uzyskanych na poszczególnych etapach badań**

Stan materiału	Pomiar 1 [HV <sub>0,5</sub> ]	Pomiar 2 [HV <sub>0,5</sub> ]	Pomiar 3 [HV <sub>0,5</sub> ]	Pomiar 4 [HV <sub>0,5</sub> ]	Średnia [HV <sub>0,5</sub> ]
Zagęszczony	46,24	47,21	45,95	46,38	46,45 ± 0,54
Przerobiony plastycznie	52,95	57,46	45,95	51,06	51,86 ± 4,77
Przerobiony plastycznie i obroniony cieplnie	85,63	77,22	82,46	83,85	82,29 ± 3,62

Źródło: Opracowanie własne

Pomiary ujawniły wzrost twardości materiału po każdym z etapów przetwarzania. Zastosowanie procesu wyciskania współbieżnego dla zagęszczonego materiału przyczyniło się do relatywnie niewielkiej zmiany twardości, która wzrosła z  $46,45 \pm 0,54$  HV<sub>0,5</sub> do  $51,86 \pm 4,77$  HV<sub>0,5</sub>. Najlepsze wyniki zanotowano dla materiału przetworzonego plastycznie oraz poddanego obróbce cieplnej T6. Twardość próbek w tym stanie wyniosła  $82,29 \pm 3,62$  HV<sub>0,5</sub>, co odpowiadało niemalże dwukrotnemu wzrostowi twardości w porównaniu z materiałem po procesie zgęszczania na gorąco.

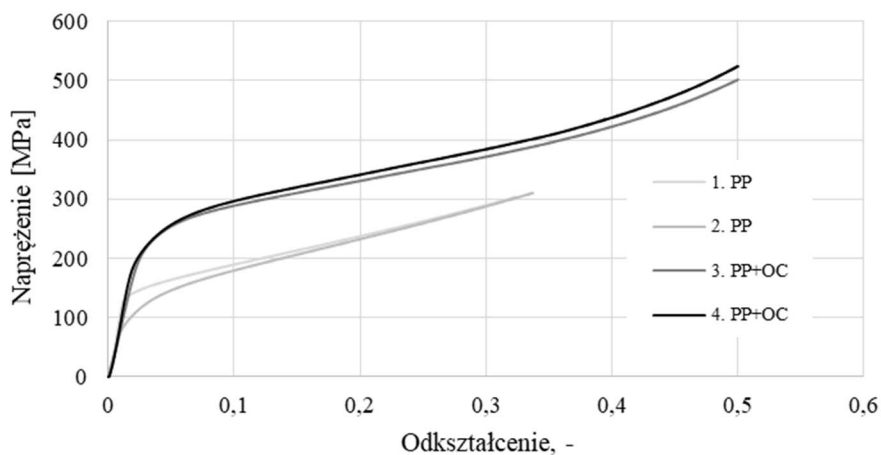
## Statyczna próba ściskania

Wytworzone materiały poddano statycznej próbie ściskania, aby określić ich własności mechaniczne. W testach wykorzystano próbki cylindryczne o średnicy 10 mm i wysokości 12 mm, które przygotowano z materiałów po przeróbce plastycznej (PP) oraz po przeróbce plastycznej połączonej z obróbką cieplną T6 (PP+OC). Krzywe ściskania przedstawione na *rys. 1.7* opracowano na podstawie danych zebranych w trakcie badań wytrzymałościowych. Testy ściskania prowadzono z prędkością 2 mm/min w temperaturze pokojowej, wykorzystując w tym celu maszynę wytrzymałościową Instron 5982.

Analiza krzywych ściskania pozwala na stwierdzenie, że przeprowadzona obróbka cieplna materiału poprawiła własności mechaniczne oraz plastyczne badanego materiału. Próbki przerobione plastycznie (nr 1 i nr 2) wykazały skrócenie względne ( $A_c$ ) na poziomie 32,22% i 33,72%, a ich wytrzymałość na ściskanie ( $R_c$ ) wyniosła odpowiednio 303,58 MPa i 310,52 MPa. Poddanie materiału obróbce cieplnej złożonej z przesykania oraz starzenia w zauważalny sposób wpłynęło na umocnienie materiału. Jego wytrzymałość na ściskanie ( $R_c$ ) dla próbek nr 3 i nr 4 zanotowała duży wzrost, osiągając wartości 501,69 MPa oraz 526,17 MPa. Analogicznej wielkości przyrost nastąpił dla własności



plastycznych, gdzie po obróbce cieplnej skrócenie względne ( $A_c$ ) obu próbek wzrosło do 50%.



**Rysunek 1.7.** Krzywe ściskania materiału wytworzonego z wiórów stopu AlSi<sub>7</sub>Mg będącego podmiotem prowadzonych badań

Źródło: Opracowanie własne

Dla porównania materiał uzyskany metodą odlewniczą po przeprowadzeniu różnych wariantów obróbki cieplnej wykazuje wytrzymałość na ściskanie w zakresie 94-233 MPa (Manickam, Velukkudi Santhanam 2019, s. 281-285). Badany materiał w obu rozważanych przypadkach osiągnął wyższe wartości wytrzymałości na ściskanie.

## Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych obserwacji mikrostruktury oraz wybranych własności wytrzymałościowych materiału wytworzonego poprzez wyciskanie współbieżne wiórów stopu aluminium AlSi<sub>7</sub>Mg (A365) pozwalają na opracowanie następujących wniosków:

1. Zagęszczanie na gorąco wiórów stopu aluminium A365 w połączeniu z przeróbką plastyczną pozwala na uzyskanie materiału o wysokiej gęstości względnej. Zastosowane parametry procesowe były optymalne dla otrzymania materiału o dobrej jakości.
2. Obserwacje mikrostruktury wykazały pozytywny wpływ obróbki cieplnej na homogenizację materiału. Wydzielenia eutektyczne w materiale obrobionym cieplnie są bardziej jednorodne niż w przypadku materiału tylko przerobionego plastycznie.
3. Zastosowanie dodatkowej obróbki cieplnej poprawia w znaczący sposób własności mechaniczne materiału uzyskanego w procesie przetwarzania

wiórów stopu AlSi<sub>7</sub>Mg. Potwierdzają to przeprowadzone badania twardości oraz próba ściskania, w których to materiał po obróbce cieplnej wykazywał najwyższe wartości badanych własności.

4. Opracowana ścieżka technologiczna przetwarzania wiórów stopu AlSi<sub>7</sub>Mg wraz z zastosowanymi parametrami pozwoliła na wytworzenie pełnoprawnego materiału, zdolnego do ponownego zastosowania. Technologia ta niesie ze sobą wiele pozytywnych aspektów. Pozwala ona na ograniczenie kosztów produkcji wtórnej badanego stopu oraz zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko, dzięki pominięciu procesu przetapiania wiórów w łańcuchu przetwórczym.

### Podziękowania

*Przedstawione badania zostały zrealizowane i sfinansowane w ramach Grantu Rektora AGH nr 74/GRANT/2022.*

### Literatura

1. Ab Rahim S.N., Lajis M.A., Ariffin S. (2015), *A Review on Recycling Aluminum Chips by Hot Extrusion Process*, „Procedia CIRP”, 26, s. 761-766.
2. Bingbing W., Weiping Ch., Fangfang L. (2017), *Review of Solid State Recycling of Aluminum Chips*, „Resources, Conservation and Recycling”, 125, s. 37-47.
3. Carneiro V.H., Puga H. (2019), *T6 Heat Treatment Impact on the Random Frequency Vibration Stress of Al-Si-Mg Alloys*, „Metals and Materials International”, 25, s. 880-887.
4. Carneiro V.H., Puga H., Meireles J. (2018), *Heat Treatment as a Route to Tailor the Yield-Damping Properties in A356 Alloys*, „Materials Science and Engineering: A”, 729, s. 1-8.
5. Haase M., Jäger A., Tekkaya A.E. (2013), *Recycling of Aluminum Chips by Hot Extrusion*, [w:] Denkena B. (red.), *New Production Technologies in Aerospace Industry. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Machining Innovations Conference*, s. 197-201, Hannover.
6. Korbel A., Bochniak W., Śliwa R. (2016), *Low-Temperature Consolidation of Machining Chips from Hardly Deformable Aluminum Alloys*, „Metal Forming”, 27, 2, s. 133-152.
7. Kossakowski P. (2013), *Aluminium – materiał ekologiczny*, „Przegląd Budowlany”, 10, s. 36-41.
8. Manickam D., Velukkudi Santhanam S.K. (2019), *Effect of Solution Heat Treatment and Artificial Aging on Compression Behaviour of A356 Alloy*, „Materials Science”, 25, 3, s. 281-285.
9. Sigworth G.K., Donahue R.J. (2021), *The Metallurgy of Aluminum Alloys for Structural High-Pressure Die Castings*, „International Journal of Metalcasting”, 15, s. 1031-1046.
10. Wagiman A., Mustapa S.M., Asmawi R. (2020), *A Review on Direct Hot Extrusion Technique in Recycling of Aluminium Chips*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 106, s. 641-653.

## Microstructure and Selected Properties of AlSi<sub>7</sub>Mg Alloy Obtained by Direct Extrusion of Compacted Chips

**Abstract:** This chapter presents an analysis of the processing by hot forming of AlSi<sub>7</sub>Mg alloy chips resulting from machining. For this purpose, a process path was designed, which included chips preparation, hot compaction, hot direct extrusion

and heat treatment. The chips were compacted in closed dies, at temperature of 450°C on a hydraulic press, applying a pressure of 150 MPa for 5 minutes. The relative density of the material after this step was 99.7%. The resulting compacts were heated to 450°C and subjected to direct extrusion at a speed of 0.15 mm/s. Then, for one of the specimens after extrusion, a T6 heat treatment consisting of solution treatment and aging was conducted. Metallographic samples were prepared and the microstructure was observed using light microscopy. To determine the mechanical properties of the produced material, a compression test and hardness measurements were performed. Based on the results, it was concluded that the proposed technological path leads to obtain a material competitive with AlSi<sub>7</sub>Mg alloy produced by casting.

**Keywords:** aluminum recycling, aluminum alloys, metal chips, direct extrusion

## Rozdział 2

# Wpływ parametrów przetwarzania wiórów stalowych na mikrostrukturę i własności wytrzymałościowe po walcowaniu na gorąco

Sylwia Tomasiak, Nikodem Sroczyk, Krystian Zyguła

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

**Streszczenie:** W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań mających na celu zaprojektowanie technologii walcowania na gorąco wiórów uzyskanych w następstwie obróbki skrawaniem. Jako materiał badawczy wykorzystano wióry ze stali 40H. Materiał wsadowy oczyszczono z chłodziw oraz innych zanieczyszczeń pozostałych po obróbce mechanicznej. W kolejnym kroku wióry zagęszczono w temperaturze otoczenia na prasie hydraulicznej przy zmiennych naciskach w celu uzyskania krzywej prasowania. Uzyskane próbki poddano spiekaniu w temperaturach 900°C, 1000°C oraz 1100°C. Otrzymane spieki poddano procesowi walcowania na gorąco, przy zastosowaniu walcarki typu kwarto, w dwóch przepustach. W celu określenia wpływu procesu zagęszczania wiórów przeprowadzono analizę mikrostruktury gotowych wyrobów, a także wykonano pomiary twardości oraz statyczną próbę rozciągania. Dzięki zastosowaniu różnych parametrów procesu możliwe było wytypowanie najefektywniejszego wariantu przetwarzania wiórów stalowych.

**Słowa kluczowe:** obróbka cieplna, przeróbka plastyczna, recykling, stal 40H, wióry

## Wprowadzenie

Wzrost zapotrzebowania na elementy z metali i ich stopów prowadzi do zwiększonej ich produkcji, a co za tym idzie – zwiększa się również ilość odpadów powstających w fazie produkcyjnej. Obróbka skrawaniem generuje znaczne ilości wiórów, które często są przekazywane do hut w celu ich ponownego przetopienia (UNEP 2011; Pietrasik 2016, s. 19-26; Pietrzyk, Tora 2017, s. 81-92). Taki sposób przetwarzania jest wydajny, ale również wysoce energochłonny i emitujący wiele zanieczyszczeń środowiskowych, jak na przykład pyły czy CO<sub>2</sub>. Alternatywą może być recykling bezpośredni (Shamsudin i in. 2016, s. 1-23), czyli przeróbka

wykorzystująca odkształcenie plastyczne, ale bez udziału fazy ciekłej. Metoda ta przebiega w zakresie temperatur przeróbki plastycznej na zimno, ciepło lub gorąco. Materiałem wsadowym są tu rozdrobnione wióry lub proszki metali, które pod wpływem bardzo dużego odkształcenia łączą się, tworząc pełnoprawny produkt końcowy. Zagadnienie to zostanie poruszone w niniejszym rozdziale.

## Metodyka badań

### Materiał badawczy

Jako materiał wyjściowy do badań wykorzystano wióry ze stali 40H powstałe w wyniku obróbki ubytkowej. Surowiec cechowała budowa śrubowa otwarta oraz zróżnicowana długość (Brodowicz 1989, s. 108-112). Materiał posiadał na sobie pozostałości chłodziwa, tlenki oraz inne zanieczyszczenia, które usunięto, stosując mycie w płuczce ultradźwiękowej w roztworze izopropanolu i detergentu czyszczącego.

### Prasowanie na zimno

Prasowanie wiórów przeprowadzono na prasie hydraulicznej ZD-100 o maksymalnym nacisku roboczym 1000 MPa. Proces przeprowadzono przy wykorzystaniu różnych nacisków, tj. 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa, 350 MPa, 400 MPa, 450 MPa i 500 MPa, w celu wyznaczenia krzywej prasowania.

Masa materiału wsadowego na jedną wypraskę wynosiła około 55 g. Zabieg prowadzony był dwuetapowo ze względu na małe wymiary gniazda matrycy oraz morfologię wiórów. W pierwszym etapie gniazdo matrycy zasypane zostało połową odważonej ilości wiórów, w celu wstępnego zagęszczenia z naciskiem maksymalnym 15 kN, a następnie dosypywano pozostałą część materiału i przystępowano do zagęszczania właściwego z ustalonym naciskiem.

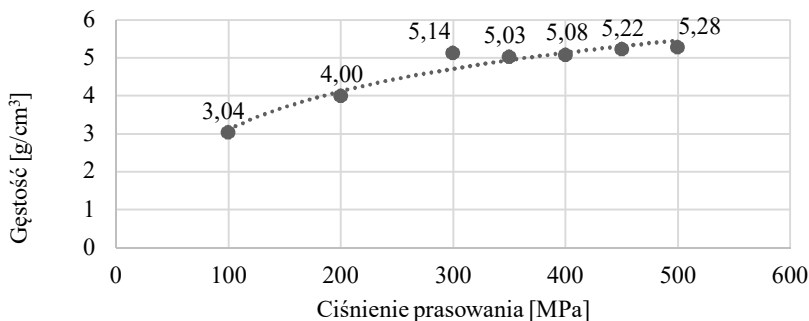
Otrzymane wypraski zmierzono i zważono, w celu wyznaczenia ich gęstości względnej. Wyniki pomiarów zamieszczono w *tab. 2.1*.

**Tabela 2.1. Wykaz parametrów otrzymanych wyprasek**

p [MPa]	a [mm]	b [mm]	h [mm]	m [g]	V [cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\frac{\rho}{\rho_0}$ [%]
100	10,38	100,90	17,53	55,73	18,36	3,04	38,82
200	10,40	100,58	13,31	55,72	13,92	4,00	51,18
300	10,35	100,42	11,40	60,84	11,85	5,14	65,67
350	10,50	100,64	10,50	55,82	11,10	5,03	64,34
400	10,50	100,49	10,40	55,72	10,97	5,08	64,94
450	10,50	100,48	10,12	55,78	10,68	5,22	66,81
500	10,60	100,80	9,80	55,33	10,47	5,28	67,58

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych wyników skonstruowano krzywą prasowania (rys. 2.1). Na jej podstawie wyłoniono najkorzystniejszą siłę prasowania wynoszącą 300 MPa.



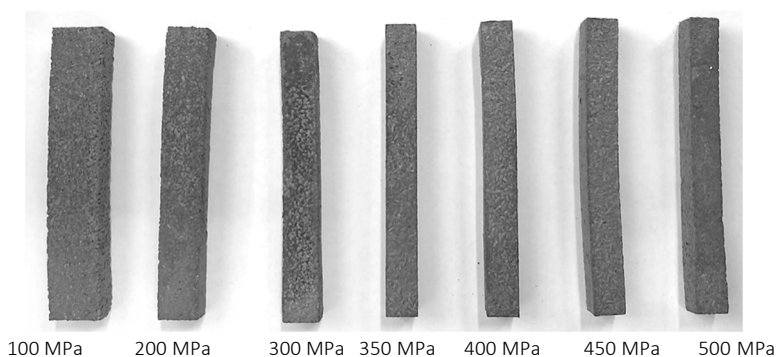
**Rysunek 2.1.** Krzywa prasowania wiórów ze stali 40H

Źródło: Opracowanie własne

Badania wykazały, że dalsze zwiększanie nacisku nie wpływa znacząco na zwiększenie gęstości względnej wypraski. Dla wytypowanego nacisku 300 MPa, gęstość wypraski wyniosła ok. 5,14 g/cm<sup>3</sup>, co w porównaniu z litym materiałem (7,14 g/cm<sup>3</sup>) daje gęstość względną równą 66%.

### Spiekanie

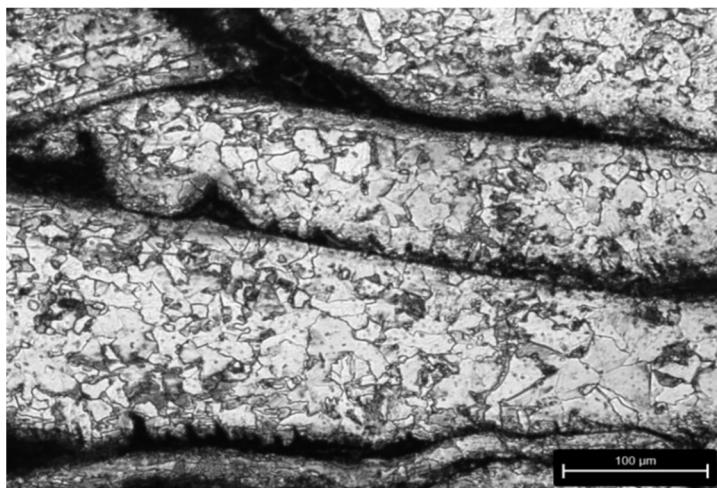
Następnie wypraski zostały poddane procesowi spiekania w celu wywołania dyfuzyjnego połączenia wiórów. Próbki spiekano w trzech różnych temperaturach, tj. 900°C, 1000°C i 1100°C, przez czas 1 godziny. Wysoka temperatura aktywowała procesy dyfuzyjne (rys. 2.4), dzięki którym w materiale wytworzyły się wiązania metaliczne między poszczególnymi wiórami. Na rys. 2.2 przedstawiono spieki spiekane przez godzinę w temperaturze 1000°C.



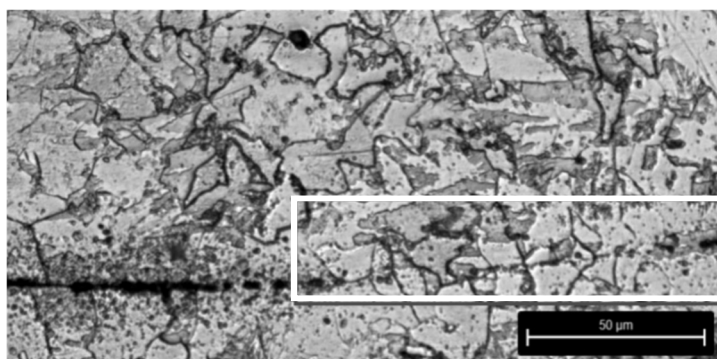
**Rysunek 2.2.** Próbki spiekane w temperaturze 1000°C przez 1 godzinę

Źródło: Opracowanie własne

W celu zaobserwowania efektów przeprowadzonych procesów wycięto próbkę z wypraski prasowanej pod naciskiem 300 MPa, spiekanej w temperaturze 1000°C, z której następnie przygotowano zgład metalograficzny. Obserwacje mikrostruktury przeprowadzone zostały na mikroskopie metalograficznym Leica DM4000M. Spiekane próbki cechowała ferrytyczno-perlityczna mikrostruktura (rys. 2.3). Zabieg ten spowodował nieznaczny wzrost gęstości spieku w stosunku do wypraski. Duży udział widocznych granic między wiórami wskazuje na konieczność zastosowania dodatkowych zabiegów w celu lepszego połączenia i zagęszczenia materiału.



**Rysunek 2.3.** Mikrostruktura po spiekaniu w temperaturze 1000°C przez godzinę  
Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 2.4.** Powstałe połączenie dyfuzyjne

Źródło: Opracowanie własne

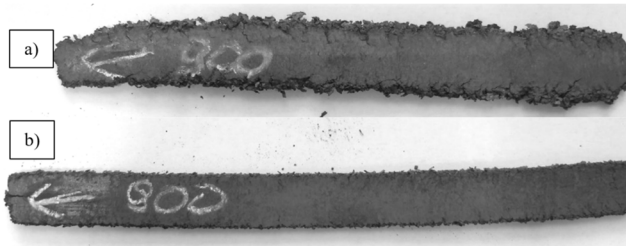
## Walcowanie

Ostatnim etapem przetwarzania wiórów było walcowanie wzdłużne, przeprowadzone na walcierce typu kwarto o średnicy walców roboczych 100 mm. Do badania przyjęto prędkość walcowania równą 267 mm/s oraz temperaturę 900°C.

Proces prowadzono w dwóch przepustach oraz rozpatrzono dwa przypadki walcowania: zgodnie z naciskiem podczas prasowania oraz poprzecznie względem nacisku podczas prasowania. Pomiedzy przepustami próbki dogrzewano w piecu przez 10 minut. Wysokość początkowa próbek wynosiła około 10,5 mm; w pierwszym przepuście została zredukowana do 6 mm (odkształcenie rzeczywiste  $\approx 0,5$ ), a w drugim do 3 mm (odkształcenie rzeczywiste  $\approx 0,7$ ).

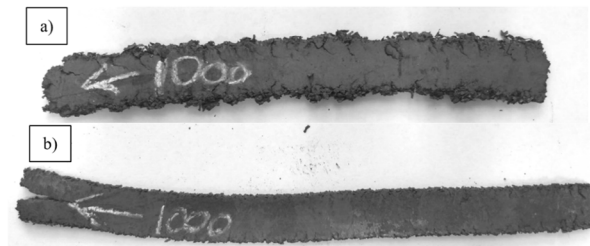
Walcowanie zgodnie z naciskiem podczas prasowania spowodowało lekkie rozdzielenie czoła walcowanego pasma, postrzępienie krawędzi oraz niewielkie pęknięcia. W przypadku walcowania poprzecznie do nacisku podczas prasowania próbki wykazywały się dużą kruchością, większym postrzępieniem krawędzi oraz większą liczbą pęknięć w stosunku do pierwszego przypadku.

Z powodzeniem przewalcowano spieki wygrzewane w temperaturach 900°C i 1000°C (rys. 2.5 i 2.6). Walcowanie nie powiodło się w przypadku próbki spiekanej w temperaturze 1100°C, która uległa rozdzielaniu (rys. 2.7). Nie kontynuowano dalszych badań na zniszczonej próbce.



**Rysunek 2.5.** Materiał po walcowaniu: a) poprzecznie względem nacisku podczas prasowania, b) zgodnie z naciskiem podczas prasowania; uprzednio spiekany w temperaturze 900°C

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 2.6.** Materiał po walcowaniu: a) poprzecznie względem nacisku podczas prasowania, b) zgodnie z naciskiem podczas prasowania; uprzednio spiekany w temperaturze 1000°C

Źródło: Opracowanie własne





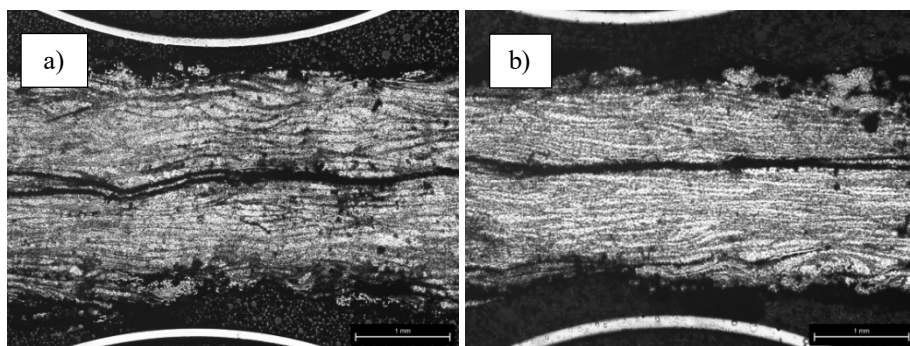
**Rysunek 2.7.** Materiał po walcowaniu zgodnie z naciskiem podczas prasowania; uprzednio spiekany w temperaturze 1100°C

Źródło: Opracowanie własne

## Wyniki badań

### Obserwacje mikroskopowe

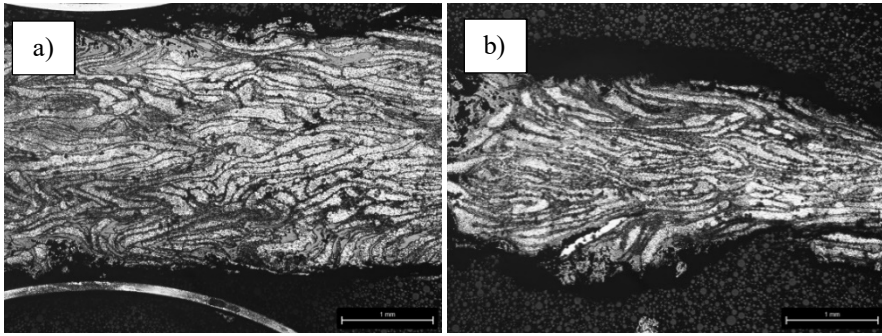
Obserwacje mikroskopowe ujawniły defekt w postaci nieciągłości w osi próbki (rys. 2.8). Wada ta jest efektem dwustopniowego zasypywania matrycy podczas zagęszczania na zimno, w wyniku czego nie doszło do połączenia wiórów pomiędzy warstwami. Z tego też powodu w procesie walcowania powstało rozwarstwienie w czole pasma.



**Rysunek 2.8.** Rozmieszczenie wiórów po walcowaniu zgodnie z naciskiem podczas prasowania w próbce spiekanej w temperaturze a) 900°C oraz b) 1000°C

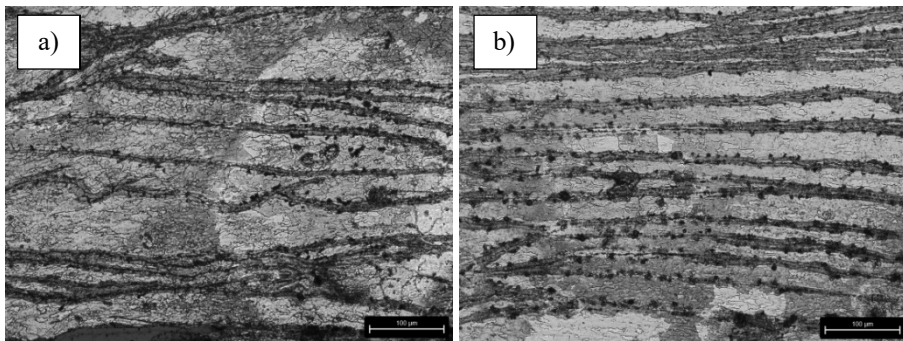
Źródło: Opracowanie własne

W przypadku próbki walcowanej poprzecznie względem nacisku podczas prasowania wada ta nie jest widoczna. Dzięki zmianie kierunku walcowania materiał odkształcił się plastycznie, co widoczne jest na rys. 2.9 w postaci pozawijanych wiórów.



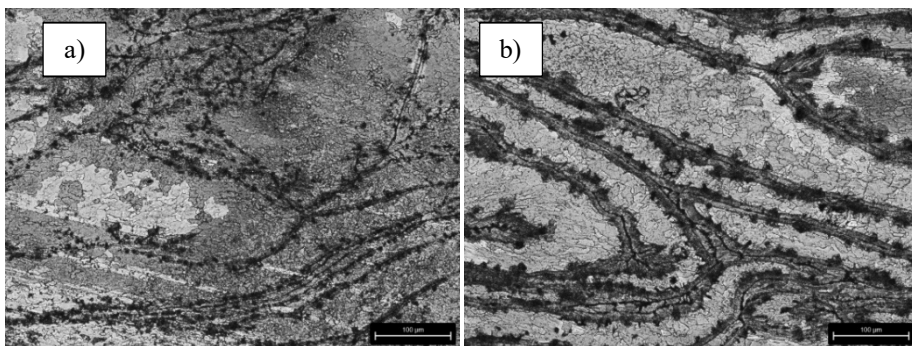
**Rysunek 2.9.** Rozmieszczenie wiórów po walcowaniu poprzecznie względem nacisku podczas prasowania w próbce spiekanej w temperaturze a) 900°C oraz b) 1000°C

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 2.10.** Mikrostruktura próbki spiekanej w temperaturze a) 900°C oraz b) 1000°C po walcowaniu zgodnie z naciskiem podczas prasowania

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 2.11.** Mikrostruktura próbki spiekanej w temperaturze a) 900°C oraz b) 1000°C po walcowaniu poprzecznie do nacisku podczas prasowania

Źródło: Opracowanie własne

Analiza mikrostruktury przy większym powiększeniu wykazała obecność tlenków żelaza rozmieszczonych na granicach styku wiórów. Zastosowanie walcowania zgodnie z naciskiem prasowania pozwoliło na uzyskanie tlenków wydłużonych o ciągłości występowania. Natomiast w przypadku drugiego wariantu tlenki nie występują regularnie, nie wykazują ciągłości. Zwiększenie temperatury spiekania spowodowało znaczny wzrost ilości tlenków na połączeniach wiórów. Zaobserwowano również, że przeważającym składnikiem mikrostruktury jest ferryt.

### Próba twardości

Badanie wykonano na twardościomierzu Duramin-40 firmy Struers, metodą Vickersa. Pomiar nie wykazały znacznych różnic w twardościach próbek. Stało się tak dzięki zastosowaniu przeróbki plastycznej na gorąco, która zniwelowała efekty gniotu, a zajście rekrytalizacji i zdrowienia umocniło materiał (Pater, Samołyk 2013, s. 25-62). Wyniki pomiarów są zgodne dla materiału w stanie wyżarzonym (Graba 2016, s. 974-983). Wyniki przedstawiono w *tab. 2.2*.

**Tabela 2.2. Wykaz twardości próbek**

Próbka	Pomiar 1 [HV1]	Pomiar 2 [HV1]	Pomiar 3 [HV1]	Pomiar 4 [HV1]	Pomiar 5 [HV1]	Średnia [HV1]
900°C, walcowana zgodnie	173,40	172,72	177,89	171,27	172,73	173,60
900°C, walcowana poprzecznie	185,12	179,52	185,16	181,32	175,68	181,36
1000°C, walcowana zgodnie	184,97	187,57	191,86	191,85	187,6	188,77
1000°C, walcowana poprzecznie	181,13	185,15	172,99	179,42	186,71	181,08

Źródło: Opracowanie własne

### Statyczna próba rozciągania

Badany materiał poddany został statycznej próbie rozciągania celem wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie. Badanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 4502 o maksymalnej sile 10 kN.

Odpowiednio przygotowane próbki rozciągano ze stałą prędkością 5 mm/s w temperaturze pokojowej. Uzyskane wyniki uśredniono i zamieszczono w *tab. 2.3*.

**Tabela 2.3. Wyniki statycznej próby rozciągania**

Temp. spiekania $T_s$ [°C]	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{Rm}$ [MPa]	Umowna granica plast. $R_{0,2}$ [MPa]	Odchylenie standardowe $\sigma_{R0,2}$ [MPa]	Wydłużenie procentowe A [%]
900	414,61	7,08	267,66	26,07	22,77
1000	409,38	2,53	216,66	30,64	15,91

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki próby wykazały porównywalne wartości wytrzymałości na rozciąganie w przypadku obu próbek. W przypadku umownej granicy plastyczności oraz wydłużenia procentowego lepsze wyniki osiągnęła próbka spiekana w temperaturze 900°C. Porównując otrzymane wyniki z danymi źródłowymi, wykazano, że materiał wytworzony poprzez prasowanie i walcowanie na gorąco wiórów posiadał własności wytrzymałościowe zbliżone do stali 40H wytworzonej w konwencjonalny sposób i poddanej wyżarzaniu zmiekczającemu.

## Podsumowanie

- Na podstawie przeprowadzonych badań oraz obserwacji wnioskować można:
- Najkorzystniejszy stopień zagęszczenia wiórów, tj. 66% gęstości względnej, uzyskano podczas prasowania z zastosowaniem siły 300 MPa.
  - Spiekanie w temperaturach 900°C i 1000°C w czasie 1 godziny umożliwiło zajście procesów dyfuzyjnych pozwalających na lokalne łączenie się wiórów.
  - Podczas spiekania ważnym czynnikiem jest temperatura, która wpływa na obecność oraz ilość powstających tlenków żelaza. Zaleca się używanie atmosfery ochronnej w celu ograniczenia utleniania się metalu.
  - Dogęszczanie wyprasek prowadzi do powstawania defektu w postaci linii nieciągłości w połowie próbki po walcowaniu na gorąco. Walcowanie zgodnie z naciskiem prasowania nie wpływa na usunięcie wady, jednak obrót próbki o 90° i walcowanie pozwala na uniknięcie powstania defektu. Wadą tej operacji jest znaczne zniekształcenie pasma oraz zwiększona kruchość próbek.
  - Powolne chłodzenie na powietrzu po procesie walcowania na gorąco pozwoliło na uzyskanie ferrytyczno-perlitycznej mikrostruktury.
  - Twardość próbek po walcowaniu osiąga wartości rzędu 170-180 HV1.
  - Przeprowadzenie statycznej próby rozciągania pozwoliło na określenie wartości wybranych własności wytrzymałościowych próbek, tj.  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  oraz  $A$ . Dla temperatury 900°C jest to kolejno 415 MPa, 268 MPa oraz 23%, natomiast dla próbek spiekanych w 1000°C jest to 409 MPa, 217 MPa oraz 16%.
  - Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie ścieżki technologicznej przetwarzania wiórów stalowych. Za optymalne warunki przyjęto prasowanie pod naciskiem 300 MPa, spiekanie w temperaturze 900°C oraz walcowanie w celu maksymalnego dogęszczenia półproduktu.

Zabiegi zagęszczania, spiekania oraz przeróbki plastycznej na gorąco, którym poddane zostały wióry ze stali 40H, pozwoliły na uzyskanie półproduktu o własnościach porównywalnych do stali w stanie wyżarzonym wytworzonej w sposób konwencjonalny. Dużym ograniczeniem stosowanego ciągu jest utlenianie powierzchni wiórów oraz powstawanie grubej warstwy zgorzeliny po spiekaniu. Stosowanie atmosfery ochronnej niewątpliwie pomoże zapobiec ww. efektom, jednakże wiąże się to z wyższymi kosztami technologicznymi.

## Podziękowania

*Przeprowadzone badania były finansowane w ramach Grantu Rektorskiego AGH nr 74/GRANT/2022.*

## Literatura

1. Brodowicz W. (1989), *Skrwanie i narzędzia*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, s. 108-112.
2. Graba M. (2016), *O problemach z określaniem wybranych własności mechanicznych stali 41Cr4*, „Mechanik”, 8-9, s. 974-983.
3. Pater Z., Samołyk G. (2013), *Podstawy technologii obróbki plastycznej metali*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin.
4. Pietrasik M. (2016), *Przerób i recykling złomu na potrzeby hutnictwa stali*, „Piece Przemysłowe & Kotły”, 2, s. 19-26.
5. Pietrzyk S., Tora B. (2017), *Przetwórstwo wtórnych surowców metali nieżelaznych w Polsce – trendy, szanse i zagrożenia*, „Inżynieria Materialna”, 18, 2, s. 81-92.
6. Shamsudin S., Lajis M.A., Zhong Z.W. (2016), *Solid-State Recycling of Light Metals: A Review*, „Advances in Mechanical Engineering”, 8(8), s. 1-23.
7. UNEP (2011), *Recycling Rates of Metals*, United Nations Environment Programme.

## Influence of Steel Chip Processing Parameters on Microstructure and Strength Properties after Hot Rolling

**Abstract:** This chapter presents the results of research aimed at designing a technology for hot rolling of chips obtained as a result of machining. The 40H steel chips were used as the research material. The charge material was cleaned of coolants and other impurities left after machining. In the next step, the chips were compacted at room temperature on a hydraulic press with variable pressures to obtain a compaction curve. The obtained samples were sintered at temperatures of 900°C, 1000°C and 1100°C. The sinters were subjected to a hot rolling process using a four high rolling mill in two passes. To determine the impact of the chip densification process, an analysis of the microstructure of the finished products was carried out, as well as hardness measurements and a static tensile test. Due to the use of various process parameters, it was possible to select the most effective variant of steel chips processing.

**Keywords:** chips, heat treatment, plastic working, recycling, steel 40H

## Rozdział 3

# Ocena skuteczności ceramiki tlenkowej w ochronie przed ładunkami kumulacyjnymi

Piotr Liguz<sup>1</sup>, Piotr Zgliński<sup>1</sup>, Michał Kwiecień<sup>1</sup>, Wiktor Potaczek<sup>1</sup>, Piotr Zbies<sup>2</sup>

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

<sup>2</sup>Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

**Streszczenie:** W ramach projektu EGIDA AGH przeprowadzono szereg badań nad wykorzystaniem ceramiki tlenkowej w osłonach wielowarstwowych do ochrony przed ładunkami kumulacyjnymi. Materiały ceramiczne na bazie komercyjnych granulatów  $Al_2O_3$  i  $ZrO_2$  różnych producentów zaprasowano jednoosiowo w prasie hydraulicznej, uzyskując wypraski heksagonalne, oraz przeprowadzono proces spiekania swobodnego w piecu komorowym przy zmodyfikowanym programie temperaturowym. Określono właściwości mechaniczne (moduł Younga, twardość, wytrzymałość na zginanie oraz odporność na kruche pękanie) wytworzonych płytek ceramicznych. Do oceny skuteczności wybranych materiałów ceramicznych podczas prób strzałowych przygotowano płytki heksagonalne, które zostały umieszczone w układzie trójwarstwowym. Określono zależność pomiędzy właściwościami mechanicznymi materiałów ceramicznych a ich odpornością antybalistyczną.

**Słowa kluczowe:** ceramika, dwutlenek cyrkonu, ładunek kumulacyjny, pancerz ceramiczny, pancerz kompozytowy, tlenek glinu

## Wprowadzenie

Jednym z nowych zagrożeń, które pojawiły się w ostatnich latach na polu walki, są niewielkie bezzałogowe statki powietrzne, które są przystosowane do przenoszenia granatów bojowych, w tym przeciwpancernych. Granaty tego rodzaju posiadają głowicę bojową zawierającą metalową wkładkę kumulacyjną, która dzięki wybuchowi oraz związanemu z nim wytworzeniu strumienia kumulacyjnego jest w stanie przebić pancerz stalowy o grubości 40-200 mm. Ciężkie pojazdy pancerne, stosowane w państwach NATO, charakteryzują się posiadaniem stalowego stropu o grubości około 20 mm, który nie zapewnia choćby minimalnej ochrony przed tego rodzaju amunicją przeciwpancerną. Z racji tego w trakcie zimnej wojny zostały opracowane pakiety pancerza dodatkowego, odpowiadającego za ochronę stropu, najczęściej zawierające warstwy

szklano-ceramiczne. Dodatkowym problemem jest ochrona newralgicznych miejsc (m.in. otwartych włazów), które nie są chronione przez pancierz wozu bojowego.

Sama ceramika pancerna była początkowo znana z wysokiej odporności antybalistycznej w kontekście ochrony przed działaniem ładunków kumulacyjnych. Niestety badania prowadzone po zakończeniu zimnej wojny w odniesieniu do panczerzy ceramicznych były skupione na zakresie ochrony przed małokalibrową bronią strzelecką, co było realizowane w kontekście ochrony osobistej żołnierzy. Z racji tego brakuje nowych, dostępnych danych dotyczących skuteczności nowoczesnych osłon ceramicznych na działanie ładunków kumulacyjnych małego i średniego kalibru.

Przedmiotem tego rozdziału jest badanie ceramiki tlenkowej pod kątem odporności na trafienia ładunkami kumulacyjnymi małego kalibru. Kryterium doboru zastosowanych materiałów była przede wszystkim ich cena – niższa w porównaniu z ceramiką węglkową, szeroka dostępność oraz łatwy proces wytwarzania spieków ceramicznych.

## Badane materiały

Przedstawione w rozdziale badania miały na celu określenie odporności antybalistycznej wybranych materiałów przeciwko ładunkom kumulacyjnym zawierającym wkładkę miedzianą. Głównym założeniem było osiągnięcie możliwie małej grubości osłony kompozytowej przy jednoczesnym obniżeniu jej masy. Zgodnie z powyższym zdecydowano się na wykorzystanie ceramiki tlenkowej, która odznacza się niską gęstością, wysoką twardością i wysokim modułem Younga. Do badań wykorzystano płytki heksagonalne z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{ZrO}_2$ . Gatunkami materiałów ceramicznych, które zostały wykorzystane w badaniach, były:

- $\text{Al}_2\text{O}_3$  – gat. CT 3000 SDP (prod. Almatis) – 99,7% czystości;
- $\text{ZrO}_2$  – gat. GY3Z-R60 (prod. Saint-Gobain) – stabilizowany 3 mol%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ;
- ATZ – gat. UprYZe Shock-G (prod. Saint-Gobain) –  $\text{ZrO}_2$  stabilizowany  $\text{CeO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$  z dodatkiem 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Właściwości mechaniczne badanych materiałów zostały zestawione w *tab. 3.1*.

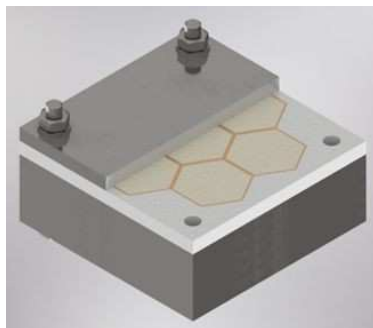
**Tabela 3.1. Zestawienie właściwości mechanicznych omawianej ceramiki**

Material	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	E [GPa]	HV <sub>10</sub> [GPa]	$\sigma$ [MPa]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,915	376,3	15,4 ± 0,79	363 ± 25
$\text{ZrO}_2$	6,038	203,4	13,92 ± 0,77	950 ± 121
UprYZe Shock-G	5,621	243,9	13,65 ± 0,54	1327 ± 84

Źródło: Opracowanie własne



Wyznacznikiem tlenku glinu jest jego wysoka twardość, natomiast tlenek cyrkonu i kompozyty na jego bazie charakteryzują się wysoką wytrzymałością na zginanie oraz wysoką odpornością na kruche pękanie. Badane materiały odznaczały się niską porowatością całkowitą. Jako podłoże na płytce (zwane też świadkiem) zastosowano stal trudnościeralną gat. HARDOX 500. Stal HARDOX 500 została wybrana ze względu na wysoką twardość (około 500 HB) i wysoką granicę plastyczności (około 1400 MPa), które zbliżone są do stali pancernej wysokiej twardości (zgodnie z normą MIL-DTL-46100).



**Rysunek 3.1.** Model badawczy zastosowany podczas badania DoP

Źródło: Opracowanie własne

## Metoda badawcza

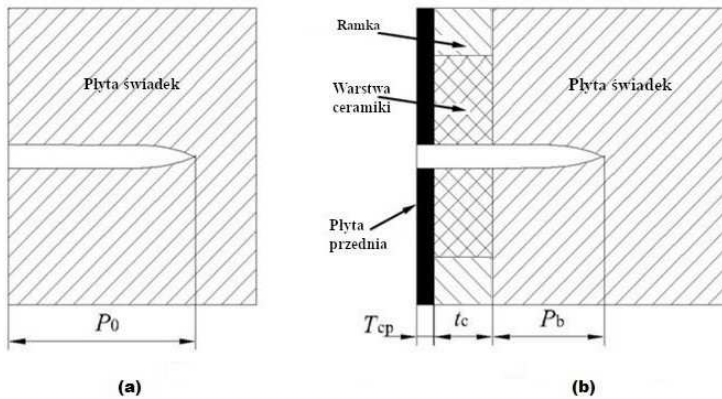
Badana ceramika tlenkowa została uformowana poprzez prasowanie jednoosiowe i spiekanie swobodne w heksagonalne płytki o boku 25 mm i grubości 10 mm. Materiał był prasowany pod ciśnieniem 100 MPa, natomiast temperatura spiekania wynosiła odpowiednio 1450°C dla dwutlenku cyrkonu oraz 1600°C dla tlenku glinu.

Do zamocowania ceramiki na świadku wykorzystano odpowiednio wyciętą ramkę wykonaną ze stali S355JR, na której umieszczono siedem płytek ceramicznych w kształcie sześciokąta o boku 25 mm i grubości 10 mm. Płytki zostały zamocowane na podłożu przy użyciu pianki poliuretanowej, która została wykorzystana również do wypełnienia przerw pomiędzy płytkami. Poprzednie próby bez użycia fugi wykazały, że płytki w wyniku wybuchu odrywają się od podłoża, przez co uzyskano gorsze wyniki. Całość konstrukcji została ze sobą skręcona przy pomocy czterech stalowych śrub M10 klasy wytrzymałości 5.8, podkładek i nakrętek, umieszczonych w rogach stosu (rys. 31.1).

Do badań materiałów wykorzystano metodę Depth of Penetration (DoP), polegającą na umieszczeniu badanego materiału na stosie płyt stalowych lub jednej grubej płycie, zwanej świadkiem (Rozenberg i in. 1988; James 2002; Cui i in. 2017). Celem badania jest wyznaczenie skuteczności ochronnej badanego materiału względem płyty – świadka. Badanie uwzględnia takie parametry jak głębokość



penetracji oraz gęstość badanego materiału. W ramach badania wykonuje się (w uproszczeniu) dwa strzały. Strzał referencyjny jest oddawany do płyty świadka (*rys. 2a*) w celu określenia jakości wzorcowego materiału. Drugi strzał – właściwy – oddawany do warstwy z badanego materiału ochronnego, która została umieszczona na płycie świadka (*rys. 2b*). W przypadku poniższych badań zastosowano dodatkowo płytę przednią o grubości 10 mm, która została wykonana z tego samego materiału, co płyta świadek.



Wyjaśnienie oznaczeń:  $p_0$  – głębokość penetracji płyty świadka podczas próby referencyjnej,  $T_{cp}$  – grubość płyty przedniej,  $t_c$  – grubość warstwy ceramiki,  $p_b$  – głębokość penetracji płyty świadka podczas próby właściwej

**Rysunek 3.2.** Schemat metody Depth of Penetration: a) próba referencyjna, b) próba właściwa

Źródło: (Cui i in. 2017)

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu i na podstawie uzyskanych głębokości penetracji wyznacza się trzy współczynniki: efektywność masową ( $e_m$ ), efektywność gabarytową ( $e_g$ ) oraz współczynnik jakości ( $q$ ). Są one obliczane przy użyciu wzorów (1), (2), (3).

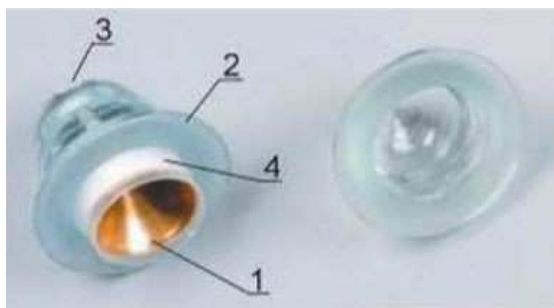
$$e_m = \frac{p_0 - (p_b + T_c)}{t_c} \quad (1)$$

$$e_g = e_m \frac{p_0}{p_c} \quad (2)$$

$$q = e_m \cdot e_g \quad (3)$$

Kluczowym parametrem jest współczynnik jakości  $q$ . Dla płyt świadków przy próbie referencyjnej domyślnie wynosi on 1. Próba zostanie uznana za pomyślną, jeśli współczynnik jakości dla danej próby właściwej wyniesie więcej niż 1.

Do prób strzałowych wykorzystano ładunki wybuchowe osiowo-kierunkowe typu ŁOKTC-H-PP-Sz-130-70 (rys. 3.3), zawierające miedzianą wkładkę o kącie rozwarcia 60° i średnicy 32 mm, a do ich inicjacji został zastosowany lont detonujący typu LDTC-RDX-150-70. Zastosowany ładunek charakteryzuje się przebijalnością stali S235JR w okolicach 60 mm, co pozwoliło na użycie w roli świadka stosu płyt stalowych o analogicznej grubości. Ładunek został umieszczony na polimerowej tulei o długości 48 mm, co odpowiadało ogniskowej ładunku, wynoszącej 1,5 średnicy wkładki kumulacyjnej. Opierając się na wynikach badań grubości oraz głębokości penetracji, wyznaczono wartości efektywności masowej, gabarytowej oraz współczynnika jakości.



Wyjaśnienie oznaczeń: 1 – wkładka kumulacyjna z prasowanych proszków metali Cu lub Cu/W; 2 – obudowa szklana; 3 – uchwyty na lont; 4 – materiał wybuchowy

**Rysunek 3.3.** Ładunek kumulacyjny LDTC-RDX-150-70

Źródło: Instytut Przemysłu Organicznego

## Omówienie wyników

Wyniki badań zostały przedstawione na rys. 3.4, gdzie skorelowano dane zawarte w tab. 3.1 do otrzymanych współczynników, wyznaczonych po próbach strzałowych, które zostały przedstawione w tab. 3.2.

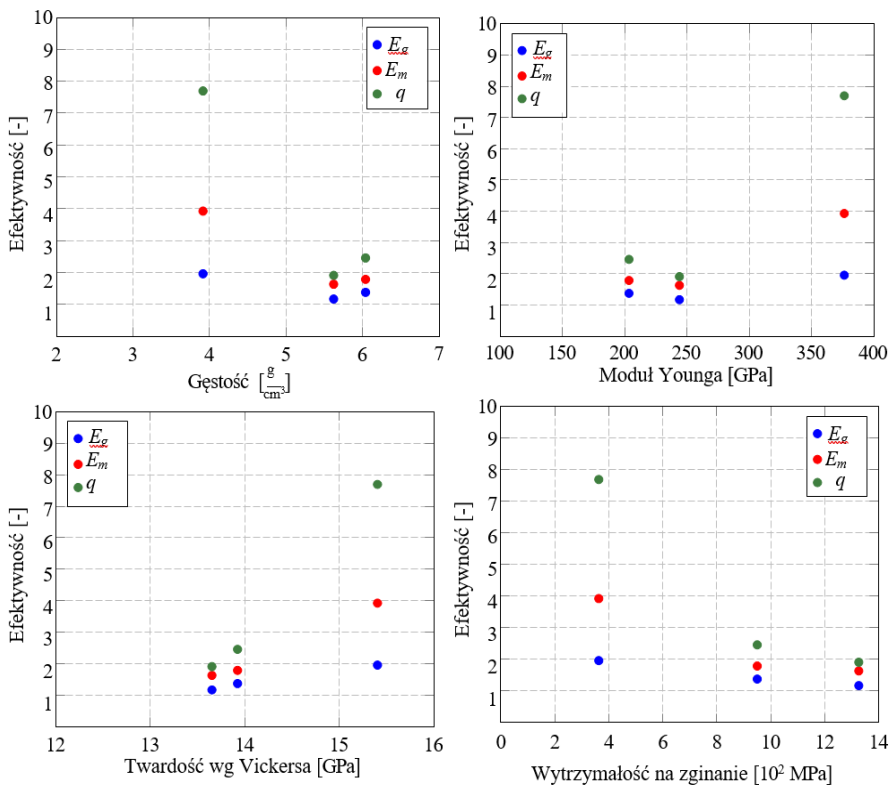
**Tabela 3.2.** Wyniki prób strzałowych ceramiki tlenkowej

Material (podłoże)	Grubość ceramiki	Głębokość penetracji	$E_t$	$E_m$	$q$
H500	–	31,8 mm	1	1	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (H500)	9,7 mm	22,5 mm	1,959	3,929	7,697
ZrO <sub>2</sub> (H500)	10,4 mm	27,9 mm	1,375	1,788	2,459
Shock-G (H500)	10,6 mm	30 mm	1,17	1,634	1,912

Źródło: Opracowanie własne

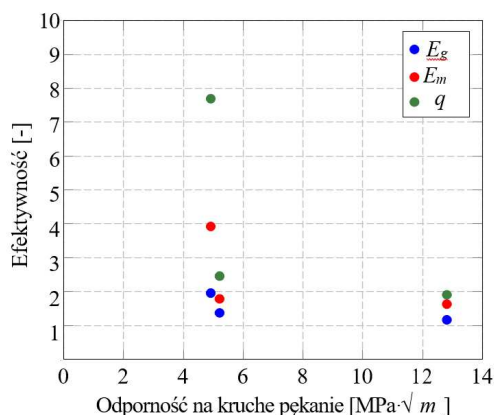
Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, że jedynym z parametrów, który może pozytywnie wpływać na odporność antybalistyczną ceramiki przeciwko ładunkom kumulacyjnym, jest ich twardość. Jednocześnie nie stwierdzono wpływu wyższej gęstości materiału na jego odporność. Jednakże wszystkie badane materiały charakteryzowały się efektywnością gabarytową oraz współczynnikiem jakości powyżej 1. To sprawia, że kompozyty na bazie  $ZrO_2$  mogą się nadawać do roli materiału antybalistycznego.

Dodatkowym parametrem, który został wzięty pod uwagę przy określaniu jakości badanych materiałów ceramicznych, była ich odporność na kruche pękanie. Pomimo wysokiej odporności kompozytu  $ZrO_2-Al_2O_3$ , która wynosiła  $12,8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ , jego odporność była niższa od korundu, którego odporność wynosiła  $4,9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ . To potwierdza brak wpływu odporności na kruche pękanie na odporność antybalistyczną materiałów ceramicznych przy pojedynczych próbach strzałowych (Goh 2019).



**Rysunek 3.4.** Efektywność ceramiki względem jej właściwości mechanicznych

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 3.5.** Efektywność ceramiki względem jej odporności na kruche pękanie

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

W ramach prób strzałowych zostały przebadane trzy rodzaje materiałów ceramicznych na bazie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz  $\text{ZrO}_2$ , które zostały umieszczone pomiędzy dwiema warstwami stalowymi. Badania potwierdziły wysoką odporność antybalistyczną tlenku glinu ( $q = 7,697$ ) w kwestii ochrony przed działaniem ładunków kumulacyjnych małego kalibru. W efekcie zalecane jest prowadzenie dalszych badań nad zastosowaniem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  w pancerzach ceramiczno-kompozytowych, przeznaczonych do ochrony przed głowicami kumulacyjnymi średniego i dużego kalibru.

W przypadku zastosowania pancerza trójwarstwowego z warstwami stalowymi o grubości 4 i 8 mm oraz warstwy ceramicznej o grubości 15 mm możliwe jest potencjalnie obniżenie masy powierzchniowej pancerza o 53% względem masy jednorodnego pancerza stalowego o tym samym poziomie ochrony.

Próby strzałowe ceramiki na bazie dwutlenku cyrkonu wykazały, że ten materiał może nadawać się do roli ceramiki pancernej ( $q = 2,459$ ). Znaczne odchylenie w średniej wytrzymałości tego materiału na zginanie wskazuje na to, że partia próbna spieków ceramicznych została wykonana bez określenia optymalnej krzywej spiekania, co mogło mieć wpływ na otrzymane wyniki z prób strzałowych. To jednak pozwala w przyszłości na dopracowanie procesu spiekania tego materiału, czego efektem będzie poprawa efektywności gabarytowej oraz współczynnika jakości pancerza wykonanego z tego materiału.

Dodatkowo porównanie otrzymanych wyników z prób metodą DoP z właściwościami mechanicznymi badanych materiałów wskazują na to, że głównym parametrem, który wpływa pozytywnie na ochronę przed ładunkami kumulacyjnymi, jest twardość materiału. W ramach dalszych prac wskazane jest przeprowadzenie badań porównawczych w celu określenia zależności właściwości mechanicznych badanych materiałów ceramicznych od ich odporności antybalistycznej

przeciwko kinetycznej amunicji przeciwpancernej, posiadającej rdzenie ze stali, węgla wolframu oraz stopów wolframu.

## Literatura

1. Cui F., Wu G., Ma T., Li W. (2017), *Effect on Ceramic Properties and Depth-Of-Penetration Test Parameters on the Ballistic Performance of Armour Ceramics*, „Defence Science Journal”, 67(3), s. 260-268.
2. Goh W. (2019), *Importance of Hardness and Toughness in Ceramic Armour*, <https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/89900/1/PhD%20Thesis%20GWL%20submission.pdf> (dostęp: 10.05.2023).
3. James B. (2002), *Depth of Penetration Testing*, „Ceramic Transactions”, 174, s. 165-172.
4. Rozenberg Z., Yeshurun Y., Bless S., Okajima K. (1988), *A New Definition of Ballistic Efficiency of Brittle Materials Based on the Use of Thick Backing Plates*, „Impact Loading and Dynamic Behaviour of Materials”, 2, s. 491-498.

### Evaluation of the Effectiveness of Oxide Ceramics in Protection against Shaped Charges

**Abstract:** As part of the EGIDA AGH project, a series of studies were carried out on the use of oxide ceramics in multilayer armor for protection against shaped charges. The ceramic materials based on commercial granules of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2$  from various producers were uniaxially pressed in a hydraulic press, obtaining hexagonal green bodies, and then a pressureless sintering process was carried out in a chamber furnace with a modified temperature program. The mechanical properties (Young's modulus, hardness, bending strength and fracture toughness) of the produced ceramic plates were determined. For evaluation the effectiveness of selected ceramic materials during shooting tests, hexagonal plates were prepared and placed in a three-layer array. The relationship between the mechanical properties of ceramic materials and their ballistic resistance was determined.

**Keywords:** alumina, ceramic armor, ceramics, composite armor, shaped charge, zirconia

## Rozdział 4

# Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę i właściwości mechaniczne stali niestopowej

Jakub Jadczyk, Grzegorz Golański

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wyniki badań wpływu obróbki cieplnej (temperatury austenitzowania) na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali niestopowej C45. Badany materiał austenitzowany był w zakresie temperatury 850÷1150°C, a następnie studzony (wyżarzanie normalizujące) lub oziębiany (hartowanie). Po hartowaniu stal jednogodzinnie odpuszczano w temperaturze 600°C. Badanie stali C45 po obróbce cieplnej obejmowało analizę mikrostruktury za pomocą mikroskopii świetlnej oraz badanie właściwości mechanicznych: pomiar twardości, próbę udarności oraz statyczną próbę rozciągania. Wpływ temperatury austenitzowania na właściwości mechaniczne stali ulepszonej cieplnie był niewielki, z kolei istotnie wpływał na właściwości stali poddanej wyżarzaniu normalizującemu.

**Słowa kluczowe:** mikrostruktura, obróbka cieplna, stal niestopowa, właściwości mechaniczne

## Wprowadzenie

Dobór parametrów obróbki cieplnej dla różnych stali poddaje się badaniu poprzez przeprowadzenie ich w różnym zakresie temperatury, czasu nagrzewania i wygrzewania oraz dla różnych ośrodków chłodzących. Dalsza analiza uzyskanych struktur za pomocą badań mikroskopowych pozwala na zaprojektowanie budowy fazowej stopów w aspekcie ich wymaganych właściwości. Obróbka cieplna pozwala na kształtowanie właściwości stali w dość szerokim zakresie, zależnie od potrzeb, co wiąże się równocześnie ze zmianami mikrostruktury (Bolanowski 2015).

Do najlepiej poznanych stopów konstrukcyjnych należy zaliczyć stal niestopową C45, której uniwersalne cechy pozwalają na szeroki wachlarz jej zastosowania. Ze stali tej mogą być wykonane odpowiedzialne części i elementy maszyn oraz urządzeń, jak również stal ta znajduje zastosowanie jako materiał

narzędziowy (Blicharski 2017). Stal C45 może być poddawana różnym obróbkom cieplnym takim jak normalizowanie oraz hartowanie z następnym odpuszczeniem. Prawdopodobnie przeprowadzona obróbka cieplna stali C45 przy zastosowaniu normatywnych parametrów temperaturowych pozwala na uzyskanie oczekiwanych właściwości mechanicznych, co umożliwia zastosowanie tego stopu jako materiału konstrukcyjnego w różnych gałęziach przemysłu (Dobrzański 2006).

Istnieje jednak niewielka lub trudno dostępna ilość danych literaturowych dotyczących wpływu nienormatywnych, temperaturowych parametrów obróbki cieplnej na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali C45. W pracy przedstawiono wyniki badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych stali niestopowej po obróbce cieplnej, przeprowadzonej zgodnie z zalecanymi przez normę wytycznymi dla tego gatunku oraz przy parametrach temperaturowych wyższych od zalecanych.

## Materiał i metodyka badań

Materiałem do badań były próbki ze stali C45 o składzie chemicznym przedstawionym w *tab. 4.1*. Analizę składu chemicznego badanej stali przeprowadzono za pomocą spektrometru iskrowego (łukowego) SPECTROLAB.

**Tabela 4.1. Skład chemiczny badanej stali C45, % masy**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,43	0,25	0,66	0,014	0,013	0,16	0,16	0,37

Źródło: Opracowanie własne

Właściwości mechaniczne stali C45 wg normy PN EN 10083-2 dla próbek o wymiarach zgodnych z tymi użytymi w badaniu zostały przedstawione w *tab. 4.2*.

**Tabela 4.2. Wymagane właściwości mechaniczne stali C45**

Wymiary próbki	R <sub>emin</sub> . [MPa]	R <sub>mmin</sub> . [MPa]	A <sub>min</sub> . [%]	Z <sub>min</sub> . [%]	Energia łamania min. [J]
d ≤ 16 mm t ≤ 8 mm	490	700-850	14	35	27

Źródło: (PN EN 10083-2)

Zakres badań obejmował przeprowadzenie obróbki cieplnej według założonych parametrów temperaturowo-czasowych; temperatura austenitowania: 850, 950, 1050 i 1150°C; czas wygrzewania 15 minut; ośrodek chłodzący: woda lub powietrze; wysokie odpuszczanie – temperatura 600°C; czas wygrzewania: 60 minut; ośrodek chłodzący: powietrze. Temperatura hartowania dla stali C45 według zaleceń normy mieści się w przedziale temperatury 820-860°C, natomiast

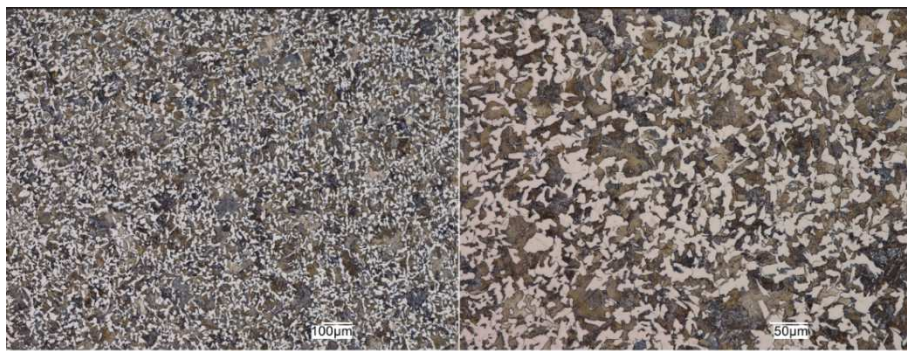


temperatura austenitowania dla wyżarzania normalizującego zawiera się w przedziale temperaturowym 840-900°C. Analizę mikrostruktury zrealizowano na zglądach metalograficznych trawionych odczynnikami – nitalem, z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego Keyence VHX-7000.

Badania właściwości mechanicznych obejmowały: pomiar twardości sposobem Vickersa, próbę udarności metodą Charpy’ego oraz statyczną próbę rozciągania. Pomiar twardości zrealizowano sposobem Vickersa za pomocą twardościomierza Future-Tech FV-700. Próbę udarności metodą Charpy’ego przeprowadzono z wykorzystaniem młota wahadłowego o początkowej energii wynoszącej 300 J. Statyczną próbę rozciągania zrealizowano na próbkach okrągłych o początkowej średnicy pomiarowej wynoszącej 8 mm z wykorzystaniem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Roell/Zwick Z100. Uzyskane wyniki były średnią z pięciu pomiarów (twardość) i trzech prób (udarność, statyczna próba rozciągania). Wielkości ziarna byłego austenitu określono na zglądach metalograficznych trawionych roztworem kwasu pikrynowego z wykorzystaniem metody siecznych przypadkowych.

## Wyniki badań

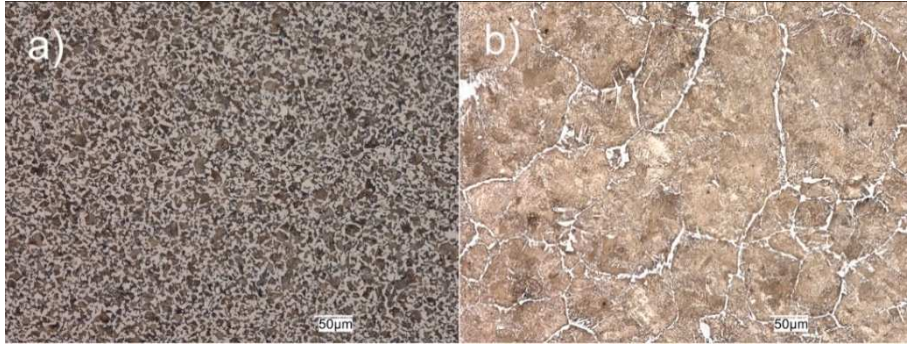
Badana stal w stanie wyjściowym (*rys. 4.1*) posiadała mikrostrukturę perlityczno-ferrytyczną o udziale 61% perlitu i 39% ferrytu. Obróbka cieplna, tj. wyżarzanie normalizujące, przyczyniło się do zmiany mikrostruktury badanej stali (*rys. 4.2*). Normalizowanie po austenitowaniu w temperaturze 850°C doprowadziło do rozdrobnienia mikrostruktury – *rys. 4.2a*. Wyżarzanie normalizujące przeprowadzone w wysokiej temperaturze, tj. 1150°C, skutkowało powstaniem struktury perlitycznej o dużych ziarnach, z siatką ferrytu po granicach ziaren – *rys. 4.2b*.



**Rysunek 4.1.** Perlityczno-ferrytyczna mikrostruktura stali C45 w stanie wyjściowym

Źródło: Opracowanie własne

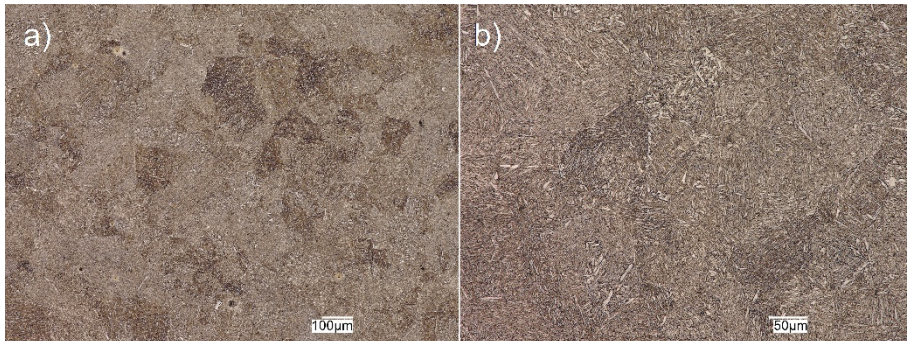




**Rysunek 4.2.** Perlityczno-ferrytyczna mikrostruktura badanej stali po wyżarzaniu normalizującym, temperatura austenitzowania: a) 850°C, b) 1150°C

Źródło: Opracowanie własne

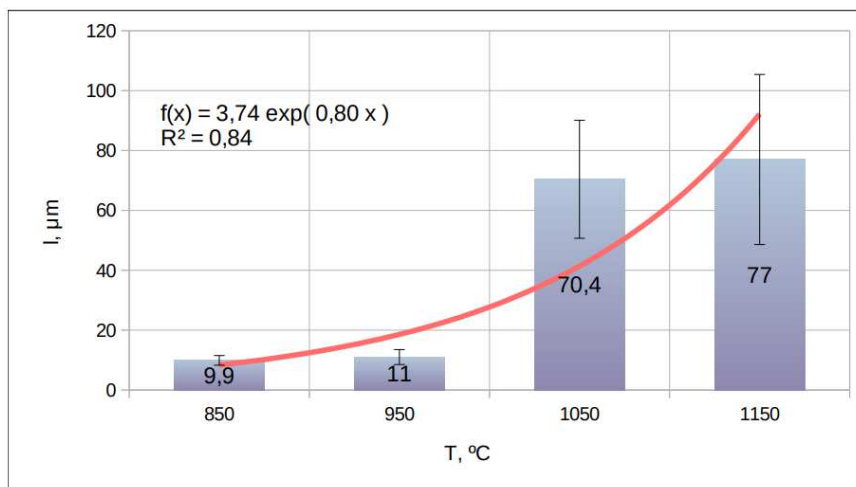
Ulepszenie cieplne w zalecanym zakresie temperaturowym (hartowanie z temperatury 850°C, odpuszczanie wysokie w temperaturze 600°C) przyczyniło się do powstania struktury martenzytu wysokoodpuszczonego (rys. 4.3a). Zbliżoną mikrostrukturę, ale różniącą się wielkością pakietów martenzytu, zaobserwowano w stali ulepszonej cieplnie hartowanej z temperatury 1150°C (rys. 4.3b).



**Rysunek 4.3.** Struktura martenzytu wysokoodpuszczonego badanej stali po ulepszeniu cieplnym, temperatura austenitzowania: a) 850°C, b) 1150°C

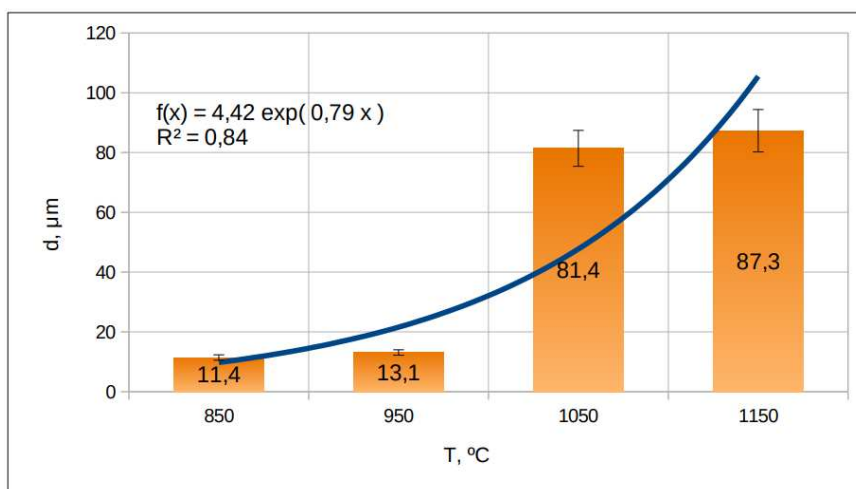
Źródło: Opracowanie własne

Określenie wielkości ziarna byłego austenitu (średniej cięciwy, średniej średnicy ziarna) wykazało, że austenitzowanie w temperaturze do 950°C pozwoliło uzyskać względnie drobne ziarno byłego austenitu. Wyższa temperatura austenitzowania doprowadziła do znaczącego wzrostu wielkości ziarna badanej stali – rys. 4.4 i rys. 4.5. Wielkość ziarna byłego austenitu po austenitzowaniu w temperaturze 1050 i 1150°C była ok. 7-8-krotnie większa w porównaniu do ziarna uzyskanego po austenitzowaniu w niższej temperaturze (850 i 950°C).



**Rysunek 4.4.** Wpływ temperatury austenitzowania stali C45 na zmianę wielkości ziarna austenitu pierwotnego – średnia cięciwa

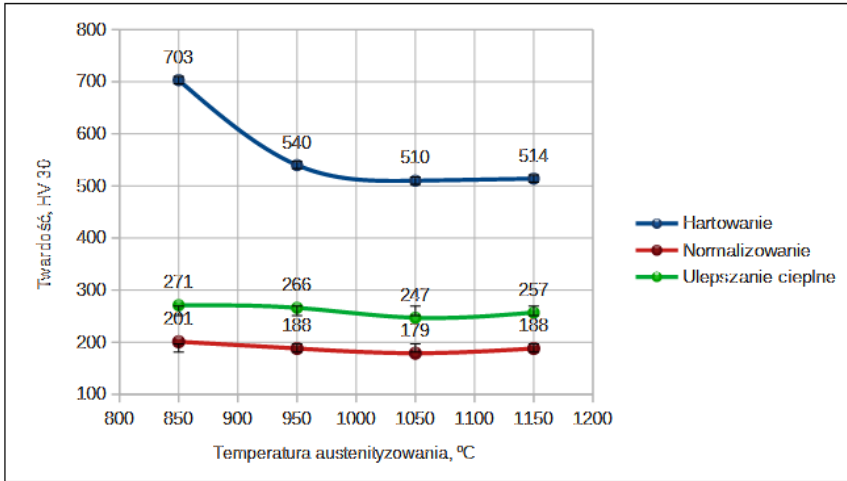
Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 4.5.** Wpływ temperatury austenitzowania stali C45 na zmianę wielkości ziarna austenitu pierwotnego – średnia średnica ziarna

Źródło: Opracowanie własne

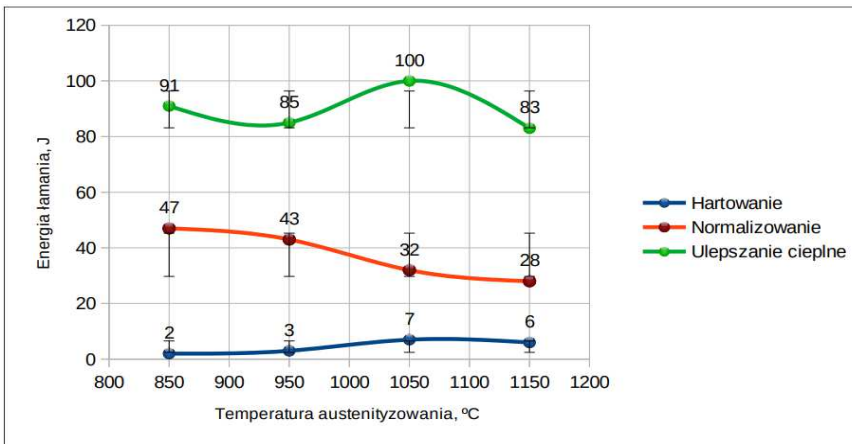
Wyniki badań właściwości mechanicznych przedstawiono w postaci graficznej na rys. 4.6-4.9. Pomiar twardości wykazał, że najwyższą twardość charakteryzuje się stali po hartowaniu, z temperatury austenitzowania 850°C. Twardość stali po ulepszaniu cieplnym oraz stali po normalizowaniu była zbliżona, niezależnie od temperatury austenitzowania dla danego stanu materiału – rys. 4.6.



**Rysunek 4.6.** Zmiana twardości stali C45 w zależności od temperatury austenitzowania i rodzaju obróbki cieplnej

Źródło: Opracowanie własne

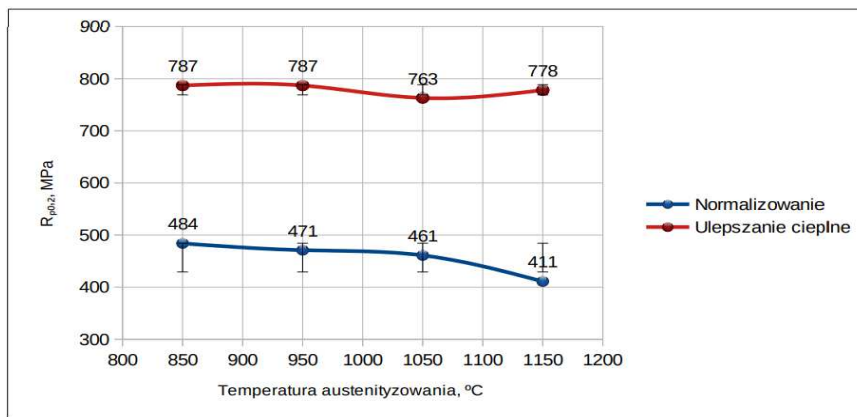
Energia łamania (*rys. 4.7*) dla materiału poddanego ulepszeniu cieplnemu była względnie porównywalna, niezależnie od temperatury austenitzowania – podobną zależność zaobserwowano dla umownej granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie – *rys. 4.8* i *rys. 4.9*. Z kolei w stali poddanej normalizowaniu energia łamania ulegała obniżeniu wraz ze wzrostem temperatury austenitzowania.



**Rysunek 4.7.** Zmiana wartości energii łamania stali C45 w zależności od temperatury austenitzowania i rodzaju obróbki cieplnej

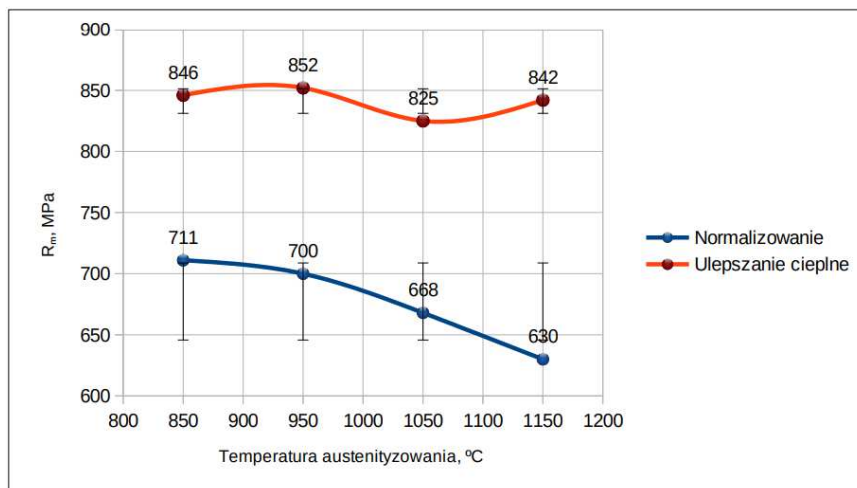
Źródło: Opracowanie własne

Wyżarzanie normalizujące stali C45 po austenitzowaniu w zakresie temperatury 850-1050°C, nie wpłynęło istotnie na zmianę właściwości wytrzymałościowych (umownej granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie). Zastosowana najwyższa temperatura austenitzowania 1150°C doprowadziła do obniżenia tych parametrów wytrzymałościowych analizowanego stopu.



**Rysunek 4.8.** Zmiana wartości umownej granicy plastyczności stali C45 w zależności od temperatury austenitzowania i rodzaju obróbki cieplnej

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 4.9.** Zmiana wartości wytrzymałości na rozciąganie stali C45 w zależności od temperatury austenitzowania i rodzaju obróbki cieplnej

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

1. Temperatura austenitizowania nie wpływa istotnie na wartość twardości stali C45 w stanie ulepszanym cieplnie i po normalizowaniu.
2. Wpływ temperatury austenitizowania stali C45 ulepszonej cieplnie na jej energię łamania jest niewielki. Wzrost temperatury austenitizowania stali C45 wyżarzanej normalizująco powyżej 950°C prowadzi do obniżenia jej ciągliwości.
3. Wpływ temperatury austenitizowania na właściwości wytrzymałościowe stali C45 ulepszonej cieplnie jest niewielki. Austenitizowanie normalizowanej stali C45 w temperaturze powyżej 1050°C prowadzi do obniżenia zarówno umownej granicy plastyczności, jak i wytrzymałości na rozciąganie.
4. Normalizowanie dla niższych temperatur austenitizowania powoduje uzyskanie drobnoziarnistej struktury perlityczno-ferrytycznej.
5. Ulepszanie cieplne, niezależnie od temperatury austenitizowania, prowadzi do otrzymania martenzytu wysokoodpuszczonego. Widoczne różnice to wielkość pakietów martenzytu związana z wielkością ziarna pierwotnego austenitu.
6. Wielkość ziarna byłego austenitu po austenitizowaniu w temperaturze 850 i 950°C była porównywalna, natomiast wyższa temperatura austenitizowania skutkuje ok. 7-8-krotnym wzrostem wielkości ziarna.

## Literatura

1. Blicharski M. (2017), *Inżynieria materiałowa. Stal*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
2. Bolanowski K. (2015), *Wpływ zawartości węgla i obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne i strukturę stali niestopowej*, „Obróbka Metalu”, 2, s. 12-17.
3. Dobrzański L.A. (2006), *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
4. PN EN 10083-2 Stale do obróbki cieplnej, stale stopowe i stale automatowe – Część 1: Stale niestopowe do hartowania i odpuszczania.

### Influence of Heat Treatment Parameters on the Structure and Mechanical Properties of Non-Alloy Steel

**Abstract:** The chapter presents the results of research on the influence of heat treatment and austenitizing temperature on the microstructure and mechanical properties of non-alloyed C45 steel. The tested material was austenitized in the temperature range 850 ÷ 1150°C, and then cooled. After quenching, the steel was tempered at 600°C for one hour. The examination of the C45 steel after heat treatment included the analysis of the microstructure by light microscopy and the examination of the mechanical properties: hardness measurement, impact test and static tensile test. The influence of the austenitizing temperature on the mechanical properties of the heat-treated steel was small, but it had a significant effect on the properties of the steel subjected to normalizing annealing.

**Keywords:** heat treatment, mechanical properties, microstructure, non-alloyed steel

## Rozdział 5

# Wpływ temperatury starzenia na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali TP347HFG

Michał Andrzejewski, Grzegorz Golański

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wyniki badań żarowytrzymałej stali austenitycznej TP347HFG po starzeniu w temperaturze 600 i 700°C w czasie do 30 000 godzin. Zakres przeprowadzonych badań obejmował analizę mikrostruktury za pomocą mikroskopu optycznego i skaningowego mikroskopu elektronowego oraz badania własności mechanicznych. W stanie dostawy badana stal posiadała mikrostrukturę austenitu z licznymi bliźniakami oraz wydzieleniami pierwotnymi i wtórnymi. Starzenie przyczyniło się do procesów wydzieleniowych zachodzących na granicach ziaren, granicach bliźniaków oraz wewnątrz ziaren. Procesy wydzieleniowe po granicach ziaren skutkowały tworzeniem miejscami tzw. ciągłej siatki wydzielen. Ponadto po 5000 h starzenia w temperaturze 700°C na styku trzech granic ziaren ujawniono występowanie charakterystycznych wydzielen fazy  $\sigma$ . Wydzielanie się faz wtórnych w mikrostrukturze badanej stali wpływało na zmiany właściwości mechanicznych, które uzależnione były od temperatury starzenia. W temperaturze 600°C widoczny był zarówno wzrost twardości, jak i właściwości wytrzymałościowych oraz względnie łagodne obniżanie wartości energii łamania. Z kolei dla temperatury 700°C widoczny był efekt przestarzenia oraz istotne obniżenie ciągliwości.

**Słowa kluczowe:** austenityczna stal TP347HFG, mikrostruktura, starzenie, właściwości mechaniczne

## Wprowadzenie

Podstawowym wymogiem stawianym materiałom konstrukcyjnym stosowanym w energetyce jest zachowanie wysokiej stabilności mikrostruktury w czasie ich długotrwałej eksploatacji w podwyższonej bądź wysokiej temperaturze (Masuyama 2001, s. 612-625). Ocenę szybkości zmian zachodzących w mikrostrukturze stali i stopów żarowytrzymałych oraz ich wpływu na właściwości



użytkowe tych materiałów przeprowadza się m.in. poprzez długotrwałe starzenie (wyżarzanie) w temperaturze zbliżonej do temperatury przewidywanej eksploatacji. Uzyskane w ten sposób dane – charakterystyki materiałowe – stanowią podstawę do prognozowania czasu bezpiecznej eksploatacji instalacji wykonanych z tych stopów. Istotna w aspekcie prognozowania czasu bezpiecznej eksploatacji materiałów wykorzystywanych w energetyce jest znajomość zmian zachodzących w ich mikrostrukturze, gdyż badania mikroskopowe stanowią główne źródło oceny stopnia degradacji tych stopów. Stal TP347HFG (X9CrNi19-11) to odporna na korozję, żarowytrzymała stal austenityczna grupy 18/10 stabilizowana niobem. Stal ta powstała w wyniku modyfikacji parametrów obróbki cieplno-mechanicznej stali TP347H, czego efektem było rozdrobnienie ziarna do wielkości przynajmniej 7 według skali wzorców ASTM (Golański, Urbańczyk 2018). Jej podstawowymi pierwiastkami stopowymi w składzie chemicznym są: chrom, nikiel, azot oraz niob. Stal TP347HFG przeznaczono do pracy w temperaturze nieprzekraczającej 620°C.

W rozdziale poddano analizie długotrwałe starzoną stal TP347HFG. Starzenie przeprowadzono w temperaturze 600 i 700°C w czasie wygrzewania do 30 000 h. Badanie tej stali miało na celu określenie zmian zachodzących podczas jej długotrwałej eksploatacji w temperaturze 600 i 700°C, ponieważ dotychczas nie poddano jej dostatecznej analizie w tym zakresie temperatur.

## Materiał i metodyka badań

Materiałem do badań była żarowytrzymała austenityczna stal TP347HFG (X9CrNi19-11) o składzie chemicznym przedstawionym w *tab. 5.1*. Skład chemiczny badanej stali określono za pomocą spektrometru iskrowego SPECTROLAB.

**Tabela 5.1. Skład chemiczny stali TP347HFG w % masy**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	N
0,10	0,38	1,42	0,02	0,001	18,71	11,88	0,60	0,10

Źródło: Opracowanie własne

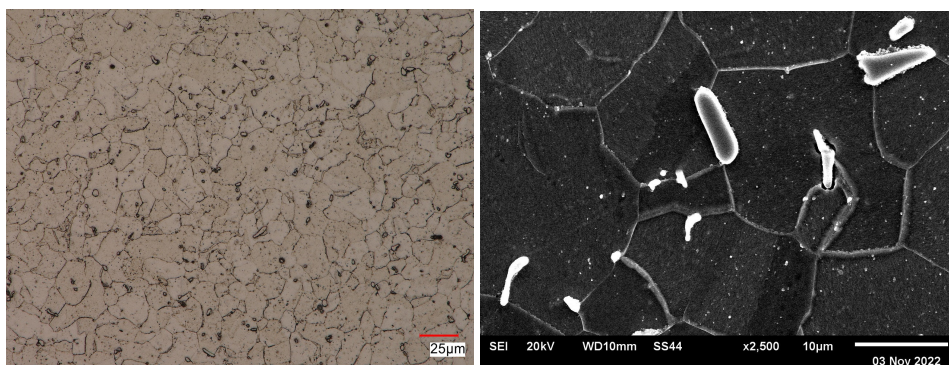
Badaniu poddano stal TP347HFG w stanie wyjściowym oraz po starzeniu w temperaturze 600 i 700°C w czasie 1000, 5000, 20 000 oraz 30 000 godzin. Zakres przeprowadzonych badań obejmował analizę mikrostruktury stali TP347HFG w stanie wyjściowym oraz po procesie starzenia w temperaturze 600°C i 700°C w czasie 5000 h i 30 000 h, którą przeprowadzono na zglądach metalograficznych. Próbkę trawiono odczynnikami metalograficznymi – siarczanem miedzi. Obserwacje oraz rejestrację mikrostruktury badanej stali przeprowadzono za pomocą mikroskopu wysokiej rozdzielczości Keyence VHX-7000 oraz skaningowego mikroskopu elektronowego Jeol JSM-6610LV. Badania

właściwości mechanicznych obejmowały pomiar twardości, próbę udarności oraz statyczną próbę rozciągania. Pomiar twardości sposobem Vickersa przeprowadzono z wykorzystaniem twardościomierza Future-Tech FV-700, stosując obciążenie węglownika wynoszące 294,2 N (30 kG). Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1. Próbę udarności wykonano z wykorzystaniem młota Charpy'ego o początkowej energii łamania równej 300 J zgodnie z normą PN-EN ISO148-1. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono za pomocą sterowanej komputerowo maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100. Badanie wykonano z wykorzystaniem próbek okrągłych, gwintowanych, o początkowej średnicy pomiarowej do = 4 mm.

## Omówienie wyników badań

### Analiza mikrostruktury

Przykładowe mikrostruktury badanego materiału przedstawiono na *rys. 5.1-5.6*. W stanie wyjściowym stal TP347HFG charakteryzowała się droбноziarnistą strukturą austenityczną z wydzieleniami węglików pierwotnych oraz drobnodyspersyjnych węglików wtórnych (*rys. 5.1*). Zgodnie z danymi literaturowymi (Sourmail 2001, s. 1-14; Wang, Zurob 2002, s. 1213-1215; Wang i in. 2021) cząstkami obserwowanymi w strukturze najprawdopodobniej są wydzielenia bogate w niob typu MX. Fazy pierwotne najczęściej zaobserwowano w pobliżu granic ziaren, z kolei wydzielenia wtórne występowały wewnątrz ziaren. Nie zaobserwowano wydzielenych faz wtórnych po granicach bliźniaków.



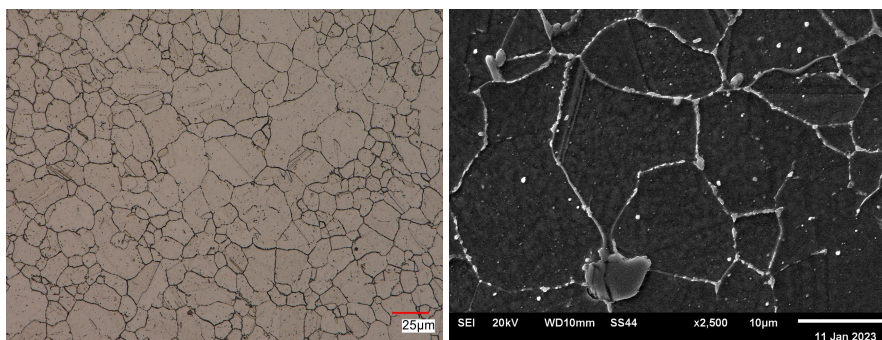
**Rysunek 5.1.** Mikrostruktura stali TP347HFG w stanie wyjściowym: a) mikroskop cyfrowy b) mikroskop skaningowy (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

Proces starzenia w temperaturze 600 i 700°C przyczynił się do zmian w mikrostrukturze badanej stali – wydzielenia na granicach ziaren cząstek faz wtórnych (*rys. 5.2*). Dane literaturowe (Sourmail 2001, s. 1-14; Golański 2017; Wang i in. 2021) wskazują, że na granicach ziaren w stalach austenitycznych



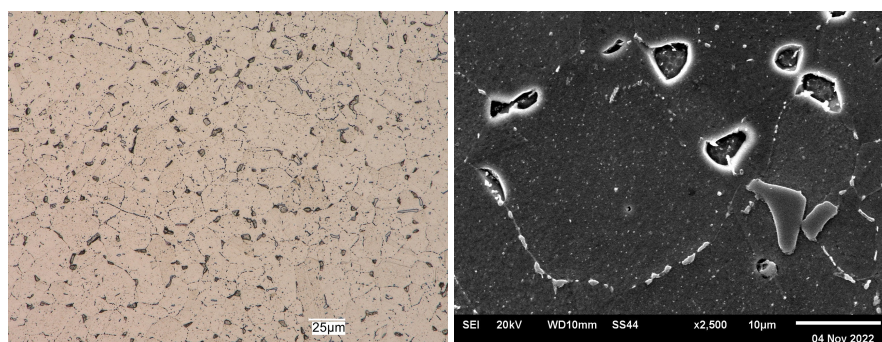
początkowo obserwuje się węgliki  $M_{23}C_6$ . W dalszym ciągu obecne są wydzielenia pierwotne oraz dyspersyjne wydzielienia wtórne. Starzenie w niższej temperaturze skutkowało głównie wydzieleniem licznych cząstek po granicach ziaren, których liczność miejscami była tak duża, że tworzyły one miejscami tzw. ciągłą siatkę wydzieleni. Procesy wydzieleniowe zaobserwowano również na granicach bliźniaków.



**Rysunek 5.2.** Mikrostruktura stali TP347HFG po procesie starzenia w temperaturze  $600^{\circ}\text{C}$  w czasie 30 000 h: a) mikroskop cyfrowy b) mikroskop skaningowy (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

Zmiany występujące po starzeniu badanej stali w wyższej temperaturze były zbliżone, ponadto zaobserwowano pojawienie się na styku trzech granic ziaren wydzieleni o odmiennej morfologii (rys. 5.3). Według danych zamieszczonych w pracy (Sourmail 2001, s. 1-14; Golański, Zieliński, Purzyńska 2017, s. 93-112) w tym przypadku mamy do czynienia z wydzieleniami fazy  $\sigma$ . Po 30 000 godzin starzenia w temperaturze  $700^{\circ}\text{C}$  w badanej stali udział fazy  $\sigma$  wynosił 3,55%, natomiast średnia powierzchnia przekroju pojedynczego wydzielenia około  $72\ \mu\text{m}^2$ .

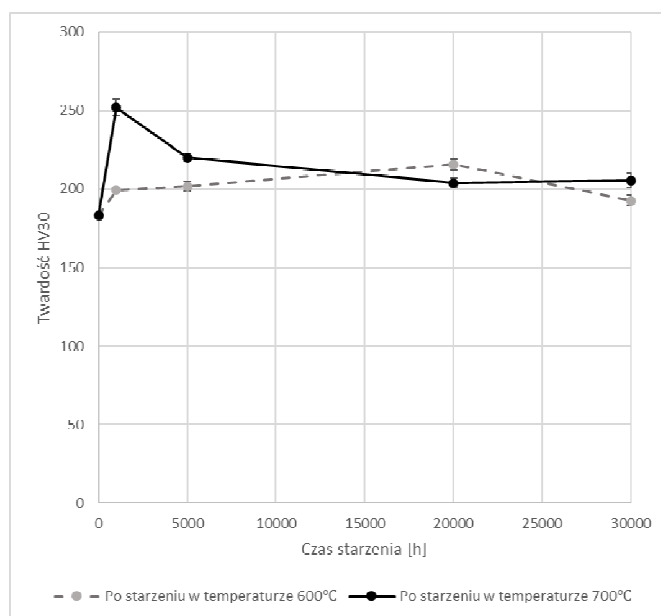


**Rysunek 5.3.** Mikrostruktura stali TP347HFG po procesie starzenia w temperaturze  $700^{\circ}\text{C}$  w czasie 30 000 h: a) mikroskop cyfrowy b) mikroskop skaningowy (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

## Pomiar twardości

Zmiany w mikrostrukturze badanej stali wpłynęły na jej właściwości mechaniczne. Wyniki ich badań zamieszczono w postaci graficznej na rys. 5.4.



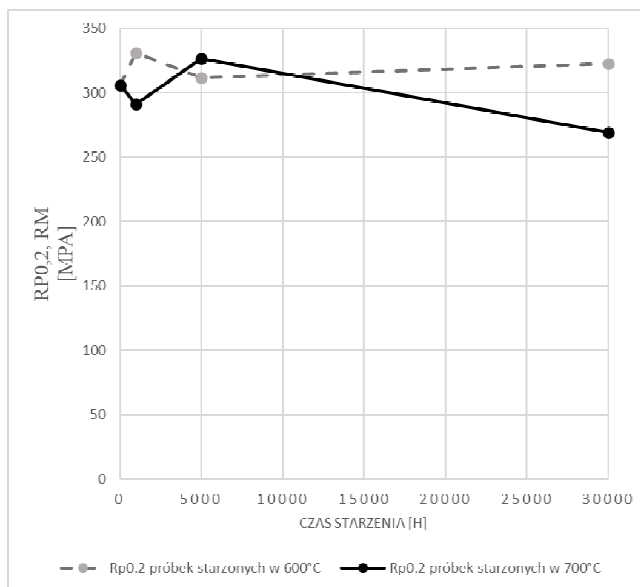
**Rysunek 5.4.** Zmiana twardości stali TP347HFG po starzeniu w temperaturze 600°C i 700°C (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku twardości starzenie w temperaturze 600°C doprowadziło do stopniowego wzrostu jej wartości, która osiągnęła maksymalny poziom w czasie do 20 000 h (twardość wzrosła o 18% względem twardości stali w stanie wyjściowym), a następnie uległa obniżeniu (rys. 5.4). W przypadku stali starzonej w temperaturze 700°C zmiany wartości tego parametru były podobne. Maksimum twardości dla tej temperatury starzenia zaobserwowano już po 1000 h i było ono wyższe o ok. 38% względem stanu wyjściowego (rys. 5.4). Dłuższy czas starzenia przyczynił się do obniżenia twardości. Początkowy wzrost tego parametru w badanej stali związany był z procesami wydzielania faz wtórnych, takich jak: MX,  $M_{23}C_6$ . Późniejsze obniżenie twardości wynikało najpewniej z efektu przestarzenia, polegającego na koagulacji wydzielen. W przypadku stali starzonej w temperaturze 700°C na powolne zmniejszanie się twardości wpłynęła również obecność fazy  $\sigma$ .

## Statyczna próba rozciągania

Wyniki statycznej próby rozciągania przedstawiono w postaci graficznej na rys. 5.5 i 5.6.

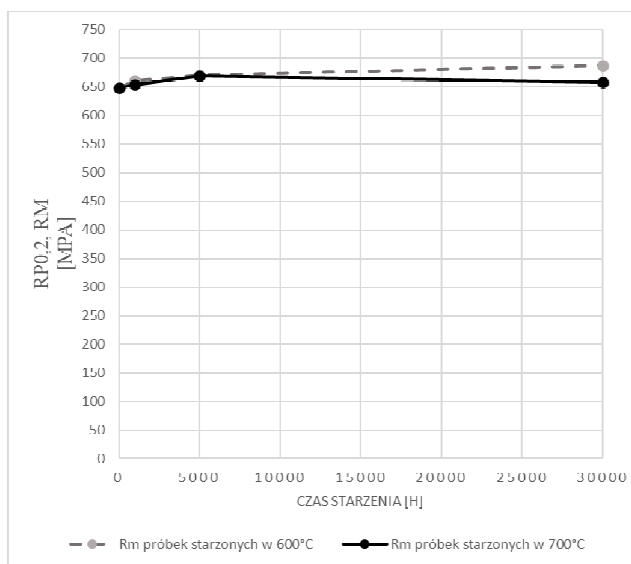


**Rysunek 5.5.** Zmiana umownej granicy plastyczności  $R_{p0,2}$  stali TP347HFG po starzeniu w temperaturze 600°C i 700°C (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

Proces starzenia przeprowadzony w czasie 1000 h i 5000 h przyczynił się do niewielkiego wzrostu wartości umownej granicy plastyczności, jednak przy dłuższym starzeniu powodował jej stopniowe obniżanie. Zmniejszenie się wartości tego parametru po 30 000 h w temperaturze 600°C było niewielkie i granica plastyczności nadal była nieznacznie wyższa niż w stanie wyjściowym. W temperaturze starzenia 700°C obniżenie się wartości umownej granicy plastyczności jest znacznie intensywniejsze i po 30 000 h jej wartość uległa obniżeniu o ponad 12% względem materiału w stanie wyjściowym (rys. 5.5).

Wytrzymałość na rozciąganie stali TP347HFG wzrastała wraz z czasem starzenia w temperaturze 600°C – z 649 MPa w stanie wyjściowym do 687 MPa po czasie 30 000 h. W temperaturze 700°C można również zaobserwować początkowy wzrost (do około 5000 h starzenia) wytrzymałości na rozciąganie, a następnie jej obniżenie, jednak wartość tego parametru po 30 000 h starzenia nadal była nieznacznie wyższa niż w stanie wyjściowym i wynosiła 658 MPa. Początkowy wzrost parametrów wytrzymałościowych badanej stali był najpewniej związany z procesami wydzieleniowymi – wzrost umocnienia mechanizmem wydzieleniowym. Zaobserwowane po dłuższych czasach starzenia stopniowe obniżenie tego parametru najpewniej spowodowane było procesem przestarzenia – koagulacja wydzieleni i zanik ich koherencji, obniżenie umocnienia mechanizmem roztworowym.

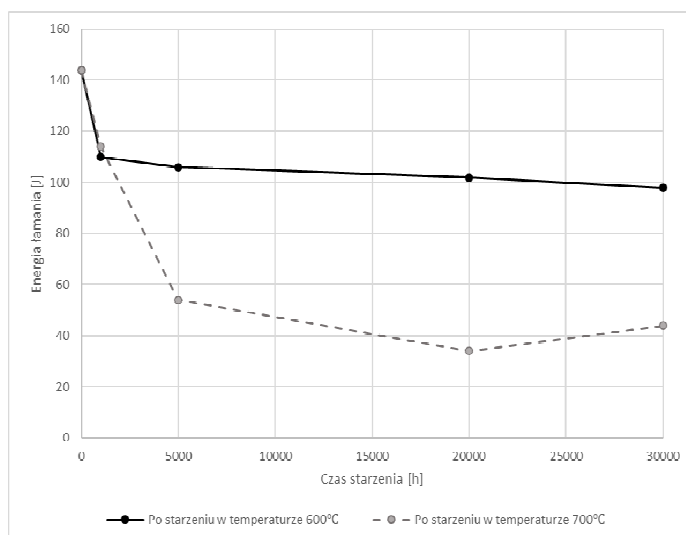


**Rysunek 5.6.** Zmiana wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  stali TP347HFG po starzeniu w temperaturze 600°C i 700°C (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

### Próba udarowości

Otrzymane wyniki próby udarowości badanej stali w stanie wyjściowym oraz po starzeniu w temperaturze 600 i 700°C przedstawiono graficznie na rys. 5.7.



**Rysunek 5.7.** Zmiana energii łamania stali TP347HFG po starzeniu w temperaturze 600°C i 700°C (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

Starzenie badanej stali wpłynęło znacząco na obniżenie energii łamania, a efekt ten nasilał się wraz ze wzrostem temperatury oraz czasu starzenia. Proces starzenia w temperaturze 600°C i w czasie do 30 000 h doprowadził do redukcji energii łamania o ok. 32% w porównaniu do stanu wyjściowego (rys. 5.2). W przypadku temperatury 700°C energia łamania obniżyła się o 69% i osiągała wartość 44 J (rys. 5.7). Obniżenie energii łamania należy wiązać przede wszystkim z procesami wydzieleniowymi na granicach ziaren – w temperaturze 600°C tworzącej się zwartej siatki węglików, a w temperaturze starzenia 700°C dodatkowo występujących na granicach ziaren wydzieleni fazy  $\sigma$ .

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące stwierdzenia i wnioski:

- Proces starzenia badanej stali spowodował głównie wydzielenie się węglików po granicach ziaren, a w przypadku starzenia w temperaturze 700°C dodatkowo zaobserwowano wydzielenie się fazy  $\sigma$ . Udział i wielkość wydzieleni fazy  $\sigma$  wzrosły z czasem starzenia w temperaturze 700°C. Wydzieleni tej fazy nie ujawniono po starzeniu w temperaturze 600°C.
- Starzenie badanej stali doprowadziło do początkowego wzrostu jej twardości, a następnie późniejszego jej obniżania, zapewne w wyniku procesu przestarzenia. Wpływ na szybkość tych zjawisk i procesów miała temperatura starzenia.
- Wzrost wartości umownej granicy plastyczności badanej stali zaobserwowano w początkowych czasach w badanych temperatury starzenia, a dalsze wygrzewanie prowadziło do stopniowego obniżania wartości tego parametru.
- Starzenie badanej stali przyczyniło się do obniżenia energii łamania, które było bardziej intensywne dla materiału wygrzewanego w temperaturze 700°C.

## Literatura

1. Andrzejewski M. (2023), *Wpływ temperatury starzenia na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali TP347HFG*, praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.
2. Golański G. (2017), *Żarowytrzymałe stale austenityczne*, Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
3. Golański G., Urbańczyk P. (2018), *Nowoczesne stale ferrytyczne i austenityczne dla energetyki – charakterystyka*, Agenda Wydawnicza SIMP, Warszawa.
4. Golański G., Zieliński A., Purzyńska H. (2017), *Precipitation Processes in Creep-Resistant Austenitic Steels*, [w:] Borek W., Tański T., Brytan Z. (red.), *Austenitic Stainless Steels – New Aspects*, s. 93-112, InTech, Rijeka.
5. Masuyama F. (2001), *History of Power Plants and Progress in Heat Resistant Steels*, „ISIJ International”, 41, 6, s. 612-625.
6. Ręklewski M. (2020), *Statystyka opisowa. Teoria i przykłady*, Wydawnictwo Państwowej Uczelni Zawodowej we Włocławku, Włocławek.

7. Sourmail T. (2001), *Precipitation in Creep Resistant Austenitic Stainless Steels*, „Materials Science and Technology”, 17, s. 1-14.
8. Wang H., Du H., Wei Y., Hou L., Liu X., Wei H., Jia J. (2021), *Precipitation and Properties at Elevated Temperature in Austenitic Heat-Resistant Steels – A Review*, „Steel Research International”, 92, 2, 200378.
9. Wang Y.J., Zurob H.S. (2002), *The Precipitation of NbC on Dislocations in Austenite*, „Applied Physics A”, 74, s. 1213-1215.

## Influence of Aging on Microstructure and Mechanical Properties of TP347HFG Steel

**Abstract:** The chapter presents the results of research on the heat-resistant austenitic steel TP347HFG after aging at temperatures of 600 and 700°C for up to 30,000 hours. The scope of the study included analysis of the microstructure using an optical microscope and a scanning electron microscope, as well as mechanical properties tests. In the as-delivered state, the studied steel had an austenitic microstructure with numerous twins and primary and secondary precipitates. Aging contributed to precipitate processes occurring at grain boundaries, twin boundaries, and within grains. Precipitation processes at grain boundaries resulted in the formation of continuous precipitate networks in some areas. Furthermore, after 5,000 hours of aging at a temperature of 700°C, the characteristic  $\sigma$ -phase precipitates were observed at the junction of three grain boundaries. The precipitation of secondary phases in the microstructure of the studied steel affected changes in mechanical properties, which were dependent on the aging temperature. At a temperature of 600°C, both an increase in hardness and strength properties as well as a relatively mild decrease in fracture energy values were observed. On the other hand, at a temperature of 700°C, the overaging effect was visible, resulting in a significant decrease in ductility.

**Keywords:** austenitic steel TP347HFG, aging, microstructure, mechanical properties

## Rozdział 6

# Badanie struktury i właściwości kompozytu ceramicznego na bazie $\text{Al}_2\text{O}_3$

Karolina Matyja, Zbigniew Bałaga

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wyniki badań kompozytu na bazie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z dodatkiem  $\text{ZrO}_2$ . Próbki do badań wytworzono metodą spiekania konwencjonalnego. Zawartość fazy cyrkonowej w kompozycie zmieniała się od 5 do 20% wagowych. Na otrzymanych próbkach wyznaczono gęstość kompozytów, twardość metodą Vickersa, chropowatość powierzchni oraz przeprowadzono obserwacje struktury. Przeprowadzone badania wykazały, że na każdą z badanych właściwości wpływ miał zmieniający się udział fazy cyrkonowej.

**Słowa kluczowe:** chropowatość powierzchni, kompozyt  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ , spiekanie, twardość Vickersa

## Wprowadzenie

Ciągły wzrost zapotrzebowania na materiały o coraz lepszych właściwościach użytkowych wpływa na nieustający rozwój materiałów ceramicznych i kompozytów wytwarzanych na ich bazie (Lakhdar i in. 2021, s. 1-50). W wielu przypadkach spowodowane jest to unikalnymi właściwościami tych materiałów, takich jak np. niska gęstość połączona z wysoką twardością i odpornością na ścieranie (Majić Renjo i in. 2015, s. 1133-1144; Hui i in. 2018, s. 213-218; Wiązania i in. 2019, s. 67-72), co wydaje się atrakcyjne np. dla przemysłu lotniczego czy motoryzacyjnego. Materiały te mogą się również sprawdzić jako alternatywa na narzędzia skrawające o dużej wytrzymałości. Dodatkowo atrakcyjna może się wydawać pewna grupa materiałów ceramicznych, która dzięki dobrej biogodności może znaleźć zastosowanie jako materiał na narzędzia medyczne czy implanty. Do grupy tej zalicza się ceramiki takie jak tlenek glinu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  czy tlenek cyrkonu  $\text{ZrO}_2$ , a także kompozyty wytwarzane na ich bazie (De Aza i in. 2002, s. 937-945; Piconi i in. 2014, s. 219). Kompozyty te próbuje się wytwarzać różnymi technikami (Zygmuntowicz i in. 2022, s. 1-15), jednak ze względu na niezbyt



skomplikowany proces technologiczny do wytwarzania tych materiałów często wykorzystuje się techniki związane ze spiekaniem proszków, począwszy od spiekania konwencjonalnego do bardziej zaawansowanych technik, np. spiekania plazmowo-iskrowego SPS (Wojteczko i in. 2019, s. 157-160; Anjaneyulu i in. 2021, s. 584-591).

## Wyniki badań

Badania przeprowadzono na próbkach kompozytowych wykonanych metodą spiekania konwencjonalnego z proszków  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz  $\text{ZrO}_2$ . W celu przeprowadzenia procesu spiekania najpierw przygotowano naważki proszków w odpowiednich proporcjach zmieniających się od 0 do 20% wagowych fazy  $\text{ZrO}_2$ , ze zmianą udziału co 5%. Otrzymane mieszanki proszków poddano procesowi mieszania przez trzy godziny. Przygotowane w ten sposób proszki zagęszczono wstępnie poprzez prasowanie w formie siłą 75 kN z prędkością wynoszącą 20 N/s. W efekcie otrzymano wypraski w kształcie walca o średnicy 10 mm. Otrzymane wypraski poddano dwustopniowemu procesowi spiekania polegającemu na wstępnym nagraniu do temperatury 250°C, wytrzymaniu w tej temperaturze przez dwie godziny w celu relaksacji ewentualnych naprężeń. Bezpośrednio z tej temperatury próbki nagrzano do docelowej temperatury spiekania wynoszącej 1500°C, natomiast czas spiekania wynosił siedem godzin. Morfologię proszków wykorzystanych do wykonania próbek przedstawiono na *rys. 6.1* oraz *6.2*.



**Rysunek 6.1.** Proszek  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wykorzystany do wytworzenia kompozytu (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne



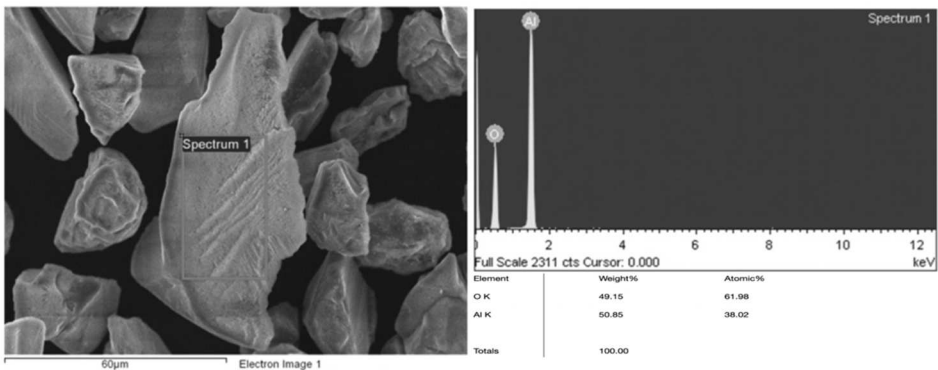


**Rysunek 6.2.** Proszek  $ZrO_2$  wykorzystany do wytworzenia kompozytu (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

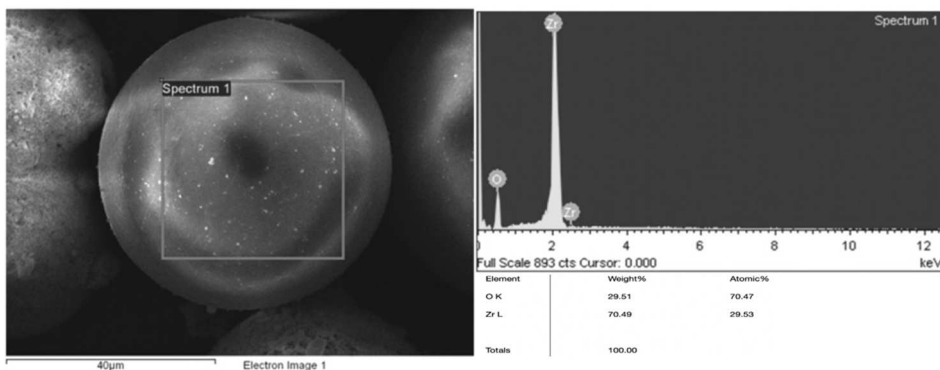
Podczas przeprowadzonych obserwacji mikroskopowych wykazano różnice w kształcie cząstek wykorzystanych proszków. Cząstki proszku  $Al_2O_3$  posiadały kształt nieregularny z ostrymi krawędziami, natomiast cząstki proszku fazy  $ZrO_2$  cechowały się kształtem sferoidalnym. Przeprowadzone analizy EDS z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego potwierdziły skład chemiczny wykorzystanych proszków, co przedstawiono na *rys. 6.3* i *6.4*.

W celu określenia wpływu dodatku fazy cyrkonowej na właściwości otrzymanych próbek kompozytowych, wyznaczono wartości gęstości pozornej oraz zmierzono twardość metodą Vickersa. Gęstość wyznaczono metodą hydrostatyczną, a otrzymane wyniki przedstawiono na *rys. 6.5*.



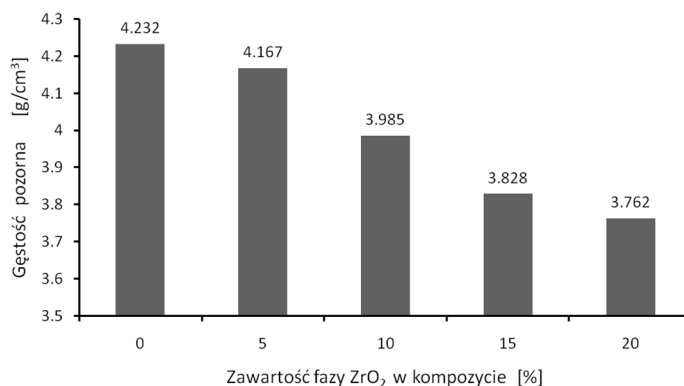
**Rysunek 6.3.** Analiza składu chemicznego proszku  $Al_2O_3$  (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 6.4.** Analiza składu chemicznego proszku  $\text{ZrO}_2$  (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne



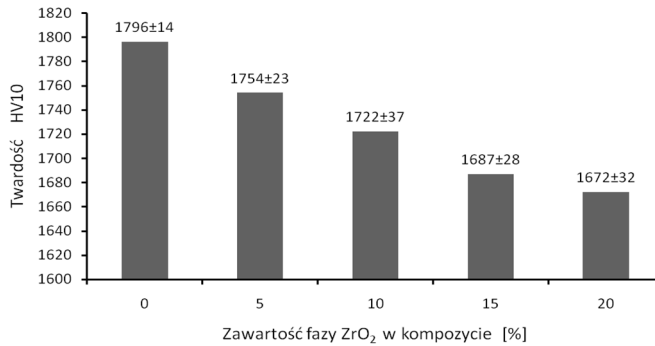
**Rysunek 6.5.** Gęstość otrzymanych kompozytów (badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

Jak wynika z wykresu przedstawionego na *rys. 6.5*, dodatek fazy  $\text{ZrO}_2$  do osnowy kompozytu, którą było  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , powodował zmniejszenie gęstości otrzymanych kompozytów wraz ze zwiększającą się zawartością fazy cyrkonowej. Zjawisko to może być spowodowane między innymi różnicami w gęstościach samych proszków wykorzystanych do wytworzenia kompozytowych próbek. Twardość Vickersa zmierzono siłą obciążającą wynoszącą 98,07 N, a uzyskane wyniki przedstawiono na *rys. 6.6*.

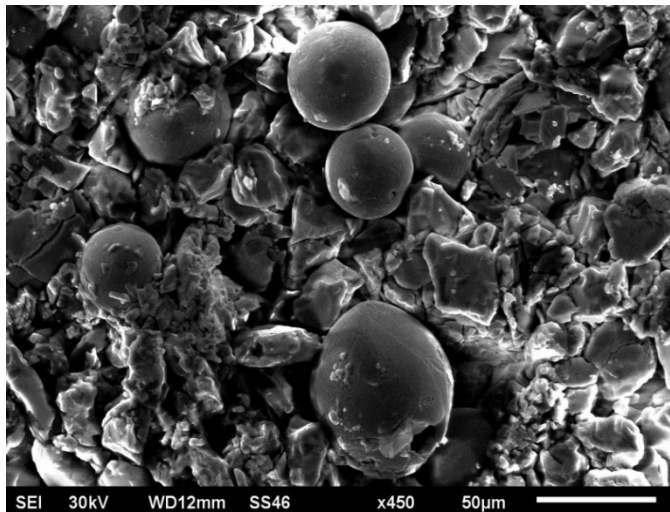
Uzyskane wyniki twardości wykazały podobną zależność – obniżania się otrzymywanych wartości wraz ze wzrostem zawartości fazy cyrkonowej. W obu przypadkach na ten efekt może mieć wpływ prawdopodobnie wzrastająca porowatność otrzymywanych kompozytów, której może sprzyjać wzrost udziału fazy cyrkonowej oraz znaczne różnice w kształcie cząstek wykorzystywanych proszków. Zjawisko to wydaje się potwierdzać struktura kompozytu wykonana przy

pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego przedstawiona na *rys. 6.7*, gdzie stwierdzono obecność sporej ilości pustych przestrzeni na styku cząstek proszków.



**Rysunek 6.6.** Twardość HV10 badanych kompozytów (badania własne)

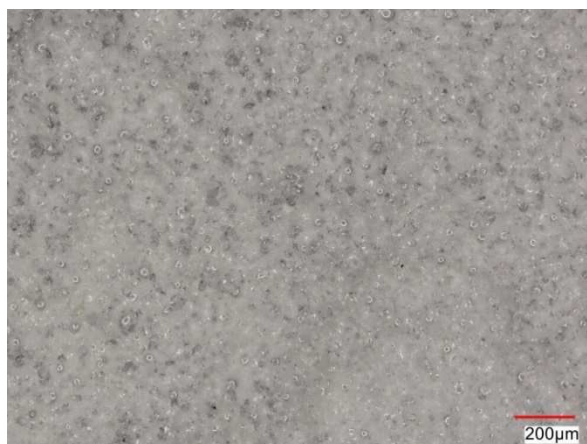
Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 6.7.** Przykładowa struktura kompozytu o zawartości 20% fazy ZrO<sub>2</sub> (badania własne)

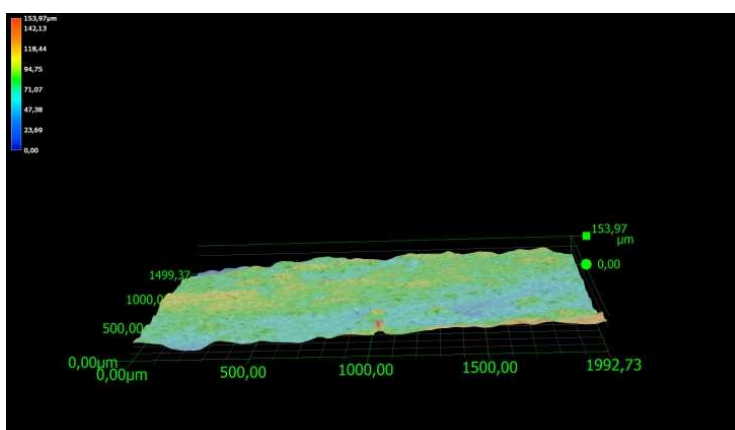
Źródło: Opracowanie własne

W celu oszacowania wpływu zawartości ZrO<sub>2</sub> na jakość powierzchni otrzymanych kompozytów, bezpośrednio po procesie spiekania, wyznaczono parametry chropowatości powierzchni przy pomocy cyfrowego mikroskopu Keyence. Przykładowe zdjęcia otrzymanych powierzchni w 2D oraz 3D przedstawiono na *rys. 6.8* i *6.9*, natomiast wyznaczone wartości parametru chropowatości Sa w *tab. 6.1*.



**Rysunek 6.8.** Przykładowa struktura powierzchni kompozytu o zawartości 15% fazy ZrO<sub>2</sub> (widok 2D – badania własne)

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 6.9.** Przykładowa struktura powierzchni kompozytu o zawartości 15% fazy ZrO<sub>2</sub> (widok 3D – badania własne)

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 6.1. Parametr chropowości powierzchni Sa (badania własne)**

Badana próbka	Średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia, Sa [μm]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 5% ZrO <sub>2</sub>	6,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 10% ZrO <sub>2</sub>	11,86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 15% ZrO <sub>2</sub>	12,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 20% ZrO <sub>2</sub>	22,62

Źródło: Opracowanie własne

Jak pokazują uzyskane wyniki chropowatości (*tab. 6.1*), wzrost ilości fazy cyrkonowej spowodował wzrost wartości średniego odchylenia wysokości nierówności powierzchni Sa. Zjawisko to może być wywołane sferoidalnym kształtem cząstek proszku  $ZrO_2$ , które pomimo dość wysokich sił wykorzystanych podczas zagęszczania proszków finalnie zachowały swój pierwotny kształt. Dodatkowo niewykluczona jest sytuacja, że pomimo trzygodzinnego mieszania przygotowanych mieszanek proszków, spieczone próbki cechowały się sporą niejednorodnością składu sprzyjającą wzrostowi chropowatości powierzchni. Sytuację taką wydaje się potwierdzać zdjęcie przedstawione na *rys. 6.7*, gdzie zauważyć można nierównomierne rozmieszczenie sferoidalnych cząstek tlenku cyrkonu w osnowie.

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- Wzrost udziału fazy  $ZrO_2$  w kompozycie, gdzie osnową był tlenek glinu  $Al_2O_3$ , powodował zmniejszenie gęstości otrzymywanych próbek kompozytowych.
- Twardość badanych kompozytów malała wraz ze wzrostem udziału tlenku cyrkonu, co mogło być spowodowane występującą porowatością w badanych próbkach.
- Stwierdzono wzrost chropowatości powierzchni określonej parametrem Sa, w zależności od zwiększającej się ilości fazy cyrkonowej w wytworzonym kompozycie.

## Literatura

1. Anjaneyulu B., Nagamalleswara Rao G., Prahlada Rao K. (2021), *Development, Mechanical and Tribological Characterization of  $Al_2O_3$  Reinforced  $ZrO_2$  Ceramic Composites*, „Materials Today: Proceedings”, 37, 2, s. 584-591.
2. De Aza A.H., Chevalier J., Fantozzi G., Schehl M., Torrecillas R. (2002), *Crack Growth Resistance of Alumina, Zirconia and Zirconia Toughened Alumina Ceramics for Joint Prostheses*, „Biomaterials”, 23, 3, s. 937-945.
3. Hui Y., Zhenhao H., Xiaodong G., Yongjun Ch., Jianlin L., Lijie L., Jianbao L., Tao Y. (2018), *Finite Element Analysis on Flexural Strength of  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  Composite Ceramics with Different Proportions*, „Materials Science & Engineering A”, 738, s. 213-218.
4. Lakhdar Y., Tuck C., Binner J., Terry A., Goodridge R. (2021), *Additive Manufacturing of Advanced Ceramic Materials*, „Progress in Materials Science”, 116, s. 1-50.
5. Piconi C., Condo S.G., Kosmač T. (2014), *Alumina and Zirconia Based Ceramics for Load-Bearing Applications*, „Advanced Ceramics for Dentistry”, s. 219-253.
6. Majić Renjo M., Čurković L., Grilec K. (2015), *Erosion Resistance of Slip Cast Composite  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  Ceramics*, „Procedia Engineering”, 100, s. 1133-1140.
7. Wiązania G., Kot M., Wojteczko A., Pędzich Z. (2019), *Tribological Properties of  $Al_2O_3/ZrO_2$  Sintered Ceramics*, „Tribologia”, 1, s. 67-72.

8. Wojteczko A., Wojteczko K., Strzelecka M., Nam T., Jach K., Rosiński M., Bućko M.M., Pędzich Z. (2019), *The Influence of Sintering Technique on Microstructure and Properties of ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite*, „Composites Theory and Practice”, 19, 4, s. 157-160.
9. Zygmuntowicz J., Tomaszewska J., Jeleń J., Piotrkiewicz P., Wachowski M., Torzewski J., Żurowski R. (2022), *Comprehensive Analysis of the Microstructure, Properties and Environmental Performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Composites Obtained Via Centrifugal Slip Casting*, „Chemical Engineering Science”, 263, s. 1-15.

## Investigation of the Structure and Properties of a Ceramic Composite Based on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**Abstract:** The chapter presents the results of research on a composite based on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with the addition of ZrO<sub>2</sub>. Test samples were produced by conventional sintering. The content of the zirconium phase in the composite varied from 5 to 20% by weight. Composite density, Vickers hardness, surface roughness and structure observations were determined on the obtained samples. The tests carried out showed that each of the tested properties was influenced by the changing share of the zirconium phase.

**Keywords:** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> composite, sintering, surface roughness, Vickers hardness

## Rozdział 7

# Wybrane własności wielowarstwowych układów wytworzonych metodą elektrochemiczną

Kinga Pietrucha, Daria Gatner, Bartosz Dziergas, Anna Nowak, Daria Kowalcze  
Wojciech Łoński, Monika Spilka, Monika Kciuk

Politechnika Śląska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wybrane własności wielowarstwowych układów miedź/kobalt o różnej liczbie i grubości warstw naniesionych metodą elektrochemiczną na podłoże ze stali niskowęglowej. Otrzymane układy poddano badaniom odporności na korozję za pomocą testów polaryzacyjnych w 3,5-proc. roztworze NaCl w temperaturze 25°C. Wyznaczono parametry elektrochemiczne metodą potencjodynamiczną oraz przeprowadzono ocenę powierzchni układów wielowarstwowych po próbach korozyjnych za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i spektroskopii z dyspersją energii (EDS). Badania elektrochemiczne próbek wykazały zróżnicowaną odporność korozyjną układów Cu/Co w zależności od liczby i grubości warstw.

**Słowa kluczowe:** osadzanie elektrochemiczne, wielowarstwowe układy miedź/kobalt, własności antykorozyjne

## Wprowadzenie

Zapotrzebowanie na materiały inżynierskie o dobrych własnościach w trudnych warunkach pracy wymusiło rozwój nowych materiałów, jakimi są układy wielo- i cienkowarstwowe. Koncepcja tych materiałów opiera się na naprzemiennej sekwencji cienkich warstw niemagnetycznych i magnetycznych o grubości zaledwie kilku nanometrów. W ostatnich latach układy wielowarstwowe zyskały na znaczeniu ze względu na ich gigantyczne własności magnetooporowe (GMR). Układy wielowarstwowe są zwykle wytwarzane za pomocą technik fizycznego osadzania z fazy gazowej, jednakże metoda osadzania elektrolitycznego, mimo iż jest procesem tradycyjnym, w dalszym ciągu daje możliwość opracowania nowych materiałów o unikalnych własnościach poprzez kontrolę parametrów osadzania (Jiang i in. 2018, s. 9669; Aliofkhaeaei i in. 2021, s. 100141; Walsh 2022, s. 233).

## Metodyka badań

Materiał do badań stanowiła folia ze stali niskowęglowej DC04 o wymiarach 50 x 50 mm i grubości 0,1 mm, na którą metodą elektrochemiczną nanoszono naprzemiennie warstwy miedzi i kobaltu o różnej grubości i liczbie

Operację miedziowania przeprowadzono w kąpeli cyjankowej o temperaturze otoczenia; natężenie prądu wynosiło 0,0125 A, a czas trwania operacji był zmienny. Osadzanie warstw kobaltu prowadzono w elektrolicie zawierającym  $\text{CoSO}_4$  w temperaturze 35°C oraz natężeniu prądu 0,1 A. Parametry operacji miedziowania i kobaltowania zamieszczono w *tab. 7.1*.

**Tabela 7.1. Parametry osadzania warstw miedzi i kobaltu na podłoże z folii stalowej**

Numer próbki	Operacja miedziowania		Operacja kobaltowania	
	Czas [s]	Liczba warstw	Czas [s]	Liczba warstw
1	165	20	60	20
2	79	20	30	20
3	165	10	60	10

Źródło: Opracowanie własne

Własności antykorozyjne wytworzonych układów określono metodą potencjodynamiczną. Badania wykonano w 3,5-proc. roztworze NaCl w temperaturze pokojowej z wykorzystaniem potencjostatu Autolab 302 N, sterowanego programem NOVA (wersja 1.11). Pomiary przeprowadzono w celce zawierającej trzy elektrody (elektroda odniesienia – nasycona elektroda kalomelowa (SCE); przeciwelektroda – pręt platynowy; elektroda pracująca – próbka). Odporność na korozję oceniono przez rejestrację zmiany potencjału obwodu otwartego ( $E_{\text{OCP}}$ ) w czasie 3600 s. Gęstość prądu korozyjnego ( $j_{\text{corr}}$ ), opór polaryzacyjny ( $R_p$ ) i potencjał korozyjny ( $E_{\text{corr}}$ ) określono przez ekstrapolację krzywych Tafela. Szybkość skanowania wynosiła 1 mV s<sup>-1</sup>.

Ocenę powierzchni próbek po badaniach korozyjnych przeprowadzono przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) Supra 35 firmy Carl Zeiss, a skład chemiczny warstwy wierzchniej określono za pomocą spektrometru z dyspersją energii (EDS) firmy EDAX.

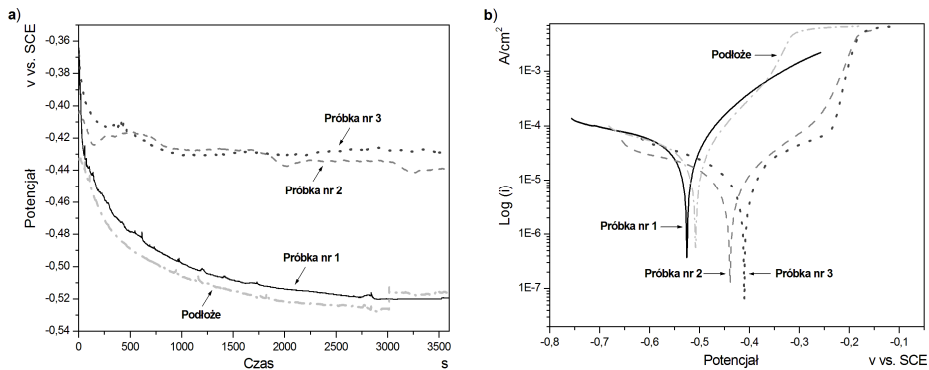
## Wyniki badań

Odporność korozyjną wielowarstwowych układów miedź/kobalt określono, przeprowadzając badania elektrochemiczne metodą potencjodynamiczną. Na *rys. 7.1* przedstawiono wyniki pomiarów potencjału obwodu otwartego a) oraz krzywych polaryzacji b) dla próbek o różnej liczbie i grubości warstw dla podłoża, natomiast ilościowe wyniki badań elektrochemicznych zestawiono w *tab. 7.2*.



Zmiany potencjału obwodu otwartego w funkcji czasu wykazały zmienną odporność korozyjną badanych materiałów. Po 3600 s najlepszą wartość  $E_{OCP}$  zarejestrowano dla próbki nr 3, składającej się z najmniejszej liczby osadzonych warstw miedzi i kobaltu. Stosunkowo najgorszą odporność na agresywne środowisko wykazała próbka stanowiąca podłoże z folii ze stali niskowęglowej, jednakże po 3000 s potencjał próbki osiągnął wyższą wartość od próbki nr 1, która utrzymywała się do końca testu.

Analiza krzywych polaryzacji próbek układów wielowarstwowych Cu/Co wykazuje wzrost potencjału korozyjnego ( $E_{corr}$ ) od -0,41 V dla próbki nr 3 do -0,53 V dla próbki nr 1. Zatem najgorsze i najwyższe wartości  $E_{corr}$  zarejestrowano dla układu z największą liczbą pojedynczych warstw, gdzie warstwy miedzi i kobaltu były osadzane w najdłuższym czasie. Również dla próbki nr 1 wykazano największą wartość gęstości prądu korozyjnego ( $j_{corr} = 55,95 \mu A/cm^2$ ), następnie dla podłoża ( $j_{corr} = 46,65 \mu A/cm^2$ ). Z kolei najniższą wartość  $j_{corr}$  uzyskano dla próbki nr 3 ( $j_{corr} = 11,79 \mu A/cm^2$ ), zaś największy opór polaryzacyjny ( $R_p = 3,51 k\Omega cm^2$ ) uzyskano dla próbki nr 2, która składała się z 20 warstw miedzi i 20 warstw kobaltu, nakładanych w najkrótszym czasie.



**Rysunek 7.1.** Zmiana potencjału obwodu otwartego w czasie a) i krzywe polaryzacji b) dla wielowarstwowych układów miedź/kobalt oraz podłoża z folii stalowej w 3,5-proc. roztworze chlorku sodu w temperaturze 25°C

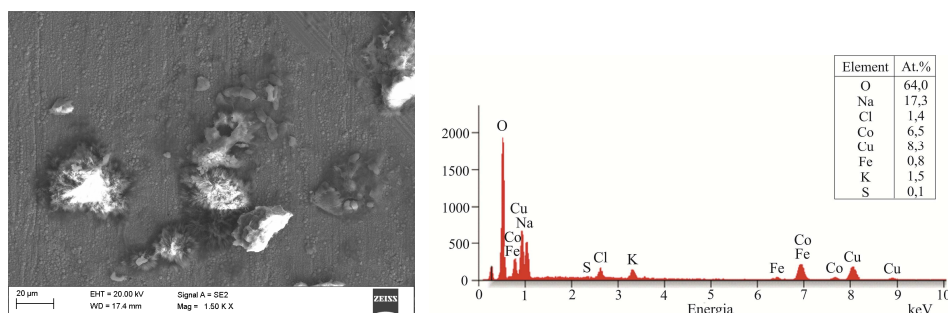
Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 7.2.** Wyniki badań elektrochemicznych wielowarstwowych układów miedź/kobalt oraz podłoża z folii stalowej

Numer próbki	$E_{OCP}$ [V]	$E_{corr}$ [V]	$R_p$ [ $k\Omega cm^2$ ]	$j_{corr}$ [ $\mu A/cm^2$ ]
1	-0,51	-0,53	0,87	55,95
2	-0,41	-0,43	3,51	39,99
3	-0,37	-0,41	2,94	11,79
Podłoże	-0,43	-0,51	0,94	46,65

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki badań odporności korozyjnej próbki nr 3, uzyskane z przeprowadzonych badań potencjodynamicznych, są skorelowane z wynikami obserwacji morfologii powierzchni układów metodą SEM po testach korozyjnych (rys. 7.2).



**Rysunek 7.2.** Obraz SEM i analiza EDS morfologii powierzchni próbki nr 3 po badaniach elektrochemicznych

Źródło: Opracowanie własne

Na powierzchni próbki widoczne są pozostałości badań korozyjnych w postaci kryształków chlorku sodu, jednak warstwa zachowała ciągłość i nie uległa znacznej degradacji. Analiza EDS wykazała również obecność tlenu, co wskazuje, że na powierzchni próbki prawdopodobnie utworzyła się pasywna warstwa tlenku.

## Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono wybrane własności wielowarstwowych układów Cu/Co, które wytworzono metodą osadzania elektrolitycznego. Przeprowadzone badania odporności na korozję próbek o zróżnicowanej liczbie i grubości warstw wykazały, że układ o najmniejszej liczbie osadzonych warstw miedzi i kobaltu (próbka nr 3) charakteryzował się najniższą gęstością prądu korozyjnego, zaś układ o dwukrotnie większej liczbie warstw, ale nałożonych w krótszym czasie (próbka nr 2) posiadał największy opór polaryzacyjny, co wskazuje na najlepsze własności antykorozyjne tych układów wielowarstwowych.

Obrazy SEM nie ujawniły śladów wżerów, co może świadczyć o powstawaniu pasywnej warstwy tlenkowej na powierzchni oraz o odporności korozyjnej układów o najmniejszej liczbie warstw w środowisku chlorku sodu.

## Literatura

1. Aliofkhaezrai M., Walsh F.C., Zangari G., Koçkar H., Alper M., Rizal C., Magagnin L., Protsenko V., Arunachalam R., Rezvanian A., Moein A., Assareh S., Allahyarzadeh M.H. (2021), *Development of Electrodeposited Multilayer Coatings: A Review of Fabrication, Microstructure, Properties and Applications*, „Applied Surface Science Advances”, 6, s. 100141.

2. Jiang W., Shen L., Xu M., Zhu J., Tian Z. (2018), *Roughness, Hardness and Giant Magneto Resistance of Cu/Co Multilayers Prepared by Jet Electrochemical Deposition*, „International Journal of Electrochemical Science”, 13, s. 9669-9680.
3. Walsh F.C. (2022), *The Continued Development of Multilayered and Compositionally Modulated Electrodeposits*, „The International Journal of Surface Engineering and Coatings”, 100, 5, s. 233-244.

### Selected Properties of Multilayer Systems Produced by Electrochemical Method

**Abstract:** The chapter presents selected properties of copper/cobalt multilayer systems with different number and thickness of layers deposited by electrochemical method on a low-carbon steel substrate. The obtained systems were subjected to corrosion resistance investigations using polarization tests in 3.5% NaCl solution at 25°C. Electrochemical parameters were determined using the potentiodynamic method. The assessment of the surface of multilayer systems after corrosion tests was carried out using scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). Electrochemical tests of the samples showed different corrosion resistance of the Cu/Co systems depending on the number and thickness of the layers.

**Keywords:** anticorrosion properties, copper/cobalt multilayer systems, electrochemical deposition

## Rozdział 8

# Wpływ powłok $\text{HfO}_2$ i $\text{Al}_2\text{O}_3$ na dynamikę sieci nanodrutów GaN. Analiza statystyczna wyników spektroskopii Ramana

Radostaw Szymon<sup>1</sup>, Eunika Zielony<sup>1</sup>, Marta Sobańska<sup>2</sup>, Zbigniew R. Żytkiewicz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Wroclawska  
Wydział Podstawowych Problemów Techniki  
<sup>2</sup>Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie

**Streszczenie:** Rozwój nanotechnologii w przypadku związków półprzewodnikowych z grupy III-V oferuje nowe możliwości wytwarzania wydajniejszych urządzeń optoelektronicznych pracujących w zakresie światła UV. Ich przykładem są nanodrut rdzeń-powłoka na bazie azotku galu (GaN). Cechą nanodrutów jest duży stosunek powierzchni do objętości oraz wysoka jakość struktury krystalicznej. Badania nanostruktur wymagają odpowiedniego przystosowania metod charakteryzacji, których wykorzystanie napotyka ograniczenia technologiczne. Rozwiązaniem jest analiza danych uzyskiwanych podczas pomiarów i zastosowanie metod, które pozwolą potwierdzić występowanie istotnych statystycznie różnic, a także zapewnić odtwarzalność wyników. W niniejszym rozdziale zaproponowano wykorzystanie metod wnioskowania statystycznego w celu zweryfikowania występowania istotnych statystycznie różnic w częstościach wzbudzeń fononowych wyznaczanych na podstawie pomiarów widm Ramana. Pomiar ramanowski i analizę danych przeprowadzono dla serii próbek nanodrutów typu rdzeń GaN – powłoka  $\text{Al}_2\text{O}_3$  lub  $\text{HfO}_2$ , otrzymanych na podłożu krzemowym. Zmierzone częstości wzbudzeń fononowych, w szczególności modu GaN  $E_2^{\text{high}}$ , poddano analizie, wykazując istotne statystycznie różnice pomiędzy próbkami o różnych grubościach powłok. Potwierdzono ich wpływ na właściwości strukturalne i dynamikę sieci krystalicznej nanodrutów. Pokazano również, że wykorzystanie podejścia statystycznego w analizie wyników ramanowskich istotnie zwiększa ich wiarygodność.

**Słowa kluczowe:** analiza statystyczna, azotek galu, nanodrut, rdzeń-powłoka, skaningowa mikroskopia elektronowa, spektroskopia Ramana

## Wprowadzenie

Azotek galu (GaN) jest wykorzystywany powszechnie w diodach elektroluminescencyjnych (LED), tj. ekologicznych i wydajnych źródłach światła niebieskiego

(Lee i in. 2019). Obecnie uwaga naukowców skupia się na nanostrukturach na bazie GaN, takich jak nanodrut (ang. *nanowires* – NWs) (Nahhas 2020), które pozwalają wyeliminować naprężenia sieci krystalicznej GaN, zapewniają wysoką jakość krystalograficzną oraz zwiększają wydajność fotoluminescencji (Quan i in. 2019). Wśród nich obiecujące są nanodrut typu rdzeń-powłoka (ang. *core-shell*), w których nanodrut GaN, zwane dalej rdzeniami, pokrywa się innymi związkami, jak na przykład: AlGaN (Zielony i in. 2022; Adhikari i in. 2023) czy InGaN (Manglano i in. 2022). Zastosowanie powłok ma za zadanie m.in. ochronę rdzenia przed degradacją, pasywację stanów powierzchniowych, a także zmianę energii emitowanego światła. Istotne stają się badania podstawowe tych obiektów, w tym określanie, jaki wpływ na ich właściwości mają: materiał powłoki, jej grubość czy parametry osadzania. Wśród wielu technik pomiarowych niezwykle cenna jest spektroskopia Ramana, która jest wykorzystywana do badań dynamiki sieci krystalicznej i wzbudzeń fononowych (Cialla-May i in. 2019), a analiza uzyskanych wyników pozwala także m.in. na opisanie odkształceń sieci krystalicznej (Zielony i in. 2022).

Badanie zmian w dynamice sieci krystalicznej, wynikających z różnic w budowie i składzie obiektów o rozmiarach w skali nanometrowej, jest jednak trudne. Nakładają się na to różne czynniki zewnętrzne, takie jak: szum termiczny, niejednorodność próbek czy niestabilność układu pomiarowego (Falgayrac i in. 2022). Dlatego w niniejszym rozdziale zaproponowano wykorzystanie metod wnioskowania statystycznego, które nie tylko zapewniają wyższą wiarygodność otrzymanych wyników, ale też pozwalają zweryfikować, czy zaobserwowane różnice są istotne statystycznie. Tym samym możliwe staje się badanie i analiza niewielkich zmian w nanostrukturach. Jednocześnie w przypadku takich pomiarów zostają zapewnione: odtwarzalność wyników i wiarygodność wniosków, które należy mieć szczególnie na uwadze w celu ochrony przed kryzysem replikacyjnym (Loken, Gelman 2017).

W rozdziale przedstawiono wyniki badań nanodrutów GaN z powłokami z szerokoprzerwowych tlenków  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{HfO}_2$ . Do pomiaru nanostruktur wykorzystano spektroskopię Ramana, dzięki której wyznaczono częstotliwości wzbudzeń fononowych. Następnie przeprowadzono analizę statystyczną, by wykazać wpływ powłok na właściwości struktur i dynamikę ich sieci krystalicznej.

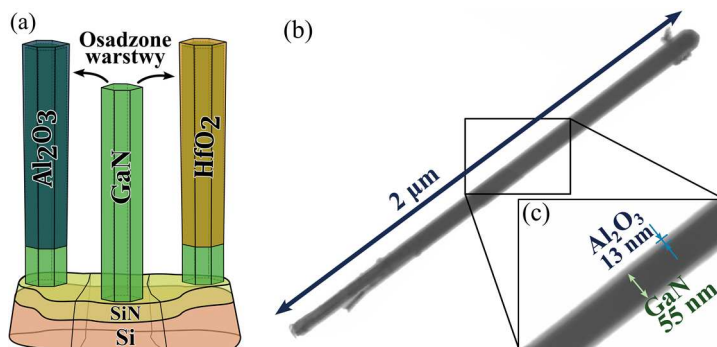
## Materiały i metody

Próbki nanodrutów GaN na podłożu Si(111) wytworzono metodą epitaksji z wiązek molekularnych z plazmowym źródłem azotu (Klosek i in. 2013; Sobanska i in. 2016). Następnie w procesie osadzania warstw atomowych naniesiono na nie powłoki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{HfO}_2$  o nominalnych grubościach: 5, 10 i 20 nm (*rys. 8.1a*).

Strukturę próbek zbadano, wykorzystując skaningową mikroskopię elektronową (ang. *scanning electron microscope* – SEM), a w celu potwierdzenia obecności

powłok i oszacowania ich grubości wykorzystano tryb transmisyjny mikroskopu (ang. *scanning transmission electron microscope* – STEM) (rys. 8.1b, c).

Widma Ramana nanodrutów zostały zmierzone z wykorzystaniem układu T64000 Horiba-Jobin-Yvon, pracującego w trybie rozpraszania wstecznego, bez detekcji polaryzacji, z pojedynczą siatką dyfrakcyjną, w temperaturze pokojowej. Do pobudzania próbek użyto lasera półprzewodnikowego o długości fali 532 nm. Widma Ramana nanodrutów badano w zakresie częstości 250-800  $\text{cm}^{-1}$ .



**Rysunek 8.1.** a) Schemat nanodrutów typu rdzeń-powłoka GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz GaN/ $\text{HfO}_2$ ; b) Zdjęcie pojedynczego nanodrutu GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  o nominalnej grubości powłoki 10 nm z mikroskopu STEM; c) Zdjęcie w powiększeniu

Źródło: a) Opracowanie własne, b) i c) Anna Reszka (Instytut Fizyki PAN)

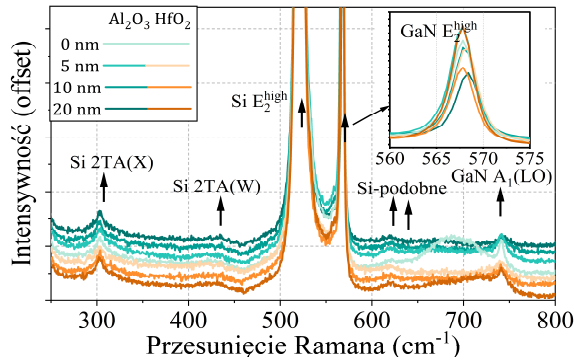
Analizy danych wykonano z wykorzystaniem oprogramowania OriginPro, w tym opracowanie danych zarówno od strony analitycznej (dopasowanie widm krzywymi Lorentza), jak i statystycznej (wykonanie testów statystycznych oraz histogramów).

## Wyniki

Zdjęcia próbek wykonane techniką SEM przedstawiają typową budowę nanodrutów, które u podstawy tworzą zestaw cienkich, pojedynczych kolumn, następnie w wyniku koalescencji formują jednorodny i grubszy nanodrut (rys. 8.1b). Osadzone powłoki tlenkowe widoczne są dużo lepiej w trybie STEM, w którym elektrony, przyspieszone poprzez przyłożenie wysokiego napięcia, przechodzą z większą łatwością przez cienką powłokę niż przez rdzeń, co widoczne jest jako jaśniejsza krawędź na zdjęciu w powiększeniu (rys. 8.1c). Zmierzona grubość powłoki wyniosła około 13 nm, a więc była bliska przyjętej wartości nominalnej 10 nm.

Wyniki pomiarów widm Ramana badanych nanodrutów zaprezentowano na rys. 8.2. Widoczne są w nich dwa mody  $E_2^{\text{high}}$  o największej intensywności, pochodzące kolejno od podłoża Si dla częstości 520,5  $\text{cm}^{-1}$  (Iatsunskiy i in. 2014) oraz od GaN dla 568  $\text{cm}^{-1}$  (Davydov i in. 1998). Mody wyższego rzędu

pochodzące od Si to: Si 2TA(X) dla  $300\text{ cm}^{-1}$ , Si 2TA(W) dla  $420\text{ cm}^{-1}$  oraz mody określane jako Si-podobne, obserwowane powyżej  $600\text{ cm}^{-1}$  (Iatsunskiy i in. 2014). Natomiast mod widoczny dla  $740\text{ cm}^{-1}$  to mod GaN  $A_1(\text{LO})$  (Davydov i in. 1998).



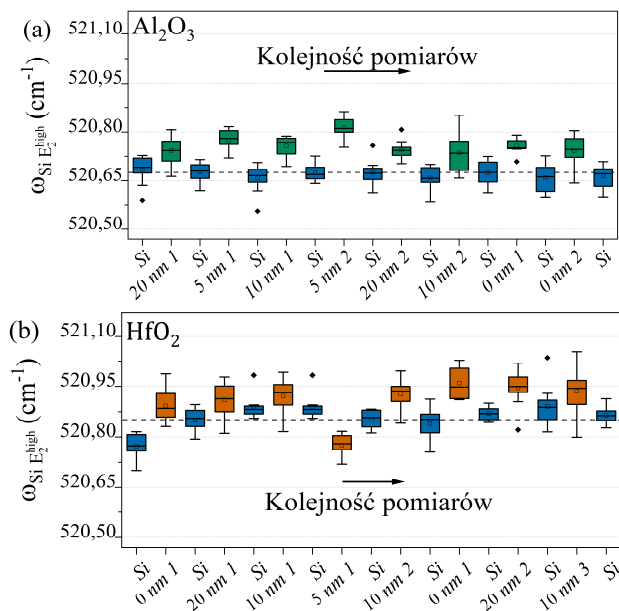
**Rysunek 8.2.** Widma Ramana nanodrutów typu rdzeń-powłoka GaN/HfO<sub>2</sub> i GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> z oznaczonymi wzbudzeniami fononowymi. Pomiary wykonano przy pobudzeniu próbek laserem o długości fali 532 nm

Źródło: Opracowanie własne

W widmach Ramana nanodrutów zaobserwowano różnice w intensywności i częstotliwości wzbudzenia GaN  $E_2^{\text{high}}$ . Na pierwszą z tych wielkości wpływają parametry pomiaru, takie jak: czas pobudzenia i zbierania sygnału, moc wiązki laserowej, kalibracja układu optycznego, a także gęstość materiału w badanym obszarze. Natomiast w przypadku częstotliwości wzbudzeń fononowych  $\omega$  ulega ona zmianie w wyniku odkształceń sieci krystalicznej, wpływu temperatury czy kwantowych efektów rozmiarowych (Zielony i in. 2022). Analiza tych mechanizmów wymaga wyznaczenia wartości zmiany częstotliwości wzbudzeń fononowych  $\Delta\omega$ , na które poza wspomnianymi efektami mają wpływ także inne czynniki: niejednorodność próbki, niestabilność układu, wahania temperatury czy warunki zewnętrzne, co przekłada się na rozkład normalny wyników (Chang, Huang, Wu 2006).

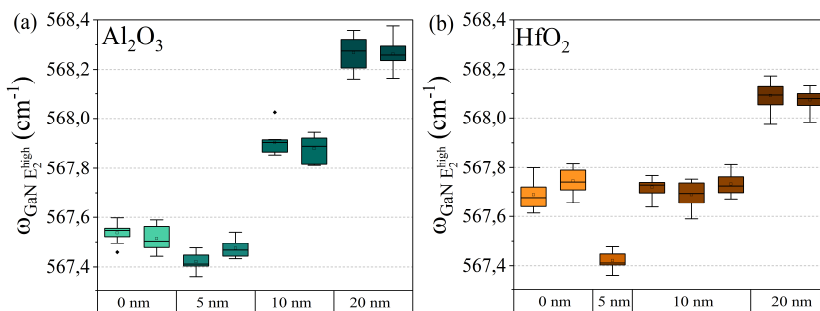
Aby wykazać wpływ powłok na wielkość  $\omega$ , zebrano dane dla próbek nanodrutów GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (rys. 3a) oraz GaN/HfO<sub>2</sub> (rys. 3b). W pojedynczej serii wykonano 10 pomiarów w różnych miejscach na powierzchni danej próbki. Wyniki, przedstawione w postaci wykresów pudełkowych, zebrano naprzemiennie dla referencyjnej próbki Si (niebieskie) oraz nanodrutów GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (zielone) i GaN/HfO<sub>2</sub> (pomarańczowe). Wykresy pudełkowe podpisano na osi poziomej Si dla próbki referencyjnej lub grubością powłoki i numerem serii pomiarowej dla próbek nanodrutów GaN, gdzie wartość 0 nm oznacza nanodrut bez powłoki. Widma Ramana rejestrowano przy krótkim czasie ekspozycji lasera (10 s), oraz jego niskiej mocy ( $\sim 0.4\text{ mW}$ ), wykluczając efekty związane z nagrzewaniem się próbki.

Dla próbki referencyjnej Si zaobserwowano stałą wartość średnią częstości modu Si  $E_2^{\text{high}}$  (ciemna, przerywana linia), co potwierdziło stabilność układu w trakcie pomiarów. Natomiast zmiana tej wartości z  $520,66 \text{ cm}^{-1}$  dla serii pomiarów próbek NWs GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  na  $520,88 \text{ cm}^{-1}$  dla NWs GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  wskazuje na istotny wpływ kalibracji układu mającej miejsce pomiędzy tymi dwiema seriami pomiarów.



**Rysunek 8.3.** Wykresy pudełkowe częstości modu Si  $E_2^{\text{high}}$  mierzone na powierzchni referencyjnej próbki krzemowej (niebieskie), próbki nanodrutów typu rdzeń-powłoka a) GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  (zielone) i b) GaN/ $\text{HfO}_2$  (pomarańczowe)

Źródło: Opracowanie własne

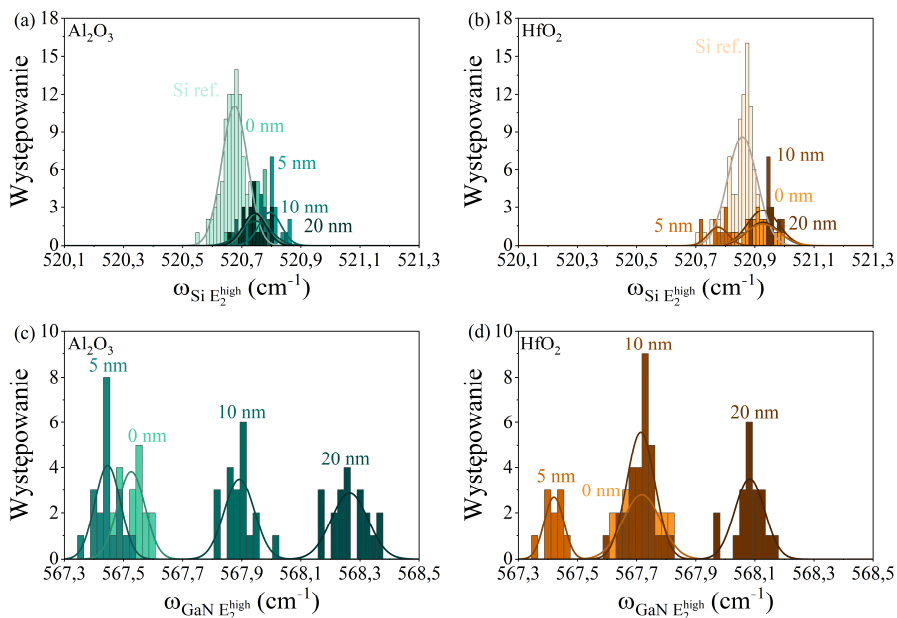


**Rysunek 8.4.** Wykresy pudełkowe częstości modu GaN  $E_2^{\text{high}}$  mierzone w różnych punktach powierzchni nanodrutów GaN typu rdzeń-powłoka, a) GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz b) GaN/ $\text{HfO}_2$ , uporządkowane pod względem grubości powłok: 5, 10 i 20 nm

Źródło: Opracowanie własne



Analogicznie wykonano analizę dla częstości modu GaN  $E_2^{\text{high}}$ , występującego w widmach Ramana próbek nanodrutów GaN z powłokami. Wykresy pudełkowe częstości tego modu przedstawiono na *rys. 8.4*. Uzyskane wyniki dla próbki nanodrutów GaN z powłoką o danym materiale i grubości nie różniły się między seriami pomiarowymi, ale w przeciwieństwie do częstości modu Si  $E_2^{\text{high}}$  różniły się pomiędzy próbkami. Przedstawiono to na histogramach występowania częstości modów Si  $E_2^{\text{high}}$  oraz GaN  $E_2^{\text{high}}$  (*rys. 8.5a-8.5d*). Wykresy te pokazują, że wartości częstości modu Si  $E_2^{\text{high}}$  (*rys. 8.5a, 8.5b*) nie zmieniają się istotnie, podczas gdy dla modu GaN  $E_2^{\text{high}}$  (*rys. 8.5c, 8.5d*) ulegają znacznym przesunięciom.



**Rysunek 8.5.** Histogramy częstości modu  $E_2^{\text{high}}$ : a) Si dla GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) Si dla GaN/HfO<sub>2</sub>, c) GaN dla GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz d) GaN dla GaN/HfO<sub>2</sub>

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki dla częstości modu GaN  $E_2^{\text{high}}$  przeanalizowano za pomocą procedur statystycznych. Najpierw, aby zweryfikować brak istotnych statystycznie różnic między uzyskanymi wartościami w różnych seriach pomiarowych dla jednej próbki (*rys. 8.4*), przeprowadzono test *t* Welcha przy braku założenia o równości wariancji w grupach (Kassambara 2019). Z obliczeń wynika (*tab. 8.1*), że zebrane dane w obrębie próbki nie różniły się istotnie statystycznie ( $p > 0.05$ ), za wyjątkiem tych wyróżnionych na czerwono. Pomimo tego, wiedząc, że dane te uzyskano z jednej próbki, a także mając na uwadze, że test wykazał zgodność w pozostałych przypadkach, dane połączono w obrębie próbek o danych powłokach (*rys. 8.6*).

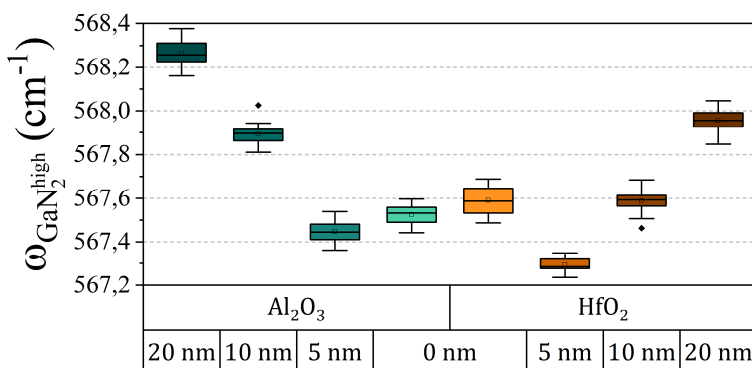
**Tabela 8.1. Test *t* Welcha równości wartości oczekiwanych dla wyników częstości modu GaN E<sub>2</sub><sup>high</sup>**

Material powłoki	Grubość powłoki [nm]	Statystyka testowa	Wartość p
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	0,15	0,88
	10	1,04	0,31
	5	-3,37	0,00
	0	1,10	0,29
HfO <sub>2</sub>	0	-2,18	0,04
	10	1,52	0,15
	10*	-1,98	0,06
	20	0,79	0,44

\*Dla próbek z powłoką HfO<sub>2</sub> o grubości 5 nm wykonano 1 serię pomiarów (rys. 4b), dlatego nie wykonano dla niej testu *t* Welcha, zaś dla próbki z powłoką o grubości 10 nm, dla której wykonano 3 serie pomiarów, wartość pierwsza odnosi się do 1 i 2 serii, a druga do 2 i 3 serii na rys. 4b

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku obu materiałów zauważono, że częstość modu była mniejsza dla próbek z powłoką o grubości 5 nm niż bez niej, a następnie rosła z grubością powłoki. W celu zweryfikowania występowania istotnych statystycznie różnic wykorzystano test ANOVA. Procedurę poprzedzono sprawdzeniem założeń o normalności rozkładu i jednorodności wariancji. Wykonany test normalności Kołmogorowa-Smirnowa (tab. 8.2) potwierdził zgodność rozkładu uzyskanych wyników z rozkładem normalnym, a test Levene'a (tab. 8.3) wykazał jednorodność wariancji.



**Rysunek 8.6.** Wykresy pudełkowe częstości modu GaN E<sub>2</sub><sup>high</sup> dla nanodrutów typu rdzeń-powłoka GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i GaN/HfO<sub>2</sub>, które scalono ze względu na materiał i nominalną grubość powłoki: 5, 10 i 20 nm

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 8.2. Test normalności Kolmogorowa-Smirnowa dla nanodrutów typu rdzeń-powłoka GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i GaN/HfO<sub>2</sub>**

Material powłoki	Grubość [nm]	Statystyka testowa	Wartość p	Decyzja
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	0,09	1,00	Brak podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu
	10	0,13	0,91	
	5	0,19	0,40	
	0	0,14	0,88	
HfO <sub>2</sub>	0	0,12	1,00	
	5	0,21	0,72	
	10	0,11	0,89	
	20	0,13	0,90	

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 8.3. Test Levene'a jednorodności wariancji przeprowadzony niezależnie dla nanodrutów typu rdzeń-powłoka GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i GaN/HfO<sub>2</sub>**

Material powłoki	Suma kwadratów	Średni kwadrat	Statystyka testowa	Wartość p
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0030	0,0010	1,10	0,35
HfO <sub>2</sub>	0,0051	0,0017	1,80	0,15

Źródło: Opracowanie własne

Uzyskane w teście ANOVA wartości  $p = 1,74 \times 10^{-62}$  dla nanodrutów GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz  $p = 2,13 \times 10^{-47}$  dla nanodrutów GaN/HfO<sub>2</sub> potwierdziły występowanie istotnych statystycznie różnic częstości modu GaN E<sub>2</sub><sup>high</sup> dla nanodrutów pokrytych powłokami o danym materiale. W celu dokładnego stwierdzenia, pomiędzy którymi parami próbek różniących się grubościami występują istotne statystycznie różnice, wykonano testy *post hoc* (tab. 8.4), które przeprowadza się jako kolejny krok analizy wariancji (Graczyk-Kucharska i in. 2022). Potwierdzono tym sposobem występowanie istotnych statystycznie różnic, za wyjątkiem pary próbek z powłoką HfO<sub>2</sub> o grubościach 10 i 0 nm. Brak różnic może tłumaczyć niemonotoniczną zależność między grubością powłoki a częstością modu GaN E<sub>2</sub><sup>high</sup> (rys. 8.6), gdzie wartość ta maleje dla powłoki o grubości 5 nm, a następnie rośnie wraz z grubością powłok, co może wynikać z różnych mechanizmów, które wpływają na wartość  $\omega$ , takich jak odkształcenia sieci krystalicznej czy obecność międzywarstwy rdzeń-powłoka. Czynniki te w przypadku powłoki HfO<sub>2</sub> o grubości 10 nm mogą wzajemnie się znosić.

Znaczenie przedstawionego wnioskowania statystycznego można dodatkowo zauważyć, analizując rachunek niepewności. W sytuacji pojedynczego pomiaru (rys. 8.2) wyznaczone częstości obarczone są przede wszystkim niepewnością standardową typu B ( $u_B$ ), to jest niepewnością szacowania. Dla układu Ramana T64000 Horiba-Jobin-Yvon Raman wynika ona z rozdzielczości spektralnej  $\Delta_p \omega$

równiej 0,5 cm<sup>-1</sup>, stąd sama niepewność wynosi 0,29 cm<sup>-1</sup>, zgodnie ze wzorem (Joint Committee for Guides in Metrology 2008):

$$u_B(\omega) \equiv \sqrt{\frac{(\Delta_p \omega)^2}{3}}$$

**Tabela 8.4. Testy post hoc z poprawką Bonferroniego częstości modu GaN E<sub>2</sub><sup>high</sup> dla próbek nanodrutów typu rdzeń-powłoka GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i GaN/HfO<sub>2</sub>**

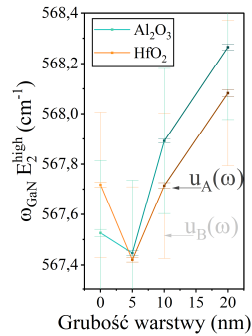
Materiał powłoki	Grubość powłoki próbki		Różnica średnich	Błąd standardowy	Statystyka testowa	Wartość p
	#1	#2				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	0	-0,08	0,016	-4,96	2,51E-05
	10	0	0,37	0,016	22,83	5,49E-35
	10	5	0,45	0,016	27,79	8,70E-41
	20	0	0,74	0,016	46,12	1,51E-56
	20	5	0,82	0,016	51,08	8,18E-60
	20	10	0,37	0,016	23,29	1,48E-35
HfO <sub>2</sub>	5	0	-0,30	0,020	-15,02	1,14E-23
	10	0	0,00	0,015	-0,23	1
	10	5	0,29	0,019	15,75	7,33E-25
	20	0	0,37	0,016	22,62	1,02E-34
	20	5	0,66	0,020	33,49	1,78E-46
	20	10	0,37	0,015	25,01	1,22E-37

Źródło: Opracowanie własne

Wykonanie wielokrotnych pomiarów daje możliwość wyznaczenia niepewności standardowej typu A ( $u_A$ ), czyli statystycznej, korzystając ze wzoru (Joint Committee for Guides in Metrology 2008):

$$u_A(\omega) \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i - \bar{\omega})^2}{n(n-1)}}$$

gdzie  $n$  – liczba pomiarów,  $\omega_i$  – wartość częstości modu GaN E<sub>2</sub><sup>high</sup> dla  $i$ -tego pomiaru,  $\bar{\omega}$  – średnia wartość częstości modu GaN E<sub>2</sub><sup>high</sup>. Obie niepewności naniesiono na wykres wraz ze średnimi wartościami uzyskanymi z pomiarów (rys. 8.7). Różnica w wartości niepewności odzwierciedla, jak za pomocą analizy statystycznej można było wykazać istotne różnice między pomiarami.



**Rysunek 8.7.** Zależność wartości częstości modu GaN  $E_2^{\text{high}}$  dla próbek nanodrutów typu rdzeń-powłoka GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i GaN/HfO<sub>2</sub> z zaznaczonymi niepewnościami standardowymi typu A i B

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

W niniejszym rozdziale poddano analizie statystycznej wyniki pomiarów ramanowskich, przeprowadzonych dla nanodrutów GaN z powłokami z szeroko-przerwowych tlenków Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i HfO<sub>2</sub>. Badane próbki różniły się grubościami powłok tlenkowych (5 nm, 10 nm i 20 nm), co potwierdziły badania z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej. Pokazano wpływ zastosowanej powłoki pokrywającej nanodrut na dynamikę ich sieci krystalicznej, a w szczególności na zmianę częstości jej drgań. Zaobserwowano nietrywialną zależność pomiędzy tą wartością a grubością nanoszonych powłok. Takie rezultaty skłaniają tym samym do dalszych badań tego typu struktur i określania przyczyny obserwowanych zmian. Badania analizowanych nanodrutów powinny objąć zarówno pomiary strukturalne, np. dyfrakcję rentgenowską, jak i pomiary optyczne, które pozwolą zbadać wpływ składu i grubości powłok na właściwości nanodrutów. Co ważne, w pracy pokazano, że świadome korzystanie z procedur statystycznych otwiera możliwości badania subtelnych zmian w badanych wielkościach fizycznych (tutaj częstościach modów fononowych), które pojawiają się podczas pomiarów nanostruktur. Dlatego wnioskowanie statystyczne powinno być powszechne w trakcie pomiarów eksperymentalnych, zarówno do weryfikacji poprawności zbieranych danych, zapewniania ich odtwarzalności, jak i zwiększania wiarygodności otrzymanych wyników.

## Podziękowanie

*Praca naukowa dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Perły nauki” nr projektu PN/01/0123/2022 kwota dofinansowania 215 600 zł całkowita wartość projektu 215 600 zł. Praca*

częściowo zrealizowana w ramach grantu naukowego NCN 2021/43/D/ST7/01936 oraz 2022/45/B/ST5/02876.

Podziękowania dla mgr Anny Reszki za wykonanie zdjęć próbek techniką skanin-gowej mikroskopii elektronowej, a także mgr. Tomasza Stachurskiego za konsultacje statystyczne.

## Literatura

1. Adhikari S., Kremer F., Lysevych M., Jagadish C., Tan H.H. (2023), *Core-Shell GaN/AlGaIn Nanowires Grown by Selective Area Epitaxy*, „Nanoscale Horizons”, 8, s. 530-542.
2. Chang H.-J., Huang K.-C., Wu C.-H. (2006), *Determination of Sample Size in Using Central Limit Theorem for Weibull Distribution*, „International Journal of Information and Management Sciences”, 17, 3, s. 153-174.
3. Cialla-May D., Schmitt M., Popp J. (2019), *Theoretical Principles of Raman Spectroscopy*, „Physical Sciences Reviews”, 4, 6, s. 1-9.
4. Davydov V.Yu., Kitaev Yu.E., Goncharuk I.N., Smirnov A.N., Graul J., Semchinova O., Uffmann D., Smirnov M.B., Mirgorodsky A.P., Evarestov R.A. (1998), *Phonon Dispersion and Raman Scattering in Hexagonal GaN and AlN*, „Physical Review B”, 58(19), s. 12899-12907.
5. Falgayrac G., Vitale R., Delannoy Y., Behal H., Penel G., Duponchel L., Colard T. (2022), *Critical Aspects of Raman Spectroscopy as a Tool for Postmortem Interval Estimation*, „Talanta”, 249, 123589.
6. Graczyk-Kucharska M., Stachurski T., Woźna D. (2022), *Determinanty zainteresowania ofertami pracy*, [w:] Szafrński M., Goliński M., Graczyk-Kucharska M., Spychała M. (red.), *Zarządzanie kompetencjami wspomagane metodami statystycznymi*, s. 86-115, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
7. Iatsunskiy I., Jurga S., Smyntyna V., Pavlenko M., Myndrul V., Zaleska A. (2014), *Raman Spectroscopy of Nanostructured Silicon Fabricated by Metal-Assisted Chemical Etching*, [w:] Gorecki C., Asundi A.K., Osten W. (red.), *Proceedings Optical Micro- and Nanometrology V*, 913217.
8. Joint Committee for Guides in Metrology (2008), *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, [https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf) (dostęp: 27.09.2023).
9. Kassambara A. (2019), *Practical Statistics in R for Comparing Groups: Numerical Variables*, [https://www.datanovia.com/en/wp-content/uploads/dn-tutorials/book-preview/r-statistics-for-comparing-means\\_preview.pdf](https://www.datanovia.com/en/wp-content/uploads/dn-tutorials/book-preview/r-statistics-for-comparing-means_preview.pdf) (dostęp: 27.09.2023).
10. Klosek K., Sobanska M., Tchutchulashvili G., Zytikiewicz Z.R., Teisseyre H., Klopotoski L. (2013), *Optimization of Nitrogen Plasma Source Parameters by Measurements of Emitted Light Intensity for Growth of GaN by Molecular Beam Epitaxy*, „Thin Solid Films”, 534, s. 107-110.
11. Lee M.-L., Wang S.-S., Yeh Y.-H., Liao P.-H., Sheu J.-K. (2019), *Light-Emitting Diodes with Surface Gallium Nitride P – N Homostructure Formed by Selective Area Regrowth*, „Scientific Reports”, 9, 1, 3243.
12. Loken E., Gelman A. (2017), *Measurement Error and the Replication Crisis*, „Science” 355, 6325, s. 584-585.
13. Mangano Clavero I., Margenfeld C., Quatuor J., Spende H., Peters L., Schwarz U.T., Waag A. (2022), *Gradients in Three-Dimensional Core-Shell GaN/InGaIn Structures: Optimization and Physical Limitations*, „ACS Applied Materials & Interfaces”, 14, 7, s. 9272-9280.

14. Nahhas A.M. (2020), *Review of GaN Nanowires Based Sensors*, „American Journal of Nanomaterials”, 8, 1, s. 32-47.
15. Sobanska M., Dubrovskii V.G., Tchutchulashvili G., Klošek K., Zytkeiwicz Z.R. (2016), *Analysis of Incubation Times for the Self-Induced Formation of GaN Nanowires: Influence of the Substrate on the Nucleation Mechanism*, „Crystal Growth Design”, 16, 12, s. 7205-7211.
16. Quan L.N., Kang J., Ning C.-Z., Yang P. (2019), *Nanowires for Photonics*, „Chemical Reviews”, 119, 15, s. 9153-9169.
17. Zielony E., Szymon R., Wierzbicka A., Reszka A., Sobanska M., Pervez W., Zytkeiwicz Z.R. (2022), *Strain and Lattice Vibration Mechanisms in GaN-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N Nanowire Structures on Si Substrate*, „Applied Surface Science”, 588, 152901.

## Influence of HfO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Shells on Lattice Dynamics of GaN Nanowires.

### Statistical Analysis of the Results of Raman Spectroscopy

**Abstract:** The development of nanotechnology of the III-V compounds semiconductors provides new opportunities for producing highly-efficient optoelectronic devices that operate in the UV light range. One example is the core-shell nanowires based on gallium nitride (GaN), which have high surface-to-volume ratio and high-quality crystalline structure. However, characterization of nanostructures requires the adaptation of appropriate techniques, which are limited by external factors. To overcome these limitations, data obtained from measurements must be analysed with methods which confirm statistically significant differences, as well as ensure the reproducibility of results. This chapter proposes using statistical inference methods to verify statistically significant differences in the frequencies of phonon excitations, determined with Raman spectra measurements. Raman measurements and data analysis were carried out for a series of GaN nanowires of GaN coated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or HfO<sub>2</sub> shells, obtained on a silicon substrate. The analysis of phonon excitation frequencies, especially the GaN E<sub>2</sub><sup>high</sup> mode, confirmed statistically significant differences between samples. The influence of the shells on the structural properties and crystal lattice dynamics of nanowires was also confirmed. Moreover, the study shows that using a statistical approach in the analysis of Raman results significantly improves their reliability.

**Keywords:** core-shell, gallium nitride, nanowires, Raman spectroscopy, scanning electron microscopy, statistical analysis

## Rozdział 9

# Remont betonów części podwodnej stopnia wodnego<sup>1</sup>

Agnieszka Gałuszka, Wacław Brachaczek

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej  
Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska

**Streszczenie:** W rozdziale scharakteryzowano budowle hydrotechniczne oraz omówiono czynniki stwarzające zagrożenie dla ich bezpieczeństwa, metodykę i ogólny zakres działań diagnostycznych niezbędnych dla opracowania oceny stanu technicznego i przykładowe działania naprawcze. Przedstawiono badania oraz rozwiązania technologiczne naprawy powierzchni betonowej, przeprowadzonej w części podwodnej budowli hydrotechnicznej bez konieczności wyłączenia obiektu z eksploatacji. Opisano specyfikę, zasadność doboru technologii oraz korzystne właściwości samozagęszczalnego betonu układanego pod wodą, na przykładzie realizacji prac budowlanych na jednym ze stopni wodnych w południowej Polsce.

**Słowa kluczowe:** beton, budownictwo, hydrotechnika, podwodny, remont, stopień wodny

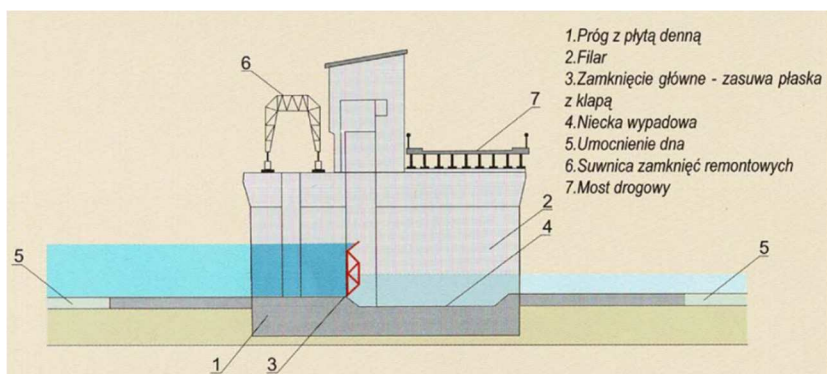
## Wprowadzenie

Budowle hydrotechniczne wraz z urządzeniami i instalacjami technicznymi służą prawidłowej gospodarce wodnej, kształtują zasoby wodne oraz sposób ich wykorzystania i magazynowania. Chronią przed niszczącą siłą wody. Stopień wodny, jako przykład budowli hydrotechnicznej, składa się z budowli piętrzącej oraz budowli upustowej. Może być uzupełniony np. o elektrownię wodną lub służę żegludową. Elementami stopnia wodnego są m.in. filary rozdzielające, przyczółki, przepławki, śluzy dla ryb i mury oporowe.

---

<sup>1</sup> W rozdziale nie została podana nazwa stopnia wodnego oraz jego dokładna lokalizacja w związku publikacją danych wrażliwych oraz z wprowadzeniem na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej drugiego stopnia zagrożenia terrorystycznego i obowiązku rygorystycznego przestrzegania procedur na występujące zagrożenia.





**Rysunek 9.1. Schematyczny przekrój jazu stopnia wodnego**

Źródło: (PN-EN 12350-2:2019-07 wersja polska)

Celem powstania omawianego stopnia wodnego była również konieczność powstrzymania erozji dna Wisły. Uszkodzenia te stanowią potencjalne zagrożenie dla istniejących fundamentów sąsiadujących stopni oraz bulwarów nadwodnych. Działanie bariery jest stale kontrolowane i dostosowane do bieżących potrzeb, np. czasowego obniżenia poziomu wody.

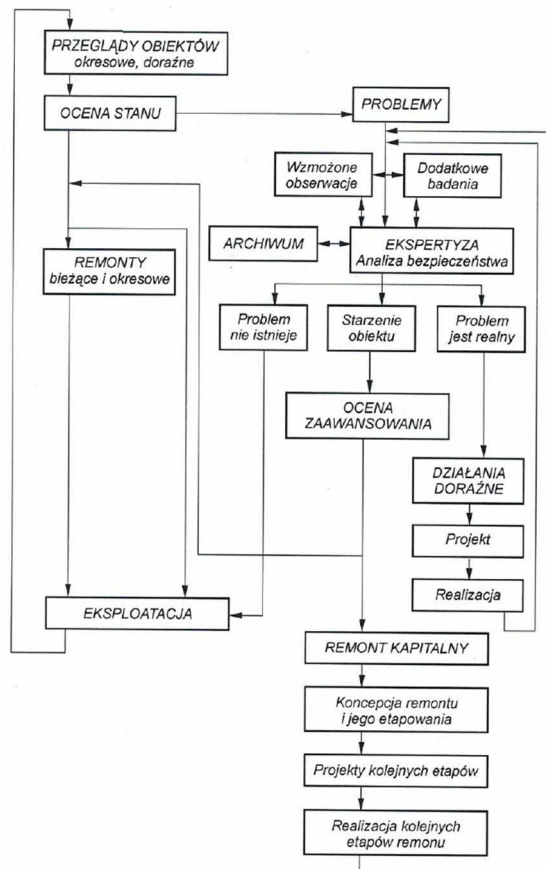
### Czynniki wpływające na trwałość budowli wodnych

Elementy budowli hydrotechnicznych po zakończeniu budowy i rozpoczęciu eksploatacji w większości pozostają w stałym kontakcie z wodą, co z pewnością dostarcza wiele trudności w zachowaniu należytej trwałości obiektu. Trwałość jest cechą konstrukcji wyrażającą jej zdolność do zachowania w założonym czasie użytkowania stateczności i nośności, bez wyraźnego obniżenia właściwości użytkowych. Wraz z wydłużającym się okresem eksploatacji postępują procesy reologiczne i starzeniowe. W przypadku budowli wodnych istotne znaczenie mają okresy wezbrań i przepuszczania przez budowlę piętrząca wód wielkich. Często mają one charakter zdarzeń ekstremalnych o skutkach katastrofalnych. Piętrzenie wody powoduje filtrację poprzez korpus i podłoże budowli, jednak przez budowlę betonową jest ona śladowa i ogranicza się do przepuszczalnych fragmentów obiektu, takich jak dylatacje, szwy robocze, styk podłoża i betonu. Woda w podłożu powoduje oddziaływanie ciśnienia na podstawę budowli betonowej, pogarszając jej stateczność. Trwałość budowli hydrotechnicznych z betonu jest uwarunkowana przez:

- karbonatację betonu w konstrukcjach żelbetowych,
- przebieg korozji chemicznej betonu w przypadku ekspozycji na czynniki agresywne,
- destrukcję mrozową wywołaną przemianym zamrażaniem i odmrażaniem,
- erozję spowodowaną przez bezpośrednie oddziaływanie płynącej wody (kawitacja) i niesionego przez nią rumowiska (ścieranie posuwisto-udarowe) oraz lodu.

Pogorszenie się stanu betonu może również być wywołane nadzwyczajnymi naprężeniami związanymi z przeciążeniem budowli. Szczególnym zagrożeniem dla budowli piętrzących wodę jest erozja dna cieku poniżej przekroju piętrzenia. Powoduje ona obniżenie się dna rzeki w dolnym stanowisku obiektu i obniżanie się rzędnych zwierciadła wody dolnej przy tych samych przepływach, a następnie pogorszenie warunków stateczności obiektu piętrzącego wodę.

Budowla piętrząca powinna być wyposażona w stosowne dla jej klasy urządzenia pomiarowo-kontrolne. Ocena stanu technicznego i bezpieczeństwa obejmuje pomiary wraz z analizą, jak również bieżące obserwacje i wizje lokalne. Dla większości budowli piętrzących nie została określona częstotliwość wykonywania ocen stanu bezpieczeństwa. Ustawa *Prawo wodne* również tego nie precyzuje. Powinno się stosować przyjęte schematy następstw dotyczące m.in. oceny stanu technicznego, projektów oraz remontów (rys. 9.2).



**Rysunek 9.2.** Zalecany schemat postępowania przy utrzymaniu i remontach obiektów hydrotechnicznych

Źródło: (Klędyński 2006)

## Założenia projektowe

Przeegląd podwodny omawianego stopnia wodnego w południowej Polsce wykazał ubytki w betonach stóp filarów oraz płyt dennych jazu o głębokości do 15 cm wraz z wystającym zbrojeniem. Zanotowano znaczne ubytki w betonowych umocnieniach dna oraz liczne zapadnięte i podmyte płyty.

Podmycia i zapadnięcia są skutkiem przepływów filtracyjnych. Stwierdzono uszkodzenia dylatacji oraz betonowych płyt w jej rejonie. Płyty na stanowisku dolnym oraz górnym były wyraźnie sklawiszowane.

Projektowane naprawy obejmowały m.in. remont betonów przyczółków, filarów, klawiszujących płyt wraz z ich częściową odbudową oraz betonów płyt dennych jazu wraz z uszczelnieniem dylatacji. Wszystkie prace remontowe dotyczące betonowania były wykonane technikami podwodnymi ze względu na potrzebę utrzymania ciągłości i gotowości pracy obiektu. Prace przygotowawcze do betonowania sklawiszowanych płyt (wraz z ich częściową odbudową) obejmowały m.in.:

- usunięcie osadów i namulów,
- frezowanie do równej powierzchni,
- osadzenie kotew,
- osadzenie siatki zbrojeniowej,
- szalowanie płyt (betonowanie było wykonywane każdorazowo na co drugiej płycie),
- betonowanie podwodne (spełniające wymagania klasy C30/37),
- wykonanie uszczelnienia dylatacji,
- wykonanie iniekcji wypełniająco-doszczelniającej przy użyciu iniektu cementowo-bentonitowego (przez wcześniej zainstalowane rury konduktorowe o dł. 6 m), celem wypełnienia pustek i rozluźnień pod płytami.

Klasa ekspozycji betonu jest istotną informacją o oddziaływaniu czynników środowiskowych na element betonowy. Określają je Polskie Normy, m.in.: PN-EN 206-1:2003 wersja polska, PN-B-01801:1985 wersja polska. Zagrożenia środowiskowe wpływające na klasę ekspozycji to:

- agresywność wody,
- agresywność środków odladzających,
- chlorki wody morskiej,
- chlorki nie pochodzące z wody morskiej,
- karbonatyzacja,
- agresywność chemiczna.

Biorąc pod uwagę technologię układania, badania i założenia, ustalono, że mieszanka betonowa do naprawy płyt dennych powinna charakteryzować się następującymi parametrami:

- klasa ekspozycji XC2 (mokre, sporadycznie suche części konstrukcji hydrotechnicznych),
- klasa wytrzymałości na ściskanie min. C30/37,

- konsystencja F5 (średnica rozpląwu 560-620 mm),
- klasa wytrzymałości cementu 42,5 N,
- W/C (woda/cement) = 0,4.

## Diagnostyka uszkodzeń betonowych budowli hydrotechnicznych

Istotnym elementem kontroli stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznej są regularne oględziny. Stwierdzone, udokumentowane nieprawidłowości mogą być przyczyną pogorszenia stanu technicznego i bezpieczeństwa. Z uwagi na szerokie spektrum badań i analiz dotyczących różnych typów obiektów wodnych, omówione zostaną wybrane metody, które dotyczą części betonowych budowli piętrzących (stanu powierzchni betonu, przecieków i odkształceń).

Rysy termiczne, nieuszczelnione lub nieprawidłowo uszczelnione szwy robocze i szczeliny dylatacyjne są głównym źródłem przecieków. Filtrująca woda powoduje wymywanie związków wapnia (uwidocznia się to poprzez białe nacieki), przyczyniając się do korozji betonu i utraty jego wytrzymałości.

Jedną z metod diagnostyki przemieszczeń i uszkodzeń są okresowe pomiary sieci punktów reprezentujących dany obiekt w stosunku do przyjętego układu odniesienia. Przemieszczenia, obok zjawisk filtracyjnych, są podstawowymi informacjami, jakie analizuje się i uwzględnia w procesie interpretacji i w ocenie stanu technicznego obiektu hydrotechnicznego.

Kolejną metodą definiowania stanu technicznego obiektu wodnego są pomiary batymetryczne. Pomiary prowadzone za pomocą sondy jednowiązkowej połączonej z odbiornikiem GPS na górnym stanowisku pozwalają na wyznaczenie pojemności zbiornika, wskazanie stopnia zamulenia i abrazji brzegów. Pomiary dolnego stanowiska wykorzystywane są przede wszystkim do badania nasilenia procesów erozji i stopnia wymycia, a następnie do identyfikacji uszkodzenia, np. elementów konstrukcyjnych niecki wypadowej.

Okresowo należy kontrolować wytrzymałość betonu elementów budowli hydrotechnicznych. Analiza polega na ocenie, czy nie zostały przekroczone wartości dopuszczalne. Istnieją badania bezinwazyjne (np. młotek Schmidta, badania ultradźwiękowe) oraz inwazyjne, bazujące na pobraniu i analizie odwiertów rdzeniowych. Wynik jakości badania betonu powinien być opracowany osobno dla każdego elementu i odniesiony do wartości projektowych.

## Receptura i badania

Przedmiotem omawianej naprawy na stopniu wodnym są betonowe płyty denne. Do ich wykonania zastosowano beton podwodny. Recepturę i technologię układania pod wodą opracowano na podstawie ścisłej współpracy z laboratorium budowlanym oraz uprawnionymi i doświadczonymi inżynierami.

Przed przystąpieniem do zasadniczych prac związanych z układaniem mieszanki betonowej wykonano doświadczalne betonowanie, dające obraz przyjętego rozwiązania w warunkach rzeczywistych. Pojemnik został zanurzony w wodzie w miejscu i na głębokości docelowych prac. Po upływie 28 dni pojemnik został wynurzony oraz pobrano odwierty rdzeniowe  $\varnothing 100$  mm do badań. Odwierty pobierano techniką wiercenia koronowym wiertłem diamentowym. W ten sposób otrzymywano rdzenie betonowe o średnicy 100 mm. Do badań wytrzymałości na ściskanie, z pobranych rdzeni wycinano walce o wysokości równej ich średnicy. Przed badaniem przeciwległe płaszczyzny po cięciu szlifowano w celu uzyskania gładkich i równoległych płaszczyzn. Tak przygotowane próbki ściskano w maszynie wytrzymałościowej i oznaczano wartość siły niszczącej. Badania wykonano zgodnie z normą PN-EN 12504-1:2019-08 wersja polska. Na próbkach przeznaczonych do badań wytrzymałości na ściskanie, przed ich zniszczeniem, określono gęstość objętościową w stanie wilgotności naturalnej (rzeczywistej). Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że beton spełnił wymagania dla klasy wytrzymałości C40/50, zgodnie z normą PN-EN 206+A1:2016-12 wersja angielska.

Po wykonaniu prac przygotowawczych rozpoczęto betonowanie zasadnicze płyt dennych. Pod wodą ułożono około  $570 \text{ m}^3$  mieszanki betonowej. Proces ten był kontrolowany i wykonywany przez zespół nurków zawodowych.

Założone własności technologiczne sprawdzone podczas betonowania doświadczalnego wykazały wysoką zgodność z przebadanymi próbkami z betonowania zasadniczego. Badania wykazały, że spełnione zostały założenia projektowe. Beton spełnia minimalne wymagania klasy C30/37 oraz wykazuje odpowiednią trwałość ze względu na eksploatację w warunkach wodnych.



**Rysunek 9.3.** Betonowanie zasadnicze metodą kontraktor

Źródło: Zdjęcia udostępnione przez Wykonawcę prac

## Charakterystyka betonu podwodnego

Technologia betonowania z zastosowaniem betonów podwodnych polega na układaniu mieszanki betonowej pod poziomem lustra wody stojącej lub płynącej. Beton podwodny charakteryzuje się nowoczesną domieszką stabilizującą, zapobiegającą wymywaniu spoiwa (ang. *antiwashout admixture*), na bazie celulozy i akrylu. Domieszki i dodatki sprawiają, że realizacja prac budowlanych nie wymaga izolowania od środowiska wodnego. Mieszanka ta musi charakteryzować się również zdolnością do samozagęszczania, samopoziomowania i odpowietrzania oraz stałością w czasie transportu i układania. Dobrze współpracuje z superplastyfikatorami. Jednym z nich może być domieszka silnie redukująca wodę HRWR (ang. *high-range water-reducing admixture*). Stosowanie razem AWA i HRWR pozwala uzyskać beton o wysokiej wytrzymałości oraz korzystnie wpływa na właściwości reologiczne i jakość stwardniałego wyrobu.

Zastosowanie dodatków podwodnych nie powinno zwalniać wykonawcy od stosowania podstawowych reguł betonowania podwodnego. Istnieje kilka metod prawidłowego układania mieszanki betonowej. Przykładowo metoda kontraktor (przedstawiona na rys. 9.3) polega na wprowadzeniu rury wlewowej (tzw. kontraktora) zagłębionej w mieszance betonowej i doprowadzonej do dna wykopu. Jej rolą jest zapobieganie wypłukaniu, zanieczyszczeniu i segregacji mieszanki betonowej. Metoda kontraktor zapewnia ruch mieszanki betonowej w rurze wlewowej z właściwą prędkością i w odpowiednich warunkach. Inna z metod, bezpośrednia, polega na dostarczeniu strumienia mieszanki za pomocą pomp do szalunku, która następnie wypiera znajdującą się tam wodę.

Wytrzymałość na ściskanie betonu podwodnego może osiągać parametry zbliżone do betonu zwykłego (nadwodnego). Ma na nią wpływ przede wszystkim wartość współczynnika W/C (woda/cement) oraz wykorzystanie domieszek. Im mniejszy współczynnik przy zachowaniu płynności mieszanki, tym większa wytrzymałość. Zwiększenie ilości domieszki AWA jest czynnikiem powodującym znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie w środowisku wodnym. Jej ilość w danym zarobie nie może przekroczyć 2% masy cementu.

Czas wiązania betonu podwodnego jest ściśle związany z ilością ciepła w procesie hydratacji. Ponieważ istnieje ryzyko skurczu, ważne jest, aby był on możliwie jak najkrótszy. Skrócenie tego czasu można uzyskać poprzez dobranie odpowiedniego cementu lub dodatku popiołów lotnych. Domieszka AWA również ma wpływ na czas wiązania, opóźniając jego start o 2-4 h i przedłużenie czasu wydzielania ciepła hydratacji.

Charakterystyką betonu podwodnego jest zdolność do samozagęszczania mimo braku możliwości wibrowania. Optymalna konsystencja zapewnia dużą odporność na wypłukanie i segregację elementów. Mieszankę powinna cechować zdolność do samoczynnego płynięcia oraz do szczelnego otulenia zbrojenia i poprawnego wypełnienia deskowania.



## Podsumowanie

Specyfika budowli hydrotechnicznych sprawia, że szczególny nacisk powinien być kładziony na ich stan techniczny monitorowany w stanie rzeczywistym oraz bezpieczeństwo. Aparatura kontrolno-pomiarowa i systemy analizy danych dają możliwość przetworzenia, analizy i interpretacji informacji źródłowych, które wzmacnia postęp techniczny w zakresie realizacji napraw i remontów. Wprowadzenie do powszechnego użytku domieszek do betonu i plastyfikatorów poszerza obszar działania, ułatwia pracę wykonawców i obniża koszty realizacji. Beton podwodny znajduje wykorzystanie nie tylko w remontach i budowach obiektów hydrotechnicznych, ale też np. obiektów mostowych. Przeprowadzone badania wskazują, że właściwości betonu układanego pod wodą spełniają założenia projektowe oraz wykazują satysfakcjonujące właściwości. Atutem tej technologii jest również brak konieczności wstrzymywania pracy obiektu.

Problematyka remontów obiektów hydrotechnicznych jest bardzo złożona i rozbudowana. Tematyka innowacyjnych technologii jest twórcza i rozwojowa. Postęp inżynierii materiałowej pozwala odkrywać nowe obszary działania i skutecznie zastępować dotychczas wybierane rozwiązania, choć często może wydawać się to wbrew logice. Determinuje to wieloletnią trwałość i bezpieczeństwo wszelakich budowli hydrotechnicznych.

## Literatura

4. Brzozowski P. (2011), *Możliwości wykorzystania popiołów lotnych ze spalania w kotłach fluidalnych do betonów układanych pod wodą*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2, 1, s. 1-11.
5. Depczyński W., Szamowski A. (1999), *Budowle i zbiorniki wodne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
6. Flis I., Horszczaruk E., *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów podwodnych*, [https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2006/flis\\_horszczaruk.pdf](https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2006/flis_horszczaruk.pdf) (dostęp: 11.04.2023).
7. Horszczaruk E., Brzozowski P. (2013), *Wpływ przygotowania powierzchni na przyczepność betonów naprawczych układanych pod wodą*, „Materiały Budowlane”, 9, 493, s. 14-16.
8. Horszczaruk E., Flis I., Wąż S. (2004), *Betony podwodne – właściwości, projektowanie, technologie. Materiały konferencji „Dni Betonu 2004”*, Wisła.
9. IMGW (2020), *Wytyczne wykonywania badań, pomiarów, ocen stanu technicznego oraz ocen stanu bezpieczeństwa budowli piętrzących wodę*, <https://www.imgw.pl/sites/default/files/2021-02/wytyczne-wykonywania-badan-pomiarow-i-ocen.pdf> (dostęp: 11.04.2023).
10. Kańka S., Sołtysik R. (2009), *Przykłady napraw i wzmocnień budowli hydrotechnicznych wykonywanych w technologii betonowania pod wodą*, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane, Międzyzdroje.
11. Kańka S., Sołtysik R. (2010), *Przykłady zastosowania technologii betonowania pod wodą w remontach budowli hydrotechnicznych*, „Przegląd Budowlany”, 7-8, s. 54-57.
12. Kańka S., Sołtysik R. (2011), *Nietypowa realizacja fundamentu pod wodą*, <https://inzynier-budownictwa.pl/nietypowa-realizacja-fundamentu-pod-woda/> (dostęp: 11.04.2023).

13. Kledyński Z. (2006), *Remonty budowli wodnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
14. Kledyński Z. (2011), *Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych, cz. 1*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”, Marzec – Kwiecień, s. 54-61.
15. Kledyński Z. (2011), *Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych, cz. 2*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”, Maj – Czerwiec, s. 36-38.
16. Owsiak D. (2022), *Domieszki do betonów podwodnych*, <https://inzynierbudownictwa.pl/domieszki-do-betonow-podwodnych/> (dostęp: 11.04.2023).
17. PN-EN 12350-2:2019-07 wersja polska
18. PN-EN 12504-1:2019-08 wersja polska
19. PN-EN 206:2014-04 wersja polska
20. PN-EN 206+A1:2016-12 wersja angielska
21. Tracz T., Kańska S., Radło W. (2006), *Betonowanie Podwodne betonem samozagęszczalnym jako jeden z etapów remontu zapory w Porąbce. Materiały konferencji „Dni Betonu 2006”*, Wisła.
22. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. *Prawo wodne* (Dz.U. 2017 poz. 1566).

## Repair of Concretes of the Underwater Part of the Stage

**Abstract:** The chapter characterizes hydrotechnical structures and discusses the factors posing a threat to their safety, the methodology and the general scope of diagnostic activities necessary to develop an assessment of the technical condition and exemplary corrective actions. Research and technological solutions for the repair of the concrete surface, carried out in the underwater part of the hydrotechnical structure without the need to shut down the facility, were presented. The specificity, the validity of the selection of technology and the beneficial properties of self-compacting concrete laid under water are described, on the example of construction works on one of the stages in southern Poland.

**Keywords:** concrete, construction, hydraulic engineering, underwater, repair, stage



## Rozdział 10

# Remont przelewów powierzchniowych zapory wodnej

Jakub Francuz, Wacław Brachaczek

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej  
Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska

**Streszczenie:** Na podstawie badań laboratoryjnych odwiertów rdzeniowych i literatury dobrano oraz omówiono rozwiązania technologiczne remontu (reprofilacji) zewnętrznej warstwy przelewów powierzchniowych z uwzględnieniem rozmiaru i kształtu Zapory Porąbka. Przedstawiono historię jej powstania, zasadność budowy oraz podstawowe parametry konstrukcyjne. W rozdziale poruszono też problematykę uszkodzeń i destrukcji betonów budowli piętrzących tego typu, technologiczne aspekty trwałego połączenia starego i nowego betonu, istotę technologii betonu natryskowego (torkretu) oraz wyniki badań trwałości i wytrzymałości wybranych materiałów budowlanych

**Słowa kluczowe:** beton, hydrotechnika, przelew powierzchniowy, remont, torkret, zapora

## Wprowadzenie

Zapora wodna, jako budowla piętrząca, ma za zadanie umożliwiać stałe lub okresowe piętrzenie wód powierzchniowych ponad przyległy teren. Wraz z budowlami technicznymi służy gospodarce hydrotechnicznej do kształtowania zasobów wodnych, ich gromadzenia oraz wykorzystywania (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. *Prawo wodne*). Główne zadania zapór wodnych to:

- regulacja przepływu rzek,
- ochrona przed niszczącą siłą wody,
- magazynowanie nadmiaru wody,
- zapewnienie bezpieczeństwa w razie powodzi lub wezbrania,
- ujmowanie wód powierzchniowych i podziemnych,
- współpraca z elektrownią wodną celem wytwarzania energii elektrycznej.

Zapora Wodna Porąbka jest budowlą betonową o imponujących rozmiarach. Obiekty tego typu mają zazwyczaj kilkaset metrów długości i kilkadziesiąt wysokości. Prowadzi to do konieczności podziału na bloki i występowania dylatacji, co wiąże się z niebezpieczeństwem utraty stateczności i pogorszenia stanu

technicznego. Realizacja i utrzymanie tak skomplikowanego obiektu to duże wyzwanie pod względem konstrukcyjnym.

## Historia powstania Zapory Wodnej Porąbka

Zapora Porąbka znajduje na południu Polski – na 32. km rzeki Soły, zamykając prawie 80% jej zlewni. Soła jako jeden z większych dopływów Wisły, które prowadzą z pasma karpackiego, charakteryzuje się silnym potencjałem powodziowym i oddziaływaniem w dolinie Wisły. Nieścisłości związane z nazwą i lokalizacją spowodowane są tym, że adres kierownictwa budowy znajdował się w Porąbce, zaś obiekt hydrotechniczny powstał 200 m od jej granicy, w Międzybrodziu Bialskim. Nadzorcą inwestycji mianowano Gabriela Narutowicza, pierwszego prezydenta Polski. Zbiorniki Porąbka, Tresna i Czaniec tworzą Kaskadę Soły.

Plany budowy powstały w 1914 roku, lecz z powodu wybuchu wojny inwestycja została wstrzymana. Pierwsze prace gospodarcze, typu przygotowanie dróg dojazdowych, mostów, magazynów czy baraków robotniczych, zostały wykonane w latach 1921-1922. Zasadnicze rozpoczęcie budowy miało miejsce w 1928 roku i obejmowało przelewy boczne wyposażone w dwie sztolnie oraz przygotowanie gruntów pod fundamenty. Omawiana przegroda na rzece Sole została skonstruowana jako mur ciężki z betonu plastycznego na pokładach skalnych (Bałus i in. 2007). Jest pierwszą dużą zaporą osadzoną na fliszu karpackim, w którego skład wchodzi skały: łupki ilaste, piaskowce, a niekiedy konglomerat. Na skutek działań górotwórczych wystąpiły drobne spękania piaskowców, które zostały uszczelnione zastrzykami cementowymi, nastąpiło też sprasowanie łupków iłu, co zapewniło wysoką nieprzepuszczalność. Gwarancją szczelności jest materiał, który tworzy ściany, oraz dno basenu.



**Rysunek 10.1.** Porąbka – widok zapory, prace budowlane na koronie

Źródło: (Bałus i in. 2007)

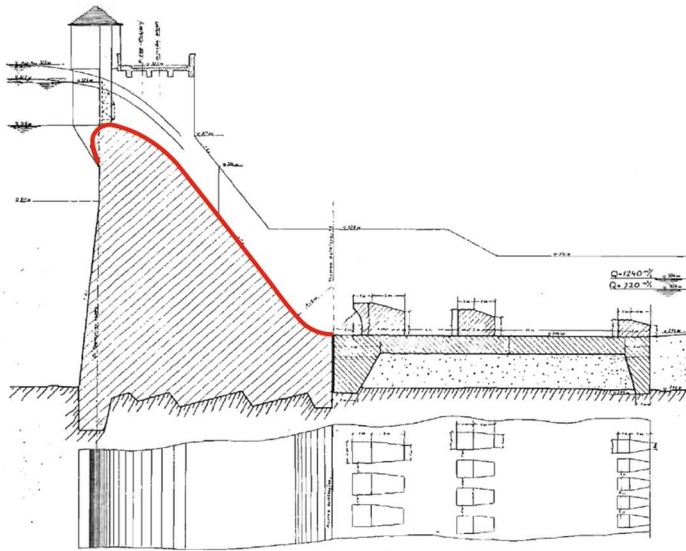
Na potrzeby budowy zapory powstało w Porąbce laboratorium budowlane oraz wytwórnia kruszywa i betonu, dla której materiał był pozyskiwany z trzech żwirowisk Soły oddalonych od 1 do 3 km. Głównymi zadaniami laboratorium były badania, ustalanie receptur mieszanek betonowych oraz kontrola betonu w czasie trwania budowy. Transport gotowej mieszanki betonowej następował specjalnie wybudowaną kolejką linową. Budowę ukończono w 1936 roku (Skrzyński 1936). Szczegółowa dokumentacja została zniszczona podczas drugiej wojny światowej.

Blisko 90-letni okres eksploatacji zbiornika Porąbka daje obraz jakości i staranności wykonania robót budowlanych, czego przykładem jest zachowanie stateczności. Większość remontów wynika z naturalnych procesów starzenia i zużycia betonu.

Warto dodać, że historii budowy, rozwiązaniom konstrukcyjnym, technologicznym i materiałowym Zapory Porąbka, został poświęcony w 1936 r. cały numer wydawanego do dziś dwumiesięcznika „Gospodarka Wodna”.

## Przelewy powierzchniowe

Pięć sekcji przelewowych (rys. 10.3a i 10.3b) ma indywidualnie zaprojektowany i dobrany kształt hydrodynamiczny, zwany krzywą Creagera (rys. 10.2). Zapewniła ona optymalne warunki przepływu wody. Przelewy w sposób bezpośredni łączą stanowisko dolne i górne zapory.

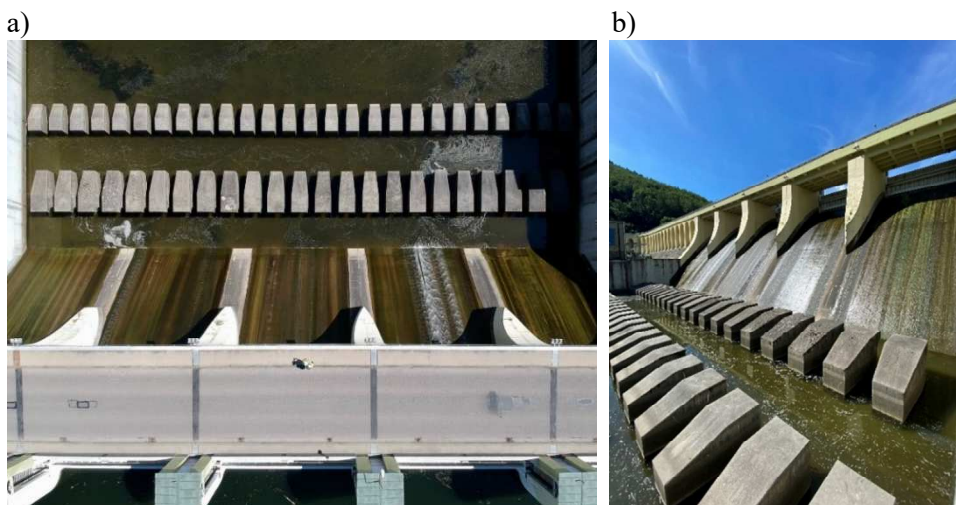


**Rysunek 10.2.** Przekrój poprzeczny zapory i podłoża do zniszczenia energii oraz rozkład szykan na podłożu

Czerwoną linią została oznaczona powierzchnia przelewu (kształt tzw. krzywa Creagera)

Źródło: (Rybczyński 1936, s. 242)

Technologia produkcji betonu, wykonania i doboru rozwiązań materiałowych była krokiem milowym w ówczesnych czasach. Na przelewach zastosowano utwardzenie betonu za pomocą szlachetnej wyprawy specjalnej o grubości 25 do 40 mm. Ułożono ją na cementowej warstwie wyrównawczej. Dobre połączenie tych warstw zostało zapewnione przez zakotwiczenie w betonie siatki Ledóchowskiego (Skrzyński 1936). Nie jest znany dokładny skład trudnościaralnej wyprawy specjalnej (utwardzonego betonu z domieszką szlachetnego kruszywa łamanego), ale potocznie została ona nazwana diamentobetonem ze względu na swoje niebywale właściwości i dobry stan po prawie 90 latach. Pod nim znajduje się porowata warstwa drenażowa o niewielkiej wytrzymałości.



**Rysunek 10.3.** Fotografia z drona. Widok na koronę zapory, przelewy powierzchniowe i szykany (a), widok na pięć sekcji przelewów powierzchniowych (b)

Źródło: Zasoby własne

## Przyczyny uszkodzeń i dotychczasowe naprawy

Pomimo wielu zabezpieczeń i starań inżynierów elementy zapory z czasem ulegały degradacji. Największe i najczęstsze uszkodzenia są pochodzenia mechanicznego, powstałe od uderzeń płynących kłód drzew, pni czy kry lodowej. Powodem przecieków mogą być rysy termiczne, rozszczelnione dylatacje oraz szczeliny pomiędzy warstwami betonu. Związki wapnia wypłukiwane przez przenikającą przez beton – filtrującą wodę są widoczne w formie białych nacieków od zewnętrznej (odpowietrznej) strony przelewu. Istotnym elementem utrzymania dobrego stanu technicznego obiektu jest kontrola stanu dylatacji i filtracji zapory. Kontrolę stopnia filtracji w betonowych zaporach wykonuje się w ramach pomiarów w galeriach drenażowych. Przecinają one drogę filtracji i nie dopuszczają do przedostania się przecieków na stronę odpowietrzną zapory. Podczas eliminacji

źródła filtracji grupa wyspecjalizowanych i uprawnionych nurków może wykonać uszczelnienie metodami podwodnymi strony odwodnej.

Pierwsze naprawy dwóch z pięciu przelewów powierzchniowych były przeprowadzone w 1994 roku. Zakres remontu obejmował około 115 m<sup>2</sup> powierzchni. Kolejny remont w latach 2002-2006 polegał na lokalnych naprawach czterech przelewów oraz całkowitym skuciu i reprofilacji przelewu piątego. Wszystkie sekcje zostały pokryte warstwą hydroizolacyjną (Pechciński 2007). Naprawy te nie dały długotrwałego efektu. Przelew piąty kwalifikuje się do ponownego odtworzenia, a przelewy 1-4 do wykonania napraw lokalnych i powierzchniowych.

Reprofilacja polega na odtworzeniu pierwotnego kształtu uszkodzonego elementu. Istnieje wiele technik reprofilacji, a dobiera się je w zależności m.in. od skomplikowania kształtu, wielkości i głębokości ubytków. Jedną z powszechnie używanych metod jest stosowanie betonu natryskowego (torkretu), czyli zawiesiny układanej przy użyciu przewodu oraz sprężonego powietrza. Dojrzała, odpowiednio dobrana do warunków środowiskowych mieszanka betonowa, na dobrze przygotowanym i oczyszczonym podłożu, charakteryzuje się wysoką wytrzymałością, szczelnością i bardzo dobrą przyczepnością do podłoża. W celu dobrania poprawnej receptury oraz oceny stanu i jakości istniejącego elementu betonowego należy pobrać próbki i wykonać badania laboratoryjne.

## Reprofilacja przelewów powierzchniowych

Mieszankę betonową podaną metodą natryskową zaprojektowano dla parametrów wytrzymałości C30/37, klasy ekspozycji XC4 (cyklicznie suche – mokre) i mrozoodporności F250. W pracach polegających na reprofilacji torkretem obowiązuje staranne oczyszczenie powierzchni naprawianej oraz nawilżenie betonu podłoża. Wilgotnościowe spęcznienie betonu pozwala częściowo uniknąć naprężeń ścinających na połączeniu betonów. Temperatura podłoża podczas natryskiwania nie powinna być niższa niż +3°C, a powietrza nie niższa niż +5°C i nie wyższa niż +25°C. W ciągu 3 dni po wykonaniu natrysku temperatura powietrza w rejonie przelewów nie powinna spaść poniżej 0°C. W przypadku torkretowania metodą suchą wilgotność powietrza nie powinna przekraczać 80%. Nieodłącznym procesem związanym z natrykiwaniem betonu jest częściowe odpadanie betonu od pokrywanej powierzchni. Ilość odbitej mieszanki zależy od wielu parametrów torkretowania, ale wynosi około 25%. Zalety reprofilacji metodą torkretowania:

- Doskonałe zagęszczenie przez dynamiczne narzucanie mieszanki, porównywalne do zagęszczenia najlepszymi metodami w betonowaniu tradycyjnym.
- Mały wskaźnik W/C, wynoszący 0,35÷0,50, dzięki czemu tworzy się zwarta i twarda warstwa betonu. Pozwala to na torkretowanie grubszych warstw oraz wpływa korzystnie na wszystkie cechy mechaniczne i użytkowe betonu.
- Korzystna struktura betonu wynikająca z mechanizmu odkładania się materiału na konstrukcji – w pierwszej kolejności na konstrukcji osadza się mleczko

cementowe, w którą z dużą energią wciskane są ziarna kruszywa, dzięki czemu niewielka ilość kruszywa ulega odbiciu.

Należy chronić materiał przed zbyt szybką utratą wody (słońce, wiatr). Zabiegi pielęgnacyjne, takie jak delikatne spryskiwanie wodą, pokrycie betonu folią, stosowanie środków pielęgnacyjnych, należy wykonywać co najmniej przez siedem dni, ale nie krócej niż do osiągnięcia przez beton wytrzymałości równej co najmniej 50% wytrzymałości projektowanej. Zakończenie pielęgnacji nie powinno odbywać się gwałtownie, aby nie spowodować gwałtownego schnięcia torkretu.

**Tabela 10.1. Zestawienie wyników badań mieszanki betonowej przeznaczonej do naniesienia metodą suchego natrysku**

Mieszanka betonowa klasy R4	
Cechy badane	Wyniki badania
Przyczepność do betonu [MPa]	2,3±0,3
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach twardnienia [MPa]	49,5±0,4
Gęstość objętościowa świeżej zaprawy [g/cm <sup>3</sup> ]	2,34±0,05

Źródło: (Karty techniczne...)

Parametry dobranej mieszanki betonowej zestawione w *tab. 10.1*, spełniają założenia projektowe. Klasa ekspozycji XC4 narzuca, aby współczynnik W/C nie przekroczył 0,5 (w wybranym materiale wynosi on 0,35±0,50).

## Podsumowanie

Kaskada Soły i towarzyszące jej obiekty hydrotechniczne mają istotny wpływ na uporządkowanie i programową organizację gospodarki wodnej w południowej Polsce. Dzięki literaturze możemy poznać bogatą historię oraz zrozumieć skalę przedsięwzięcia, jakim jest powstanie zapory, która w momencie ukończenia budowy była największą tego typu budowlą w kraju.

Każdy kolejny remont Zapory Wodnej Porąbka weryfikuje wiedzę i technologię inżynierskich działań. Przelew piąty został remontowany stosunkowo niedawno, lecz na dzień dzisiejszy wymaga pilnej rekonstrukcji. Utrata spójności warstw wykończeniowych, filtracja i uszkodzenia mechaniczne są głównymi przyczynami uszkodzeń przelewów powierzchniowych. Betony przelewów 1-4 są ocenione jako dobre, co jest dowodem profesjonalizmu i kunsztu ich wykonania w latach 30. ubiegłego wieku.

Omówiona w niniejszym rozdziale reprofilacja metodą betonowania natryskowego oraz towarzyszące jej prace budowlane dają obraz efektywnego wykorzystania nowoczesnych technologii. Dzięki technologii torkretowania uniknięto budowy skomplikowanych szalunków, co niewątpliwie jest jedną z zalet w porównaniu do innych metod układania betonu. W ciągu wielu lat rozwoju tej technologii system reprofilacji uszkodzonych elementów żelbetowych osiągnął bardzo wysoki poziom.



## Literatura

1. Bałus S., Boros-Meinike D., Drzyżdżyk W., Fiedler K., Olszewski A., Osuch-Chacińska L., Ryżak R., Stanach-Bałus K. (2007), *Kaskada Rzeki Soły. Zbiorniki Tresna, Porąbka, Czaniec*, IMGW, Warszawa.
2. Depczyński W., Szamowski A. (1999), *Budowle i zbiorniki wodne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
3. IMGW (2020), *Wytyczne wykonywania badań, pomiarów, ocen stanu technicznego oraz ocen stanu bezpieczeństwa budowli piętrzących wodę*, <https://www.imgw.pl/sites/default/files/2021-02/wytyczne-wykonywania-badan-pomiarow-i-ocen.pdf> (dostęp: 12.04.2023).
4. Jasiczak J. (2020), *Zastosowanie betonu natryskowego (torkretu) w warstwach fakturowych obiektów zabytkowych i nowo budowanych*, „Przegląd Budowlany”, 11, s. 29-32.
5. Karty techniczne i badania produktów MC-Bauchemie, *MC Torkret W 81, Colusal MK, Zentrifix KMH, MC-RIM Protect MR*.
6. Kledyński Z. (2006), *Remonty budowli wodnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
7. Kledyński Z. (2011), *Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych, cz. 1*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”, Marzec – Kwiecień, s. 54-61.
8. Kledyński Z. (2011), *Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych, cz. 2*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”, Maj – Czerwiec 2011, s. 36-38.
9. Klemczak B, Knoppik-Wróbel A., (2012), *Charakter i przyczyny powstawania wczesnych rys termiczno-skurczowych w konstrukcjach betonowych*, „Przegląd Budowlany”, 2, s. 28-36.
10. Nycz M. (2006), *70 lat temu oddano do użytku zaporę na Sole w Porąbce*, <https://zywiec.naszemiasto.pl/70-lat-temu-oddano-do-uzytku-zapore-na-sole-w-porabce/ar/c1-6553933> (dostęp: 12.04.2023).
11. Pechciński J. (2007), *Remont zapory wodnej Porąbka w latach 2002-2006*, „Gospodarka Wodna”, 10, s. 427-430.
12. Raczkiwicz W. (2012), *Skurcz betonu – cechy istotne ze względu na projektowanie konstrukcji z betonu*, „Przegląd Budowlany”, 2, s. 43-46.
13. Rybczyński M. (1936), *Przelewy i niszczenie energii na zbiorniku w Porąbce*, „Gospodarka Wodna”, 6, s. 237-242.
14. Skrzyński J. (1936), *Budowa przegrody na Sole w Porąbce*, „Gospodarka Wodna”, 6, s. 226-237.
15. Tracz T., Kańka S., Radło W. (2006) *Betonowanie podwodne betonem samozagęszczalnym jako jeden z etapów remontu zapory w Porąbce. Materiały konferencji „Dni Betonu 2006”*, Wisła.
16. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. *Prawo wodne* (Dz.U. 2017 poz. 1566).

## Repair of Surface Transfers of the Water Dam

**Abstract:** On the basis of laboratory tests of core boreholes and literature, technological solutions for the renovation (reprofiling) of the outer layer of surface weirs were selected and discussed, taking into account the size and shape of the Porąbka Dam. The history of its creation, the legitimacy of construction and basic construction parameters are presented. The chapter discusses the problems of damage and destruction of concretes of this type of damming structures, technological aspects of a permanent connection of old and new concrete, the essence of shotcrete technology (shotcrete) and the results of durability and strength tests of selected building materials.

**Keywords:** concrete, dam, hydraulic engineering, renovation, shotcrete, surface transfer

## Rozdział 11

# Wielowarstwowe wkłady ceramiczne w konstrukcji pancerzy kompozytowych

Piotr Zbies<sup>1</sup>, Piotr Liguz<sup>2</sup>, Piotr Zgliński<sup>2</sup>

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

<sup>2</sup>Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

**Streszczenie:** Częstym efektem prac nad antybalistycznymi osłonami kompozytowymi są rozwiązania wielowarstwowe. Problemem samodzielných prac badawczych w tym kierunku jest ograniczona liczba publikacji zajmujących się tematem osłon ceramicznych, które składają się z więcej niż trzech warstw. Uzupełnieniem luk literaturowych, jako kontynuacja projektu EGIDA AGH, będą prace prowadzone przez Koło Naukowe Konstrukcji Militarnych „Adamantium” w ramach projektu EGIDA AGH 2.0. Zakres badań będzie obejmował konstrukcje i właściwości aplikacyjne nowych, wielowarstwowych układów pancerzy oraz ich wpływ na obniżenie masy powierzchniowej docelowych paneli osłonowych pojazdów pancernych. Niniejszy rozdział jest wprowadzeniem teoretycznym do założeń nowego projektu koła naukowego. Omawia on teoretyczne podstawy stosowania ceramiki w pancerzach kompozytowych oraz problem doboru ceramiki w układach pięciowarstwowych i grubszych.

**Słowa kluczowe:** azotek krzemu, ochrona balistyczna, pancerz ceramiczny, tlenek glinu, węgiel boru, węgiel krzemu

## Wprowadzenie

Od kilkudziesięciu lat standardem w konstrukcji lekkich osłon kompozytowych jest stosowanie pojedynczej warstwy ceramiki, która ze względu na niższą od stali gęstość oraz wysoką twardość stała się w tej kwestii popularnym materiałem. Dzięki temu pancerze ceramiczne stanowią podstawę ochrony pojedynczych żołnierzy oraz lekko opancerzonych wozów bojowych, z myślą o odporności przed amunicją kalibru 5,56-14,5 mm.

Tendencje rozwojowe broni przeciwpancernej stosowanej w średnio opancerzonych wozach bojowych sprawiły, że stosowanie nowoczesnych osłon ceramiczno-kompozytowych o dotychczasowej konstrukcji stało się nieadekwatne.



Konflikty zbrojne prowadzone w ciągu ostatnich 30 lat, w tym obecnie trwająca wojna ukraińsko-rosyjska, pokazały, że szczególnym zagrożeniem dla bezpieczeństwa żołnierzy stała się również amunicja kalibru 23-30 mm. To poczucie zagrożenia zostało podtrzymane poprzez wdrożenie normy STANAG 4569, której najwyższe poziomy odporności antybalistycznej zakładają skuteczną ochronę przed podkalibrowymi pociskami przeciwpancernymi kalibru 25-30 mm.



**Rysunek 11.1.** Bojowy wóz piechoty BMP-2

Źródło: Wikipedia

Szczególnym problemem w projektowaniu osłon mogących sprostać takiemu wyzwaniu jest zarówno wymagana grubość warstwy ceramicznej (Rashed i in. 2015), zdolnej wytrzymać uderzenie penetratorów kinetycznych ze stopów wolframu, jak i grubość całkowita całej osłony, która może przekraczać już 100 mm. Dodatkowym problemem są obecnie tendencje rozwojowe osłon ceramiczno-kompozytowych, w których, w myśl zmniejszania masy powierzchniowej tych osłon, zrezygnowano ze stosowania warstw metalowych na rzecz oparcia się na materiałach ceramicznych i polimerowych (Płonka, Remsak 2018). W myśl tego wskazane jest zaprojektowanie osłony zawierającej co najmniej dwie warstwy ceramiczne, która będzie zdolna do zatrzymywania pocisków kalibru 20-30 mm.

Problem ten wymaga jednak teoretycznych rozważań dotyczących doboru oraz optymalizacji materiałów ceramicznych obecnych w takiej osłonie, w zależności od przeznaczenia poszczególnych warstw pancerza. Celem jest opracowanie osłony ceramiczno-kompozytowej charakteryzującej się jak najmniejszą grubością bądź masą.

## Konstrukcje badanych wielowarstwowych osłon ceramicznych

Główną cechą charakterystyczną dotychczas badanych układów pancerzy ceramiczno-kompozytowych, zawierających więcej niż jedną warstwę ceramiki

pancernej, było zastosowanie tylko jednego rodzaju materiału ceramicznego, który pełnił tę samą rolę niezależnie od położenia danej warstwy ceramicznej.

Wzorem pancerza o takiej konstrukcji jest rozwiązanie inspirowane strukturą muszli ślimaka, gdzie są obecne naprzemienne warstwy o wysokiej twardości (domyślnie ceramika) oraz o niskiej twardości (metale lekkie, polimery) (Grujicic, Snipes 2016). Przykładem takiej konstrukcji jest układ wielowarstwowy, gdzie ceramika na bazie azotku glinu (AlN) była przekładana cienkimi warstwami z folii poliuretanowej (Yadav 2003). Pancierz ceramiczny o takiej konstrukcji może się odznaczać lepszą odpornością niż osłona z jednorodną warstwą ceramiczną, aczkolwiek ważny jest dobór materiału na warstwy przejściowe pomiędzy ceramiką.

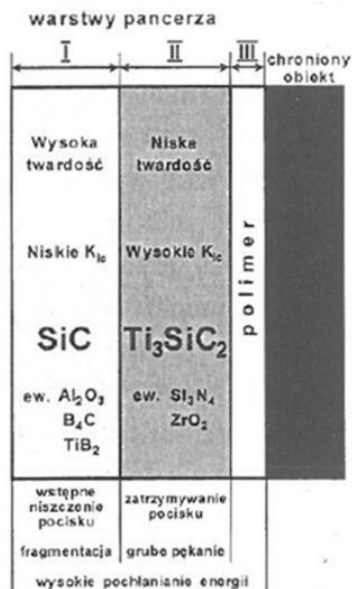
Innym przykładem podobnej do omawianych konstrukcji jest zastosowanie laminatu ceramicznego wytwarzanego metodą tape casting w celu ograniczenia procesu pęknięcia. Przykład z zastosowaniem laminatu na bazie węgliku krzemu pokazał, że jest możliwe zwiększenie odporności materiału ceramicznego na kruche pęknięcie nawet o 75% (z  $4,2 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$  do  $7,4 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ) (Hong i in. 2021). Dzięki temu możliwe było zmniejszenie strzałki ugięcia całego wkładu antybalistycznego. Natomiast zastosowanie fazy przejściowej z kompozytu SiC-BN-YAG pomiędzy warstwami SiC pozwoliło na zwiększenie wytrzymałości danego materiału na zginanie. Skutkiem ubocznym zastosowania laminatu w miejscu homogenicznego materiału było zmniejszenie twardości (z 26 GPa do 22 GPa), co w tym przypadku nie miało negatywnego wpływu na odporność antybalistyczną SiC. Badanie pokazało jednak, że większy wpływ na zachowanie materiału może mieć grubość poszczególnych warstw materiału ceramicznego.

Całkowicie innym rozwiązaniem względem wcześniej omawianych było zastosowanie kompozytu ceramiczno-polimerowego o strukturze infiltrowanej jako drugiej warstwy w wielowarstwowym pancerzu ceramiczno-kompozytowym. Zwiększenie porowatości materiału ceramicznego z 3% (MIL 1989) do 20-40% oraz wypełnienie pustych przestrzeni żywicą poliuretanową pozwoliło na ograniczenie pęknięcia przedniej warstwy ceramicznej, wykonanej z ceramiki węglkowej o niskiej porowatości. Jednocześnie wykazano nieprzydatność kompozytu ceramiczno-polimerowego jako warstwy pancerza poprzedzającej właściwą warstwę ceramiczną (Chabera i in. 2014).

## Właściwości materiałów ceramicznych

Generalną zasadą działania nowoczesnych pancerzy pasywnych kompozytowych jest oparcie się jego konstrukcji na dwóch podstawowych warstwach: warstwy zakłócającej oraz warstwy pochłaniającej. Przykłady pancerzy opierających się na takiej zasadzie działania można rozpatrywać na przestrzeni setek lat, gdzie jednym z pierwszych przykładów było noszenie wykonanego z tkaniny aketonu pod metalową zbroją (Hewitt 1855). Współczesnym przykładem zastosowania takiej koncepcji jest konstrukcja pancerza czołgu podstawowego Abrams,

gdzie rolę warstwy zakłócającej pełni niewybuchowy pancierz reaktywny (*Non-Energetic Reactive Armor* – NERA), natomiast gruba stalowa płyta pancerna obecna w głębszej części pancerza odpowiada za zatrzymywanie pocisków przeciwpancernych.



**Rysunek 11.2.** Schemat pancerza ceramicznego z warstwą zakłócającą oraz pochłaniającą

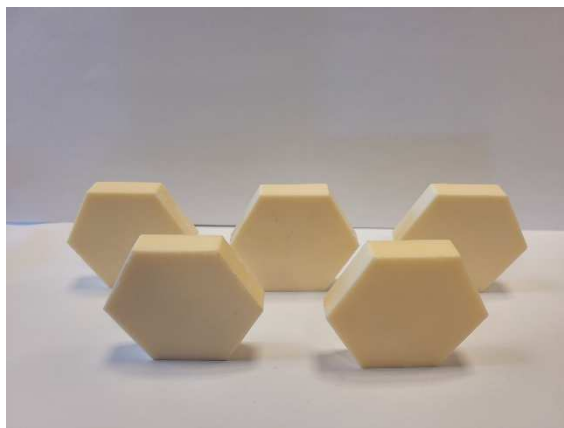
Źródło: (Łopaciński, Lis 2002)

## Warstwa zakłócająca

Przeznaczeniem warstwy zakłócającej jest zakłócenie procesu penetracji przez penetrator. Poprzez zakłócenie należy rozumieć fizyczne uszkodzenie penetratora kinetycznego, do czego może dojść poprzez jego odkształcenie plastyczne (wyboczenie, grzybkowanie) lub skruszenie, a w przypadku penetratora chemicznego – przerwanie ciągłości strumienia kumulacyjnego. Dzięki temu materiał ochronny może znacząco obniżyć przebijalność amunicji przeciwpancernej, a we współpracy z zasadniczą częścią pancerza może również prowadzić do wyhamowania penetratora. Na podstawie dotychczasowej wiedzy możemy jednoznacznie określić, że kluczowymi właściwościami mechanicznymi, na podstawie których można dobrać materiał ceramiczny pod warstwę zakłócającą, są wysoka twardość oraz wysoki moduł Younga. Twardość odpowiada za możliwość deformacji penetratora na początku procesu penetracji pancerza, jak również za minimalną prędkość uderzenia, która pozwala na przebicie osłony ceramiczno-kompozytovej (LaSalvia i in. 2009). Moduł Younga natomiast odpowiada za pochłanianie

energii kinetycznej penetratora w trakcie penetracji. Innym parametrem, na który należy zwracać uwagę, jest wytrzymałość na zginanie, która teoretycznie określa odporność antybalistyczną materiału ceramicznego względem jego gęstości (Cui i in. 2017).

Domyślnym materiałem stosowanym w pancerzach kompozytowych w roli zakłócacza jest ceramika odznaczająca się wysoką twardością (określaną w skali Vickersa lub Knoop) oraz wysoką odpornością na ścieranie (określaną w skali Mohsa). Ze względu na dostępność oraz cenę podstawowym materiałem ceramicznym stosowanym w osłonach antybalistycznych jest korund, który może być modyfikowany innymi tlenkami, takimi jak dwutlenek cyrkonu ( $ZrO_2$ ) lub tlenek magnezu ( $MgO$ ). Materiał o wysokiej czystości odznacza się modułem Younga w zakresie 350-380 GPa, twardością w zakresie 15,5-18 GPa oraz wytrzymałością na zginanie w zakresie 300-350 MPa, natomiast jako półprodukt w procesie wytwarzania aluminium jest łatwy do otrzymania, a przy tym szeroko rozpowszechniony.



**Rysunek 11.3.** Płytki heksagonalne wykonane z  $Al_2O_3$

Źródło: Opracowanie własne

W specyficznych zastosowaniach w tej roli spotykana jest również ceramika węglkowa na bazie węgliku krzemu ( $SiC$ ) lub węgliku boru ( $B_4C$ ). Kluczowa w ich przypadku jest gęstość, która jest niższa w porównaniu z korundem. Ponadto ceramika węglkowa odznacza się wyższą twardością oraz wyższym modułem Younga, co pozytywnie wpływa na jej odporność antybalistyczną. Wadą natomiast jest proces wytwarzania tych materiałów, który jest bardziej skomplikowany i kosztowny w porównaniu z ceramiką tlenkową, co ograniczyło jej rozpowszechnienie w konstrukcjach opancerzenia wozów bojowych.

Ze strony innowacyjnych materiałów ceramicznych pod tym względem można rozpatrywać kompozyty w układzie  $SiC-B_4C$ . Dzięki wysokiej twardości, wynoszącej w zakresie 25-29 GPa, oraz gęstości niższej o 15% względem węgliku krzemu,

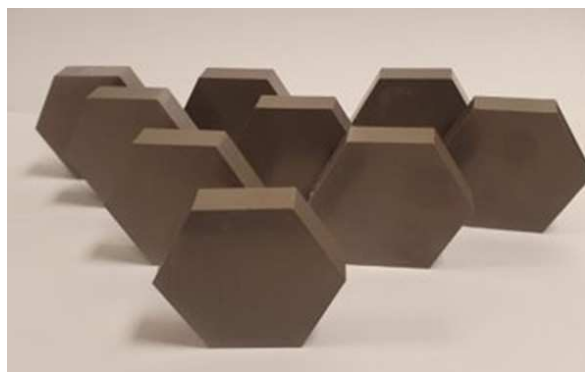
odznaczają się bardzo dobrą odpornością na ochronę przed podkalibrowymi pociskami przeciwpancernymi kalibru 30 mm (Chen i in. 2020).

## Warstwa pochłaniająca

W przypadku warstwy pochłaniającej jej podstawowym zadaniem jest pochłonięcie szczątkowej energii przebijającego pancierz penetratora. W sytuacji, gdy warstwa zakłócająca skutecznie wpłynie na ograniczenie zdolności do przebicia pancierza, zastosowanie warstwy pochłaniającej ogranicza się do przechwycenia zdeformowanego przez erozję penetratora lub jego szczątków.

Zazwyczaj do roli pochłaniacza wykorzystuje się materiały metaliczne oraz polimerowe, które są zdolne do pochłaniania energii przy jednoczesnym odkształceniu sprężysto-plastycznym materiału. W tym przypadku mamy do czynienia z materiałem ceramicznym, który odkształca się sprężysto-krucho, przez co należy brać pod uwagę inne parametry mechaniczne. Zadania, jakie ma spełniać ceramika, sprawiają, że główną rolę w określeniu jakości materiału na warstwę pochłaniającą będzie odgrywać wysoki moduł Younga oraz potencjalnie wysoka wytrzymałość na zginanie. Innym parametrem, który w tym przypadku jest wyznacznikiem jakości ceramiki, jest odporność na kruche pękanie, która nie wpływa jakkolwiek na odporność antybalistyczną ceramiki (Goh 2019), lecz ogranicza obszar zniszczonego przez kruche pękanie materiału.

Ze względu na wymaganą wysoką odporność na kruche pękanie oraz wysoką wytrzymałość na zginanie domyślnym materiałem nadającym się do roli pochłaniacza są kompozyty  $ZrO_2-Al_2O_3$ . Własne badania tego materiału określiły te dwa parametry odpowiednio na średnio  $12,8 MPa \cdot \sqrt{m}$  oraz  $1325 \pm 84 MPa$ . Poważną wadą tego materiału, która może potencjalnie wykluczyć jego zastosowanie w osłonach ceramiczno-kompozytowych, jest jego wysoka gęstość, która przekracza  $5 g/cm^3$ .



**Rysunek 11.4.** Płytki heksagonalne wykonane z kompozytu  $Al_2O_3-ZrO_2$  gat. UprYZe Shock-G

Źródło: Opracowanie własne

Alternatywnym materiałem, który może być stosowany w tej roli, jest azotek krzemu ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), który dzięki zastosowaniu dodatku YAG może się charakteryzować odpornością na kruche pękanie w okolicach  $8 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$  oraz wytrzymałością na zginanie w okolicach 700-750 MPa (Grabowy i in. 2022). Główną zaletą tego materiału jest przede wszystkim niska gęstość, która wynosi  $3,24 \text{ g/cm}^3$ . Ponadto innym materiałem, który można stosować w tej roli, jest węglik wolframu (WC), charakteryzujący się modułem Younga w okolicach 690 GPa, twardością dochodzącą do 22 GPa, odpornością na kruche pękanie w okolicach  $6,9 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$  oraz wytrzymałością na zginanie wynoszącą 1100 MPa (Gooch 1998). Podobnie jak w przypadku kompozytów SiC-B<sub>4</sub>C, również węglik wolframu podczas badań eksperymentalnych odznaczał się bardzo dobrą odpornością na trafienia podkalibrowymi pociskami przeciwpancernymi. Wadą tego materiału jest bardzo wysoka gęstość, która wynosi aż  $15,6 \text{ g/cm}^3$ .

Szczególnym przypadkiem jest również wspomniany wcześniej kompozyt ceramiczno-polimerowy (Chabera i in. 2014). Badania eksperymentalne wykazały, że taki materiał dobrze nadaje się do wykorzystania w roli warstwy pochłaniającej, która zatrzymuje penetrator oraz ogranicza pękanie ceramiki stanowiącej warstwę zakłócającą. Ponadto zastosowanie żywicy jako fazy infiltrującej pozwoliło na znaczne zwiększenie odporności tego materiału na kruche pękanie. Dodatkowo taki materiał nadaje się w przyszłości do częściowego wytwarzania metodami druku 3D (Guo i in. 2023).

## Podsumowanie

Wymagania współczesnego pola walki wymuszają dalszy rozwój pancerzy kompozytowych w celu zachowania ich funkcjonalności. Na podstawie dostępnego zasobu wiedzy możliwe jest opracowanie nowoczesnej osłony, która będzie zdolna do ochrony żołnierzy poruszających się średnio opancerzonymi wozami bojowymi.

Cena, masa oraz dostępność wskazanych materiałów ceramicznych wskazują na to, że osłona zawierająca dwie warstwy ceramiczne powinna być wykonana z tlenku glinu (jako warstwy zakłócającej) oraz azotku krzemu (jako warstwy pochłaniającej). Możliwe jest ponadto wykorzystanie kompozytów na bazie dwutlenku cyrkonu i tlenku glinu, lecz głównym ograniczeniem w tej kwestii jest wysoka gęstość tych kompozytów. Możliwe jest ponadto dalsze zmniejszenie masy powierzchniowej osłony poprzez zastąpienie tlenku glinu ceramiką węglkową, jak również poprzez wdrożenie lekkich kompozytów ceramiczno-polimerowych.

W ramach kolejnego etapu badań zostaną wykonane próby balistyczne z wykorzystaniem pierwszych układów stosujących co najmniej dwie warstwy ceramiczne. Ponadto, w ramach symulacji numerycznych, będzie przeprowadzona optymalizacja grubości warstw zakłócającej oraz pochłaniającej wraz z doбором warstw pośrednich.



## Literatura

1. Chabera P., Boczkowska A., Morka A., Kędzierski P., Niezgoda T., Oziębło A., Witek A. (2014), *Numerical and Experimental Study of Armour System Consisted of Ceramic and Ceramic-Elastomer Composites*, „Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences”, 62, 4, s. 853-859.
2. Chen Y.L., Chang M.S., Shen B.C., Lin M.Y., Liu S.C., Chen Y.Z., Liu C.Y. (2020), *Impact Analysis of SiC-Based Composites Subjected to an Armor Piercing Projectile*, „Journal of Chung Cheng Institute of Technology”, 49, 2, s. 1-10.
3. Cui F., Wu G., Ma T., Li W. (2017), *Effect on Ceramic Properties and Depth-of-Penetration Test Parameters on the Ballistic Performance of Armour Ceramics*, „Defence Science Journal”, 67, 3, s. 260-268.
4. Goh W.L. (2019), *Importance of Hardness and Toughness in Ceramic Armour*, <https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/89900/1/PhD%20Thesis%20GWL%20submission.pdf> (dostęp: 12.04.2023).
5. Gooch W.A., Burkins M.S. (1998), *Ballistic Development of U.S. High Density Tungsten Carbide Ceramics*, „Ceramic Transactions”, 174, s. 53-62.
6. Grabowy M., Kluczowska A., Bykowska A., Gromada M. (2022), *Opracowanie składu tworzywa na rury wznosowe oraz osłony termopar na bazie azotku krzemu*, XIII Konferencja i Zjazd Polskiego Towarzystwa Ceramicznego. Streszczenia. Zakopane, 25-27 listopada 2022 r., Polskie Towarzystwo Ceramiczne, Kraków.
7. Grujicic M., Snipes J.S., Ramaswami S. (2016), *Ballistic Impact Behavior of Nacre-Like Laminated Composites Consisting of B4C Tablets and Polyurea Matrix*, „Journal of Materials Engineering and Performance”, 25, 3, s. 977-994.
8. Guo X., Ding J., Li X., Qu S., Hsi Fuh J.Y., Lu W.F., Song X., Zhai W. (2023), *Interpenetrating Phase Composites with 3D Printed Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Lattice Structures*, „Composites Part B: Engineering”, 248, 110351.
9. Hewitt J. (1855), *Ancient Armour and Weapons in Europe*, Messrs. Parker, Oxford.
10. Hong Y., Xie F., Xiong L., Yu M., Cheng X., Qi M., Shen Z., Wu G., Ma T., Jiang N. (2021), *The Ballistic Performance of Laminated SiC Ceramics for Body Armor and the Effect of Layer Structure of It*, „Applied Sciences”, 11, 6145.
11. MIL (1989), *MIL-P-64151(MR). Military Specification. Plate: Silicon Carbide Ceramic (for Use in Armor Composites)*.
12. LaSalvia J.C., Leavy B., Miller H., Houskamp J.R. (2009), *Recent Results on the Fundamental Performance of a Hot-Pressed Silicon Carbide Impacted by a Sub-Scale Long-Rod Penetrators*, „Ceramic Engineering and Science Proceedings”, 29, 6, s. 89-97.
13. Łopaciński M., Lis J. (2002), *Ceramiczne warstwowe materiały gradientowe do zastosowań antybalistycznych*, „Polski Biuletyn Ceramiczny”, 71, s. 342-349.
14. Płonka B., Remsak K., Rajda M. (2018), *Badania balistyczne demonstratorów opancerzenia dodatkowego*, „Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe”, 47, 1, s. 7-16.
15. Rashed A., Yazdani M., Babaluo A.A., Hajizadeh Parvin P. (2015), *Investigation on High-Velocity Impact Performance of Multi-Layered Alumina Ceramic Armors with Polymeric Interlayers*, „Journal of Composite Materials”, 50, 25, s. 3561-3576.
16. Yadav S., Ravichandran G. (2003), *Penetration Resistance of Laminated Ceramic/Polymer Structures*, „International Journal of Impact Engineering”, 28, 5, s. 557-574.

## Multi-Layered Ceramic Inserts in Composite Armour Design

**Abstract:** One of common results of the research and development of composite armor are multi-layered solutions. The problem with independent research in this direction is the limited number of publications dealing with ceramic armors composed of more than three layers. In order to fill the gaps in the literature, as a continuation of the EGIDA AGH project, the research will be conducted by the Scientific Circle of Military Constructions “Adamantium” as a part of the EGIDA AGH 2.0 project. The scope of the research will include the design and application properties of new multi-layer armor systems and their impact on reducing the surface density of target panels of armored vehicles. This is a theoretical introduction to the assumptions of the new scientific circle project. The presentation discusses the theoretical foundations of using ceramics in composite armor, as well as the problem of selecting ceramics in five-layer and thicker systems.

**Keywords:** alumina, ballistic protection, boron carbide, ceramic armor, silicon carbide, silicon nitride



## Rozdział 12

# Optymalizacja własności oraz analiza technologii wykonania funkcjonalnego ostrza z materiałów łączonych wybuchowo

Jakub Długosz, Paulina Kała, Bartłomiej Pabich, Łukasz Lisiecki

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono prace nad wykorzystaniem materiałów spajanych wybuchowo do zastosowań w produkcji noży. Badaniom poddano bimetalel wytworzony poprzez połączenie miedzi i stali za pomocą energii wybuchu. Omówiono podstawowe zastosowanie zgrzewania wybuchowego. Przeanalizowano przebieg badań i operacji, takich jak: badanie mikrostruktury połączenia, nawęglanie, badanie składu chemicznego stali po nawęglaniu, zmianę mikrostruktury stali oraz dobór i przeprowadzenie procesów obróbki cieplnej. Opisano wyniki badania mikrostruktury nawęglonej i hartowanej stali. Zaprezentowano wykonane ostrze. W końcowej części rozdziału sformułowano wnioski dotyczące przeprowadzonych badań.

**Słowa kluczowe:** nawęglanie, obróbka cieplna, ostrza, spajanie wybuchowe

## Wprowadzenie

Celem badań jest dobór parametrów procesów obróbki cieplno-chemicznej i cieplnej potrzebnej do wykonania funkcjonalnego ostrza z materiałów zgrzewanych wybuchowo. Spajanie wybuchowe jest znane ze zdolności do bezpośredniego łączenia szerokiej gamy metali i stopów, które nie mogą być połączone żadnymi innymi technikami. Ponadto proces ten umożliwia łączenie dużych powierzchni materiałów, ponieważ występuje równomierny rozkład energii wybuchu. Ze względu na dobrą odporność na korozję i własności mechaniczne, blachy platerowane cieszą się dużym zainteresowaniem w przemyśle chemicznym i jądrowym. Aby uzyskać dobrą jakość połączenia, kluczowy jest dobór materiału wybuchowego i prędkości detonacji. Odpowiednią energię i prędkość detonacji uzyskuje się poprzez zastosowanie odpowiedniego rodzaju materiału wybuchowego i jego ilości na jednostkę powierzchni. W łączeniu wybuchowym styk może

mieć trzy morfologie: falistą, prostą i nadtopienia (morfologie te zależą od prędkości i kąta uderzenia) (Findik 2011). Powstała morfologia związana jest z tarcieniem mechanicznym i oddziaływaniem fal rozchodzących się w materiale. Dodatkowo wpływ na połączenie mają dwa czynniki. Pierwsze zjawisko jest spowodowane poślizgiem w wyniku oddziaływania formacji strumieniowej zarówno na płytę nakładaną, jak i podstawową, a także przyspieszeniem płyty nakładanej na płytę podstawową. Drugie spowodowane jest oddziaływaniem fal ściskających i rozciągających, które rozchodzą się w materiale w wyniku uderzenia i wstrząsu detonacji oraz ich wzajemnego oddziaływania. Te zdarzenia mogą powodować zmiany własności złącza (Acarer i in. 2003).

Ze względu na wysoki popyt i możliwość łączenia dużych arkuszy najczęściej wykonywane są platery przeznaczone dla energetyki oraz na przedmioty wysokogabarytowe. Obecnie nie są szeroko wykorzystywane połączenia stali odpowiednich na narzędzia skrawające. Stal do zastosowania na narzędzia skrawające musi charakteryzować się wysoką twardością i dobrą odpornością na ścieranie. Spośród szerokiej gamy dostępnych na rynku stali na narzędzia skrawające przeznacza się głównie stale węglowe nadeutektoidalne i stopowe o wysokiej zawartości węgla, która gwarantuje dobrą hartowność i twardość stali po obróbce cieplnej. Ponadto w stalach wysokowęglowych w roztworze stałym występuje martenzyt odpuszczony z licznymi wydzieleniami węglików. Taki skład zapewnia dobrą skrawalność i odporność na ścieranie. Ważnym parametrem jest także udarność. Stosunkowo wysoka udarność przy wysokiej twardości zapewnia dobrą odporność na wykruszenia ostrza i zmniejsza ryzyko jego złamania. Dlatego podczas planowania procesów obróbki cieplnej należy dążyć do zachowania kompromisu pomiędzy dwoma wyżej wspomnianymi parametrami. Sposobami na podniesienie odporności na ścieranie przy zachowaniu ciągliwości jest np. powierzchniowa obróbka cieplno-chemiczna (nawęglanie i azotowanie) lub zastosowanie bimetalii (twarda krawędź tnąca z miękkimi „okładkami”).

W niniejszym rozdziale skupiono się na ostrzu wykonanym z materiałów spajanych wybuchowo, które zostało poddane nawęglaniu, tak aby zapewnić odpowiednie właściwości skrawające krawędzi tnącej przy zachowaniu dobrej ciągliwości rdzenia. Poddano analizie połączenie stal – miedź. Taki dobór materiałów jest rzadko spotykany przy produkcji noży, jest jednak ceniony ze względu na wysokie własności estetyczne. Ponadto miedź posiada właściwości bakteriobójcze. Przedstawione w rozdziale badania dotyczą połączenia stali S235JR z miedzią. Konieczne jest przeprowadzenie obróbki cieplno-chemicznej (nawęglania), aby nadać stali odpowiednią odporność na ścieranie i twardość. Nawęglanie polega na dyfuzyjnym nasycaniu warstwy powierzchniowej węglem. Pozwala to uzyskać wysoką twardość powierzchni przy zachowaniu ciągliwego rdzenia. Spośród metod nawęglania wyróżnia się nawęglanie w proszkach, cieczach i ośrodkach gazowych. Stale do nawęglania powinny posiadać poniżej 0,2% węgla. Po przeprowadzeniu procesu nawęglania zawartość węgla na powierzchni powinna wynosić od 0,7% do 1%. Stal po pełnym cyklu obróbki cieplno-chemicznej

i cieplnej wykazuje lepsze własności mechaniczne i wytrzymałościowe (Przybyłowicz 2007, s. 349) (Supriyono 2018).

## Badania własne

### Stal w stanie dostawy

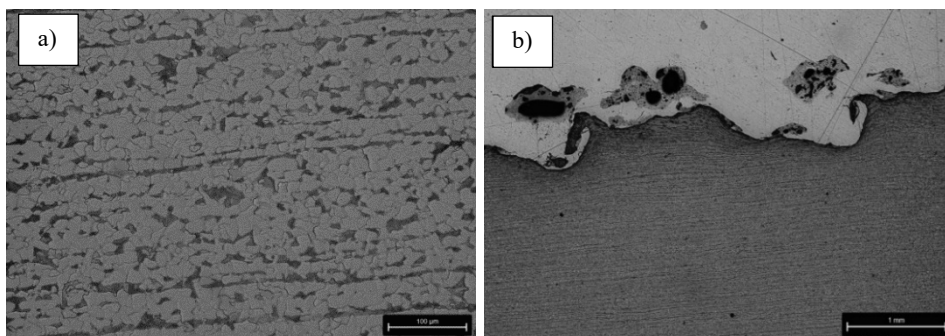
Badany materiał to bimetral wykonany poprzez spajanie wybuchowe miedzi ze stalą S235JR. Jest to stal konstrukcyjna o niskiej zawartości węgla (poniżej 0,2%). Skład chemiczny przedstawiono w tabeli 12.1 (wg normy EN 10025-2).

**Tabela 12.1. Skład chemiczny stali S235JR**

Stal S235JR					
Skład chemiczny [%]					
C	Mn	P	S	N	Cu
> 0,17	< 1,4	< 0,035	< 0,035	< 0,12	< 0,55

Źródło: Opracowanie własne na podstawie EN 10025-2

Na *rys. 1a* przedstawiono mikrostrukturę stali w stanie dostawy. Ma ona charakter ferrytyczno-perlityczny. Wydłużone ziarno perlitu jest efektem walcowania stali na zimno. Na *rys. 1b* przedstawiono obszar łączenia stal – miedź. Widoczna jest charakterystyczna fala wraz z nadtopieniami materiału. Jest to efekt typowy dla materiałów spajanych z dużymi prędkościami (wybuchowo i elektromagnetycznie).



**Rysunek 12.1.** a) Mikrostruktura stali S235JR w stanie dostawy, b) obszar połączenia stal – miedź

Źródło: Opracowanie własne

### Nawęglanie

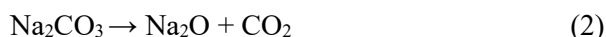
Aby zapewnić odpowiednie właściwości ostrza konieczne jest przeprowadzenie obróbki nasycającej warstwę wierzchnią węglem, tak aby uzyskać pożądaną

twardość. Stal S235JR ma zbyt małą zawartość węgla, aby możliwe było osiągnięcie wymaganych własności. Zdecydowano się zatem na nawęglanie materiału w proszkach. Skład mieszanki nawęglającej (nawęglacza) stanowi:

- węgiel drzewny – źródło węgla do procesu nawęglania,
- węglan sodu  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – aktywator.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  wydziela dwutlenek węgla podczas rozkładu, który reaguje z węglem w mieszance tworząc CO. Analogicznie stosowane są węglan baru lub węglan wapnia (Przybyłowicz 2007, s. 353; Oyetunji, Adeosun 2012, s. 320).

W tak przygotowanej mieszance nasycanie powierzchni węglem zachodzi na drodze poniższych reakcji:

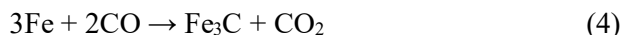
Tworzenie dwutlenku węgla:



Reakcja Bouduarda:



Tlenek węgla reaguje z żelazem, dyfundując do stali:

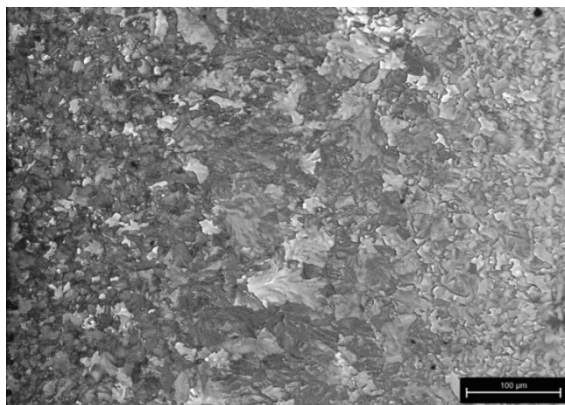


Grubość warstwy nawęglonej i jej nasycenie węglem zależy od składu mieszanki nawęglającej, czasu i temperatury (Aramide i in. 2010). Zawartość węgla na powierzchni nie przekroczy maksymalnej rozpuszczalności węgla w austenicie dla założonej temperatury nawęglania (Przybyłowicz 2007, s. 354).

Nawęglanie prowadzono przez 2 godziny w temperaturze  $920^\circ\text{C}$ . Skład mieszanki nawęglającej stanowił węgiel drzewny – 90% i węglan sodu – 10% (Jabłoński 1970, s. 882). Próbkę nawęglaną miały wymiary  $8 \times 8 \times 22$  mm. Grubość warstwy miedzi 6,5 mm.

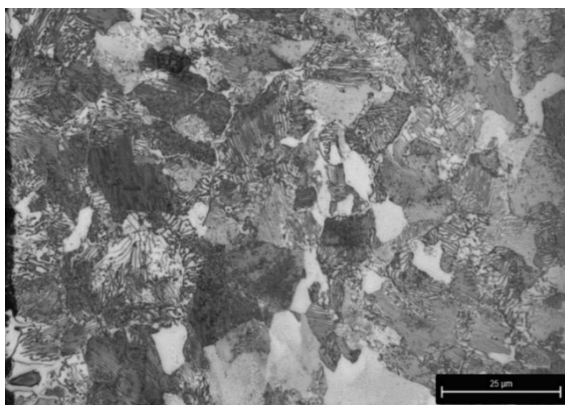
#### Badania mikrostruktury po nawęglaniu

Mikrostruktura próbki jest gradientowa, przy powierzchni widoczny jest perlit z wydzieleniami cementytu po granicach ziaren. Wydzielenia te tworzą niepełną siatkę, co świadczy o zawartości węgla większej od 0,77%. W odległości około  $150 \mu\text{m}$  od granicy próbki mikrostruktura przechodzi w perlit bez wydzieleni cementytu. Mikrostruktura perlityczna przechodzi w perlityczno-ferrytyczną, a następnie w ferrytyczno-perlityczną. Świadczy to o malejącej zawartości węgla w funkcji odległości od powierzchni próbki. Mikrostruktury przedstawiono na *rys. 12.2* i *rys. 12.3*. Z kolei na *rys. 12.4* przedstawiono siatkę cementytu na granicach ziaren, zdjęcie wykonano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego.



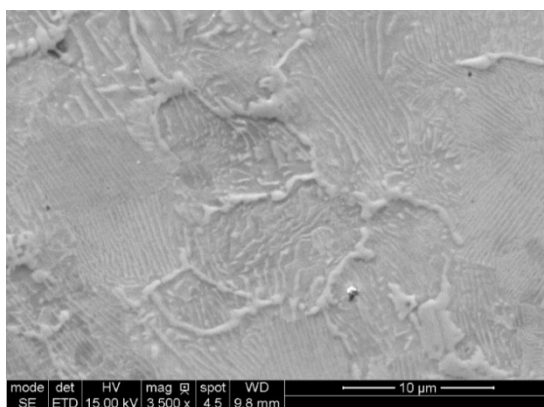
**Rysunek 12.2.** Mikrostruktura stali po nawęglaniu

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 12.3.** Obszar przy powierzchni próbki

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 12.4.** Wydzielenia cementytu na granicach ziaren – obszar przy powierzchni próbki

Źródło: Opracowanie własne

## Pomiar zawartości węgla na powierzchni

Za pomocą spektrometru iskrowego zmierzono zawartość pierwiastków na powierzchni nawęglonej próbki. Skład chemiczny przedstawiono w *tab. 12.2*.

**Tabela 12.2. Zawartość procentowa pierwiastków na powierzchni próbki**

Zawartość pierwiastków [%]					
Fe	C	Si	Mn	P	S
97,6	1,02	0,266	0,914	0,0143	0,0085

Źródło: Opracowanie własne

## Obróbka cieplna stali po nawęglaniu

Stal po nawęglaniu ma mikrostrukturę zgodną z układem równowagi Fe-Fe<sub>3</sub>C. Aby zapewnić odpowiednią twardość warstwy nawęglonej, konieczne jest hartowanie i odpuszczanie. Próbkę nr 1 zahartowano z temperatury 780°C. Druga próbka została zahartowana z temperatury 880°C, tak aby rozpuścić ostre wydzielienia cementytu na granicach ziaren perlitu. Temperatury obróbki cieplnej dobrano na podstawie wykresu Fe-Fe<sub>3</sub>C. Ostatnim etapem procesu jest odpuszczanie mające na celu pozbycie się naprężeń powstałych w mikrostrukturze. Przeprowadzono je bezpośrednio po hartowaniu. Dobrane czasy i temperatury przedstawiono w *tab. 12.3*.

**Tabela 12.3. Dobrane parametry obróbki cieplnej**

Operacja:	Temperatura [C]	Czas wygrzewania	Chłodzenie
Hartowanie próbka nr 1	780	15 min	olej OH70
Hartowanie próbka nr 2	880	15 min	olej OH70
Odpuszczanie	150	90 min	powietrze

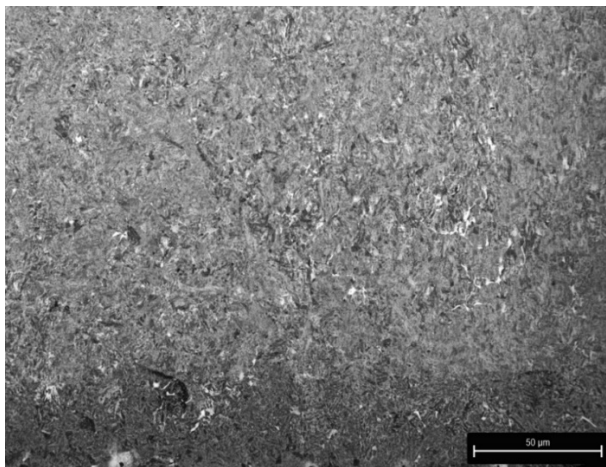
Źródło: Opracowanie własne

## Mikrostruktura po hartowaniu

Zbadano mikrostrukturę próbek po hartowaniu. Na *rys. 12.5* i *12.6* przedstawiono porównanie mikrostruktur nawęglanych próbek po hartowaniu z temperatury 780°C (próbka nr 1) i 880°C (próbka nr 2).

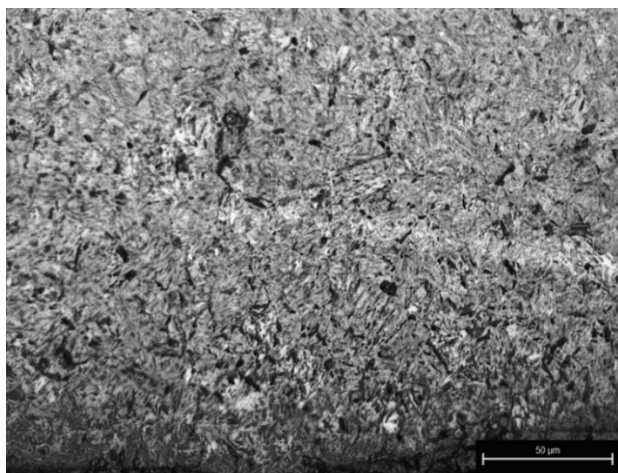
Badane próbki posiadają mikrostrukturę martenzytu odpuszczonego. Na próbce nr 1 są widoczne wydzielienia cementytu wtórnego w miejscach granic ziaren byłego perlitu. Druga próbka hartowana z wyższej temperatury charakteryzuje się mikrostrukturą praktycznie całkowicie martenzytyczną. Brak wydzieleń cementytu świadczy o jego całkowitym rozpuszczeniu podczas austenitzacji. W przypadku obu próbek na powierzchni jest widoczne odwęglenie powstałe

podczas wygrzewania. Obszar ten jest uboższy w węgiel, przez co charakteryzuje się mniejszą twardością (rys. 12.7).



**Rysunek 12.5.** Zahartowany obszar nawęglony – próbka nr 1

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 12.6.** Zahartowany obszar nawęglony – próbka nr 2

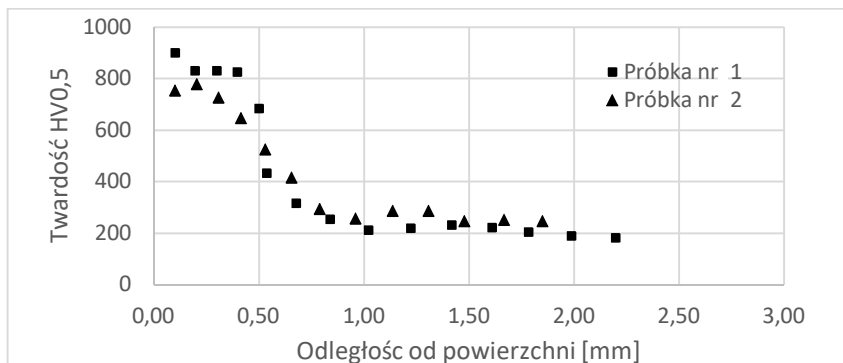
Źródło: Opracowanie własne

### Pomiar mikrotwardości

Próbki po nawęglaniu wykazały wzrost twardości przy powierzchni. Największą wartość uzyskała próbka nr 1, na głębokości około 0,1 mm. Spadek twardości przy powierzchni w próbce nr 2 jest spowodowany większym odwęgleniem powstałym podczas hartowania jako skutek wyższej temperatury austenitizacji. W przypadku obu próbek po osiągnięciu maksimum twardości jej wartość



stopniowo maleje (rys. 12.7). Jest to spowodowane spadkiem zawartości węgla w funkcji odległości od powierzchni.

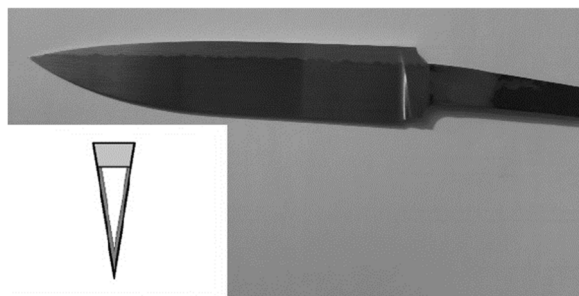


**Rysunek 12.7.** Rozkład mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni

Źródło: Opracowanie własne

## Projekt ostrza

Uwzględniając wyniki badań składu chemicznego, twardości i mikrostruktury, zaprojektowano ostrze noża myśliwskiego. Długość ostrza dobrano na 105 mm przy grubości 3,5 mm. Warstwą na grzbiecie ostrza jest miedź. Większa część noża wykonana jest ze stali, tak aby zapewnić odpowiednie właściwości tnące i wytrzymałościowe. Dzięki charakterystycznej fali na łączeniu stali z miedzią ostrze zyskuje rzadko spotykane, wyjątkowe własności estetyczne. Grubość krawędzi tnącej dobrano na 0,4 mm. Takie ostrze poddano nawęglaniu i obróbce cieplnej opisaną w niniejszym rozdziale. Stal zahartowano analogicznie do próbki nr 2. Biorąc pod uwagę grubość krawędzi tnącej i grzbietu, przyjęto, że nóż został nawęglony na wskroś do wysokości 5 mm od krawędzi. Zdjęcie ostrza oraz jego schematyczny przekrój przedstawiono na rys. 12.8.



**Rysunek 12.8.** Wykonane ostrze wraz ze schematycznym przekrojem

Źródło: Opracowanie własne



## Podsumowanie

Przedstawione wyniki pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Jest możliwe wykonanie funkcjonalnego ostrza z materiałów spajanych wybuchowo, które nie są początkowo przeznaczone na narzędzia tnące.
- Nawęglanie w przygotowanej mieszance daje stosunkowo dobre efekty do głębokości 0,5 mm, co jest wystarczające przy wykonywaniu noży.
- Podczas wykonania ostrza ważne jest usunięcie powierzchniowej warstwy odwęglonej, tak aby zapewnić powierzchni odpowiednią odporność na ścieranie.
- Hartowanie z wyższej temperatury pozwala rozpuścić ostre wydzielenia cementytu na granicach ziaren. Negatywnym skutkiem wyższej temperatury austenitizacji jest głębsze odwęglenie powierzchni.

## Podziękowania

*Składamy serdeczne podziękowania dla dr. inż. Łukasza Frocisa za konsultacje wyników badań mikrostruktury i firmy Explomet Gałka, Szulc Spółka Komandytowa za udostępnienie materiału do badań. Praca finansowana w ramach Grantu Rektora AGH nr 44/GRANT/2023.*

## Literatura

1. Acarer M., Gulenc B., Findik F. (2003), *Investigation of Explosive Welding Parameters and Their Effects on Microhardness and Shear Strength*, „Materials and Design”, 24, s. 659-664.
2. Aramide F., Ibitoye S., Oladele I., Borode J. (2010), *Pack Carburization of Mild Steel, using Pulverized Bone as Carburizer: Optimizing Process Parameters*, „Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies”, 16, s. 1-12.
3. Findik F. (2011), *Recent Developments in Explosive Welding*, „Materials and Design”, 32, 3, s. 1081-1093.
4. Jabłoński S. (1970), *Obróbka cieplna*, [w:] Lutosławski Z. (red.), *Poradnik inżyniera mechanika*, t. 3, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
5. Mohsin R., Asgar H., Ayman A., Rafiq A., Aqil I., Faizan G. (2016), *Carburising of Low-Carbon Steel Using Carbon Black Nanoparticle*, „Arabian Journal for Science and Engineering”, 41, 1, s. 4661-4667.
6. Oyetunji A., Adeosun S. (2012), *Effects of Carburizing Process Variables on Mechanical and Chemical Properties of Carburized Mild Steel*, „Journal of Basic and Applied Sciences”, 8, 2, s. 319-324.
7. Przybyłowicz K. (2007), *Metaloznawstwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
8. Prowans S. (1988), *Metaloznawstwo*, PWN, Warszawa.
9. Supriyono S. (2018), *The Effect of Pack Carburizing Using Charcoal on Properties of Mild steel*, „Media Mesin: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin”, 19, 1, s. 38-42.

## Optimization of Properties and Analysis of the Technology of Making a Functional Blade from Explosively Bonded Materials

**Abstract:** The chapter presents a research on the use of explosively bonded materials for applications in the production of blades. Bimetal produced by combining copper and steel with the use of explosion energy was subjected to the investigation. The basic application of explosive welding was discussed. The course of a series of tests and operations was analyzed, such as: examination of the joint microstructure, carburizing, analysis of the chemical composition of the steel after carburizing, change of the steel microstructure as well as the selection and implementation of heat treatment processes. The results of the study of the microstructure of carburized and hardened steel are described. In the final part of the article the finished blade and some conclusions were presented.

**Keywords:** blades, carburizing, explosive bonding, heat treatment

## Rozdział 13

# Wpływ dodatków materiałów niskoemisyjnych na właściwości zapraw cementowych

Wacław Brachaczek<sup>1</sup>, Adam Chleboś<sup>2</sup>, Magdalena Kupczak<sup>1</sup>, Sebastian Spisak<sup>1</sup>  
Michał Stybak<sup>1</sup>, Katarzyna Żyrek<sup>1</sup>

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej  
<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska  
<sup>2</sup>Interdyscyplinarna Szkoła Doktorska

**Streszczenie:** W rozdziale sprawdzono możliwość zastąpienia w zaprawie cementowej cementu CEM I dodatkami wykazującymi się właściwościami pucolanowymi: metakaolinem, popiołem lotnym krzemionkowym, pyłem krzemionkowym, zmielonym granulowanym żużlem wielkopiecowym oraz zmielonym wapieniem. Każdym z wymienionych surowców zastępowano do 15% masowych cementu. Zbadano wpływ surowców na konsystencję zapraw oraz wytrzymałości na ściskanie oraz zginanie po okresie 28 dni od zarobienia zaprawy. Testy przeprowadzono na bloczkach wykonanych z zapraw o wymiarach 40 x 40 x 160 mm. Dodatek metakaolinu miał najkorzystniejszy wpływ na właściwości wytrzymałościowe analizowanych próbek. Korzystny wpływ na wytrzymałość na ściskanie w całym analizowanym zakresie miał również popiół lotny krzemionkowy.

**Słowa kluczowe:** lotny popiół krzemionkowy, mączka wapienna, metakaolin, pył krzemionkowy, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie, zaprawa cementowa, zmielony żużel wielkopiecowy

## Wprowadzenie

Produkcja cementu odpowiada za ok. 5% całkowitej emisji CO<sub>2</sub> wywołanej przez działalność człowieka. Połowę tej wartości stanowią emisje z procesów produkcji klinkieru, 40% związanych jest ze spalaniem paliw do ogrzania pieca cementowego, a ok. 10% z zapotrzebowaniem zakładu produkcyjnego na energię elektryczną oraz transportem (Siemieniuk, Szatyłowicz 2018). Pogarszający się stan powietrza i środowiska naturalnego spowodowały wprowadzanie przez Unię Europejską szeregu ograniczeń dotyczących emisji, mających na celu osiągnięcie neutralności klimatycznej w połowie XXI wieku (Środa 2020). Naturalnym kierunkiem jest zatem redukcja udziału klinkieru w składzie cementu. Aby ograniczyć zużycie surowców naturalnych oraz emisję gazów potrzebnych do

wytworzenia cementu, klinkier można częściowo zastąpić takimi dodatkami, jak: mielony żużel wielkopiecowy, lotny popiół krzemionkowy, pył krzemionkowy, metakaolin lub mączka wapienna, co może zredukować emisję CO<sub>2</sub> nawet o 8% do 2050 roku (Środa 2020). Zastosowanie dodatków mineralnych pochodzenia naturalnego może pozwolić na uzyskanie wyższych właściwości wytrzymałościowych, zwłaszcza po dłuższym okresie dojrzewania.

Jeden z materiałów przeznaczonych do zamiany części cementu stanowi mączka wapienna. Materiał ten jest pozyskiwany poprzez zmielenie kamienia wapiennego. Głównym składnikiem wapienia stosowanego w przemyśle cementowym jest kalcyt CaCO<sub>3</sub>. Z uwagi na dużą dostępność tego surowca, zmielony wapień jako dodatek typu I jest szeroko wykorzystywany w dziale technologii betonu oraz jako dodatek do cementu. Mączka wapienna jest szeroko stosowana z uwagi na wysoką powierzchnię właściwą – jej dodatek zmniejsza odległość między cząsteczkami. Fizyczne wypełnienie struktury betonu może czynić gotowy wyrób bardziej wytrzymałym i poprawiać jego mrozoodporność i trwałość. Dodatek ten ma również udział w procesie hydratacji cementu. Drobinki wapienia mogą tworzyć dodatkowe ogniska krystalizacji, dynamizując czas wiązania cementu. Zmielony wapień w zaprawach cementowych rozprasza ziarna zmielonego klinkieru portlandzkiego, ułatwiając do nich dostęp wody, co zwiększa ich stopień przereagowania (Wang i in. 2018).

W przemyśle cementowym zastosowanie znajdują także popioły lotne krzemionkowe, otrzymywane głównie w procesie spalania pyłu z węgla kamiennego w paleniskach pyłowo-żwirowych (Giergiczny 2007). Znajdują one szerokie zastosowanie w branży cementowej z uwagi na dużą miękkość i aktywność pucolanową – same w sobie nie wykazują właściwości wiążących, lecz po rozdrobnieniu przy kontakcie z wodą reagują z wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)<sub>2</sub> pochodzącym z hydratacji faz krzemianowych klinkieru portlandzkiego, tworząc produkty o właściwościach wiążących i hydraulicznych (Giergiczny 2006). Głównymi składnikami popiołów lotnych są nieorganiczne składniki węgla pochodzące z termicznego rozkładu minerałów ilastych, pirytu i kalcytu. Ma on budowę drobnoziarnistego pyłu o kształtach kuli (Giergiczny 2013). Do nieporządkanych składników popiołu lotnego krzemionkowego stosowanego jako dodatek do betonów zalicza się zbyt dużą zawartość siarki, cząsteczki wolnego wapna, niespalony węgiel oraz związki żelaza: hematyt i magnetyt. Powstają one na powierzchni ziaren popiołu lotnego i blokują dostęp cieczy do jego fazy szklistej, tym samym negatywnie wpływając na przebieg reakcji pucolanowej. Wysokie straty prażenia przy produkcji surowca w mniej efektywnych elektrowniach starszego typu i związana z nimi podwyższona zawartość niespalonego węgla powodują wzrost wodozadržności popiołu i prowadzą do obniżenia wodo- i mrozoodporności gotowego wyrobu cementowego (Giergiczny 2006). Dodatek popiołu lotnego krzemionkowego ma pozytywny wpływ na zmniejszenie porowatości ogólnej zapraw cementowych oraz przyczynia się do zmniejszenia wielkości porów dominujących (Giergiczny 2006; Giergiczny i in. 2016). Cechą charakterystyczną zapraw z dodatkiem

lekkich popiołów krzemionkowych jest mała zawartość wodorotlenku wapniowego (Giergiczny 2006). Zmniejszona porowatość i zawartość  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  przekłada się na zwiększoną odporność wyrobów cementowych na korozję chemiczną, co ma niezwykle istotne znaczenie zwłaszcza dla materiałów przeznaczonych do kontaktu z wodą.

Mielony granulowany żużel wielkopiecowy jest dodatkiem do betonu typu II (PN-EN 206+A1:2016-12). Żużel wielkopiecowy otrzymywany jest podczas procesu wytapiania surówki w piecu hutniczym jako produkt uboczny. Surowce składowe wprowadzane do pieca to ruda żelaza, koks i topniki, które obniżają temperaturę topnienia rud i pomagają w oddzieleniu metalu od innych domieszek zawartych w rudzie. Spalanie koksu w gorącym powietrzu powoduje, że piec jest ogrzewany. Stopiony żużel wielkopiecowy uzyskuje się w wyniku wytopu wsadu na powierzchni surówki. Proces granulacji następuje po oddzieleniu od surówki poprzez gwałtowne chłodzenie powietrzem lub wodą. Wykształcanie mikrostruktury zapewniającej odpowiedni poziom aktywności otrzymuje się dzięki szybkiemu chłodzeniu płynnego żużla. Wysoka zawartość fazy szklistej w żużlu odpowiada za aktywność granulowanego żużla wielkopiecowego (*Granulowany żużel...*). Jest on dodatkiem stosowanym m.in. w cementach o niższej zawartości klinkieru. Cementy zawierające mielony żużel wielkopiecowy charakteryzują się wydłużonym czasem wiązania, niższym ciepłem hydratacji, lepszą urabialnością, znacznym przyrostem wytrzymałości w dłuższych okresach twardnienia oraz wyższą odpornością na agresję chemiczną (Brachaczek i in. 2023).

Metakaolin jest dodatkiem do betonów powstającym w procesie odwodnienia naturalnego kaolintu w temperaturze 700-800°C (San Nicolas i in. 2013). Występuje on w postaci białego, bardzo drobnego proszku o średnicy kilku mikrometrów – blisko 10-krotnie mniejszej od ziaren cementu portlandzkiego (Sidique, Klaus 2009). Niższa temperatura i krótszy czas wypalania sprawiają, że jego produkcja jest znacznie mniej energochłonna niż produkcja cementu – zakłada się, że na wytworzenie jednej tony metakolinitu potrzebne jest około 80% mniej energii niż do wytworzenia cementu (San Nicolas i in. 2013). Jego właściwości pucolanowe powodują, że z powodzeniem może być stosowany nie tylko jako dodatkowy składnik betonów poprawiający szczelność, ale również może pełnić rolę substytutu cementu. Metakaolin działa jako reaktywny materiał pucolaniczny – reaguje z wodą i wapniem z cementu, tworząc dodatkowe produkty hydratacji, takie jak żel krzemionkowy. Dzięki wiązaniu wolnego wapna, znajduje także zastosowanie w produkcji zapraw budowlanych, z uwagi na redukcję ryzyka wystąpienia wysoleń na powierzchni zaprawy (Konkol, Pyra 2014). Z uwagi na swoje właściwości dodatek metakaolinu do zapraw cementowych redukuje średnice porów, przyczyniając się do redukcji nasiąkliwości gotowego wyrobu i poprawy jego trwałości. Ponadto stwierdzono pozytywny wpływ dodatku metakaolinu na właściwości wytrzymałościowe zapraw oraz na redukcję ilości wody zarobowej koniecznej do uzyskania wymaganych właściwości roboczych, co przekłada się na redukcję skurczu gotowego wyrobu cementowego (Sidique, Klaus 2009; Konkol, Pyra 2014).

Badania nad użyciem pyłu krzemionkowego w betonach i zaprawach cementowych rozpoczęły się już w latach 50. XX wieku (Koutný i in. 2018). Jego bardzo korzystne właściwości wykorzystywane m.in. przy wykonywaniu betonów ultrawysokowartościowych UHPC związane są przede wszystkim z jego bardzo drobnym uziarnieniem, co przekłada się na bardzo wysoką powierzchnię właściwą (Czapik, Wolniewicz 2018). Pozwala to na wypełnianie przestrzeni między większymi ziarnami, zwiększając przyczepność połączenia zaczyn – kruszywo oraz zmniejszając ilość i średnicę porów kapilarnych, tym samym poprawiając szczelność zaprawy. Pył krzemionkowy posiada właściwości pucolanowe (Kurdowski 2010; Czapik, Wolniewicz 2018). Bardzo drobne uziarnienie może wiązać się ze zwiększeniem zapotrzebowania na wodę zarobową, co przekłada się na pogorszenie wytrzymałości oraz trwałości gotowego wyrobu cementowego (Kurdowski 2010).

## Cel pracy

Badania stanowią kontynuację i rozszerzenie badań, których wyniki zaprezentowane zostały w publikacji (Brachaczek i in. 2023). Celem badań jest sprawdzenie możliwości zamiany w zaprawie cementowej części wysokoemisyjnego cementu CEM I 42,5 R na surowce o niższym śladzie węglowym: metakaolin, popiół lotny krzemionkowy, pył krzemionkowy, zmielony granulowany żużel wielkopiecowy oraz zmielony wapień. Badany jest wpływ wprowadzanych modyfikacji na właściwości wytrzymałościowe gotowego wyrobu oraz na właściwości robocze zaprawy. W tym celu wykonywane były badania konsystencji zgodnie z normą (PN-EN 1015-3:2000) oraz wytrzymałości na zginanie i ściskanie zgodnie z normą (PN-EN 196-1:2016-07).

## Przygotowanie próbek

Badania przeprowadzone były na modyfikowanej zaprawie bazującej na zaprawie wzorcowej zgodnej z normą (PN-EN 196-1:2016-07). Spoiwem zaprawy był cement portlandzki klinkierowy. Jako wypełniacz zastosowano kwarcowy piasek suszony o frakcji 0,0-0,5 mm, typowy dla zapraw cementowych. Wraz ze stosowaniem dodatków pochodzących z recyklingu zmniejszono udział masowy cementu, tak by suma mas cementu i dodatku była stała. Maksymalny udział dodatków wynosił 15% masy cementu. Próbki były przygotowywane poprzez ręczne dozowanie składników i wymieszanie całości przy użyciu mieszalnika automatycznego, przy stałym czasie i szybkości mieszania. Przygotowaną suchą mieszankę wsypywano do stałej dla wszystkich próbek ilości wody zarobowej wynoszącej 270 ml/kg suchej mieszanki. Całość mieszano mieszalnikiem normowym, a następnie sprawdzano konsystencję zaprawy przy użyciu stolika rozplwy zgodnie z normą (PN-EN 1015-3:2000). Z uwagi na wpływ stosowanych dodatków o różnej wodożądności, konsystencję regulowano przy użyciu

superplastyfikatora – polikondensatu sulfonowanej melaminy i formaldehydu. Superplastyfikator dozowany był w taki sposób, aby zaprawa zachowywała stały rozplływ.

Po zakończeniu mieszania przygotowano próbki do pomiaru wytrzymałości na ściskanie i zginanie w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 40 x 40 x 160 mm. Po upływie 28 dni sezonowania w warunkach zgodnych z normą (PN-EN 196-1:2016-07) wykonano badania pomiaru wytrzymałości na zginanie i ściskanie.

## Zastosowane materiały

W badaniach zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R Górażdże. Jego właściwości fizyczne oraz mechaniczne zestawiono w *tab. 13.1*.

Do zastąpienia części cementu zastosowano 5 rodzajów surowców pochodzenia odpadowego bądź naturalnego o niższej emisyjności. Ich składy chemiczne oznaczono w laboratorium materiałów budowlanych i zestawiono w *tab. 13.2*.

**Tabela 13.1. Właściwości fizyczne i mechaniczne zastosowanego cementu CEM I 42,5 R**

Parametr	Wartość	Jednostka
Powierzchnia właściwa	3800	cm <sup>2</sup> /g
Stałość objętości	0,2	mm
Początek czasu wiązania	202	min
Wytrzymałość na ściskanie po:		
– 2 dniach	28,8	MPa
– 28 dniach	58,2	MPa

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 13.2. Składy chemiczne zastosowanych surowców**

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Metakaolin	50,42	46,83	0,42	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,01	0,11
Popiół lotny krzemionkowy	51,2	25,6	6,01	3,58	2,64	0,39	< 0,01	1,17	3,13
Pył krzemionkowy	95,18	0,52	0,16	0,75	0,31	0,06	0,21	< 0,01	0,55
Zmielony żużel wielkopiecowy	39,67	8,76	0,67	40,61	7,33	1,62	< 0,001	< 0,01	0,42
Zmielony wapień	1,35	0,62	0,41	54,15	< 0,01	0,70	< 0,001	< 0,01	< 0,01

Źródło: Opracowanie własne

Surowcami tymi zastępowano odpowiednio 2, 4, 6, 8, 10, 12 oraz 15% masowych cementu CEM I. Składy badanych próbek zestawiono w *tab. 3-7*. W każdej tabeli zamieszczono także wynik próbki referencyjnej pozbawionej dodatków, oznaczonej jako próbka „0”. Dodatkowo dla każdej próbki podawano ilość superplastyfikatora konieczną do uzyskania ustalonej, stałej konsystencji. Udziały dodatków podawano w procentach odniesionych do masy całej suchej mieszanki (wyrażone jako % m), podczas gdy udział superplastyfikatora podawano w odniesieniu do masy cementu (% mc).

**Tabela 13.3. Składy próbek z dodatkiem metakaolinu**

Nr próbki	Cement CEM I 42,5 R [% m]	Dodatek (metakaolin, popiół lotny, pył krzemionkowy, wapień, żużel) [% m]	Piasek 0,0-0,5 mm [% m]	Superplastyfikator [% mc]
0	25,0	0	75	0
M2	24,5	0,5	75	0,20
M4	24,0	1,0	75	0,41
M6	23,5	1,5	75	0,53
M8	23,0	2,0	75	0,65
M10	22,5	2,5	75	0,66
M12	22,0	3,0	75	0,80
M15	21,2	3,8	75	0,83

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 13.4. Składy próbek z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego**

Nr próbki	Cement CEM I 42,5 R [% m]	Popiół lotny krzemionkowy [% m]	Piasek 0,0-0,5 mm [% m]	Superplastyfikator [% mc]
0	25,0	0	75	0
PI2	24,5	0,5	75	0,31
PI4	24,0	1,0	75	0,52
PI6	23,5	1,5	75	0,74
PI8	23,0	2,0	75	0,98
PI10	22,5	2,5	75	1,11
PI12	22,0	3,0	75	1,36
PI15	21,2	3,8	75	1,42

Źródło: Opracowanie własne



**Tabela 13.5. Składy próbek z dodatkiem pyłu krzemionkowego**

Nr próbki	Cement CEM I 42,5 R [% m]	Pył krzemionkowy [% m]	Piasek 0,0-0,5 mm [% m]	Superplastyfikator [% mc]
0	25,0	0	75	0
Pk2	24,5	0,5	75	0,40
Pk4	24,0	1,0	75	0,41
Pk6	23,5	1,5	75	0,85
Pk8	23,0	2,0	75	1,09
Pk10	22,5	2,5	75	1,33
Pk12	22,0	3,0	75	1,59
Pk15	21,2	3,8	75	1,65

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 13.6. Składy próbek z dodatkiem zmielonego granulowanego żuźla wielkopiecowego**

Nr próbki	Cement CEM I 42,5 R [% m]	Żużel wielkopiecowy [% m]	Piasek 0,0-0,5 mm [% m]	Superplastyfikator [% mc]
0	25,0	0	75	0
Ż2	24,5	0,5	75	0
Ż4	24,0	1,0	75	0
Ż6	23,5	1,5	75	0
Ż8	23,0	2,0	75	0
Ż10	22,5	2,5	75	0
Ż12	22,0	3,0	75	0
Ż15	21,2	3,8	75	0

Źródło: Opracowanie własne

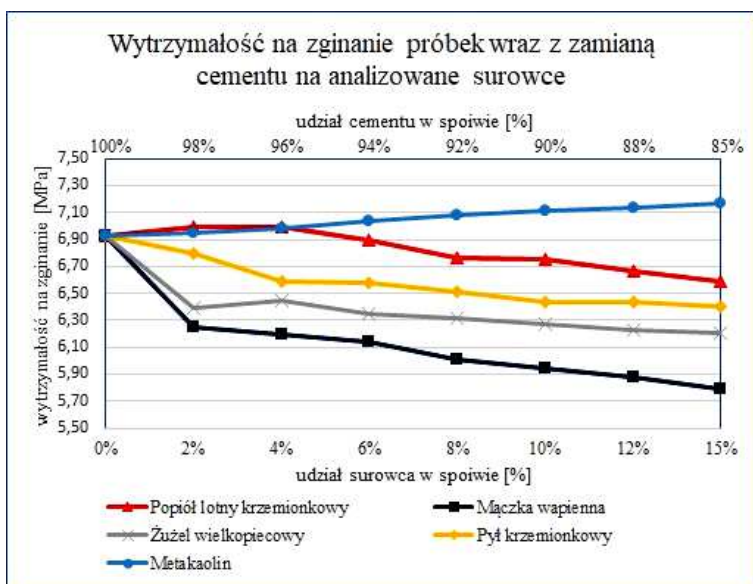
**Tabela 13.7. Składy próbek z dodatkiem zmielonego wapienia**

Nr próbki	Cement CEM I 42,5 R [% m]	Zmielony wapień [% m]	Piasek 0,0-0,5 mm [% m]	Superplastyfikator [% mc]
0	25,0	0	75	0
W2	24,5	0,5	75	0
W4	24,0	1,0	75	0,42
W6	23,5	1,5	75	0,43
W8	23,0	2,0	75	0,66
W10	22,5	2,5	75	0,68
W12	22,0	3,0	75	0,91
W15	21,2	3,8	75	0,94

Źródło: Opracowanie własne

## Wyniki i omówienie

Pomiary wytrzymałości na zginanie oraz ściskanie próbek wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej. Dla każdej receptury wykonano po 6 próbek do wykonania 6 pomiarów wytrzymałości na zginanie i 6 pomiarów wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach. Uśrednione wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie przedstawiono na wykresie zamieszczonym na *rys. 13.1*.



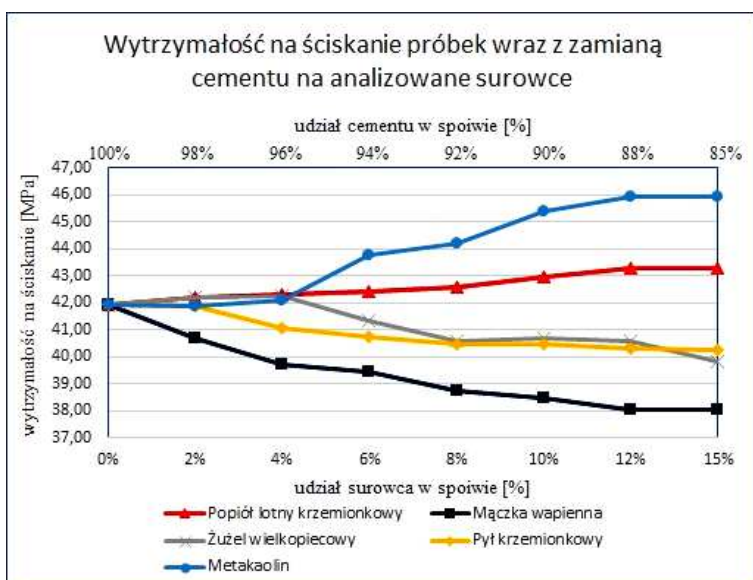
**Rysunek 13.1.** Wpływ zastępowania części cementu CEM I analizowanymi surowcami na wytrzymałość na zginanie próbek zaprawy cementowej

Źródło: Opracowanie własne

Na *rys. 13.1* można zauważyć poprawę właściwości wytrzymałościowych zaprawy wraz z zastępowaniem części cementu metakaolinem. Relacja pomiędzy udziałem metakaolinu a wytrzymałością na zginanie jest bliska liniowej i przy najwyższym analizowanym udziale dodatku wytrzymałość była o 3% wyższa niż w przypadku próbki referencyjnej.

W przypadku popiołu lotnego krzemionkowego tylko minimalne dozowanie dodatku powodowało niewielkie zwiększenie wytrzymałości na zginanie w stosunku do próbki referencyjnej. Wraz ze stopniowym zwiększaniem popiołu, wytrzymałość spadała. Zastępowanie cementu pozostałymi analizowanymi surowcami prowadziło do pogarszania wytrzymałości na zginanie, a największy negatywny wpływ odnotowywano przy stosowaniu zmielonego wapienia – do 16% gorszy od próbki referencyjnej.

Na *rys. 13.2* w formie wykresu przedstawiono uśrednione wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie badanych próbek.



**Rysunek 13.2.** Wpływ zastępowania części cementu CEM I analizowanymi surowcami na wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy cementowej

Źródło: Opracowanie własne

Na rys. 13.2 można zauważyć, iż wymiana do 12% m spoiwa na metakaolin powodowała wyraźną poprawę wytrzymałości na ściskanie, lecz dalsze zwiększanie udziału tego dodatku miało minimalny wpływ na zwiększenie wytrzymałości. Najlepsze właściwości odnotowywano przy największym analizowanym udziale dodatku – wytrzymałość na ściskanie była prawie o 10% większa niż wytrzymałość próbki referencyjnej.

Zwiększanie udziału lotnego popiołu krzemionkowego miało korzystny wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Podobnie jak w przypadku metakaolinu, tak i dla popiołu lotnego wyznaczyć można poziom udziału dodatku, powyżej którego wytrzymałość stabilizuje się na praktycznie stałym poziomie niezależnym od dalszego zwiększania udziału dodatku. W porównaniu z próbką referencyjną największy analizowany udział popiołu lotnego powodował poprawę wytrzymałości na ściskanie o 3%.

W przypadku pyłu krzemionkowego odnotowano pogorszenie wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem udziału tego surowca – przy najwyższym analizowanym udziale odnotowano pogorszenie wytrzymałości na ściskanie o 4% w porównaniu z próbką referencyjną.

W przypadku zamiany części cementu na zmielony granulowany żużel wielkopiecowy można zauważyć, że niewielkie dozowanie surowca (do 4% m) miało minimalnie pozytywny wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Dalsze zwiększanie

udziału żużla powodowało jednak wyraźny spadek wytrzymałości na ściskanie badanych próbek wynoszący do 5% w porównaniu z próbką referencyjną.

Najgorsze wyniki wytrzymałości na ściskanie odnotowano w przypadku zmielonego wapienia – jego największy dodatek skutkowało pogorszeniem wytrzymałości na ściskanie o 9% w stosunku do próbki referencyjnej.

## Podsumowanie

Spośród sprawdzanych surowców pochodzenia odpadowego i naturalnego najwyższą wodożądnością wykazał się pył krzemionkowy. Niewiele mniejsza ilość superplastyfikatora konieczna była do zachowania stałej konsystencji próbek z udziałem popiołu lotnego krzemionkowego. Najmniejszą wodożądnością wykazał się zmieszany granulowany żużel wielkopiecowy – w próbkach z jego udziałem nie było konieczności dodatku superplastyfiatora. Na podstawie uzyskanych wyników nie da się jednoznacznie powiązać wodożądności analizowanych surowców z wytrzymałością na ściskanie.

Próby zastępowania części cementu analizowanymi surowcami miały w większości przypadków negatywny wpływ na wytrzymałość na zginanie – jednoznacznie poprawę wraz ze zwiększaniem udziału dodatku zaobserwowano jedynie w przypadku metakaolinu. Nieznacznie korzystny wpływ odnotowano również w przypadku żużla wielkopiecowego, lecz miało to miejsce jedynie w wąskim przedziale, przy zamianie niewielkiej części cementu.

Uzyskane wyniki wykazały, że zamiana części cementu na lotny popiół krzemionkowy lub metakaolin ma korzystny wpływ na najważniejsze właściwości wytrzymałościowe zapraw cementowych. Również wyniki uzyskane dla modyfikacji zapraw granulowanym żużlem wielkopiecowym i pyłem krzemionkowym w zależności od przeznaczenia pozwalają realnie rozpatrywać możliwość zastąpienia nimi części cementu. Działania takie wpisują się w założenia strategii zrównoważonego rozwoju, bowiem pozwalają na redukcję śladu węglowego zapraw cementowych oraz umożliwiają odzysk cennych przemysłowych produktów ubocznych.

## Literatura

1. Brachaczek W., Chleboś A., Kupczak M., Spisak S., Stybak M., Żyrek K. (2023), *Influence of the Addition of Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Silica Ash and Limestone on Selected Properties of Cement Mortars*, „Materials Proceedings”, 13, 1, 32.
2. Czapik P., Wolniewicz M. (2018), *Wpływ dużej zawartości pyłu krzemionkowego na mikrostrukturę zaczynu. Materiały konferencji „Dni Betonu 2018”*, Wisła, s. 571-583.
3. Giergiczny Z. (2006), *Rola popiołów lotnych wapienowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
4. Giergiczny Z. (2007), *Właściwości popiołu lotnego a trwałość betonu*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”, 3, s. 44-48.

5. Giergiczny Z. (2013), *Popiół lotny w składzie cementu i betonu*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
6. Giergiczny Z., Ostrowski M., Baran T. (2016), *Wpływ popiołów lotnych krzemionkowych kategorii S na wybrane właściwości kompozytów cementowych*, Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki – Zakopane 2016”, s. 19-21.
7. *Granulowany żużel wielkopiecowy składnikiem cementu i spoiw drogowych*, Heidelberg Cement Group, <https://www.gorazdze.pl/pl/granulowany-zuzel-wielkopiecowy-skladnikiem-cementu-i-spoiw-drogowych><https://www.gorazdze.pl/pl/granulowany-zuzel-wielkopiecowy-skladnikiem-cementu-i-spoiw-drogowych> (dostęp: 27.04.2023).
8. Konkol J., Pyra M. (2014), *Wybrane właściwości betonów modyfikowanych zmiennym udziałem dodatku metakaolinitu*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury”, 61, 3/2, s. 287-296.
9. Koutný O., Snoeck D., Van Der Vurst F., De Belie N. (2018), *Rheological Behaviour of Ultra-High Performance Cementitious Composites Containing High Amounts of Silica Fume*, „Cement and Concrete Composites”, 88, s. 29-40.
10. Kurdowski W. (2010), *Chemia cementu i betonu*, SPC, Kraków.
11. PN-EN 1015-3:2000 Metody badań zapraw do murów – Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozpląwy).
12. PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.
13. PN-EN 206+A1:2016-12 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
14. San Nicolas R., Cyr M., Escadeillas G. (2013), *Characteristics and Applications of Flash Metakaolins*, „Applied Clay Science”, 83, s. 253-262.
15. Sidique R., Klaus J. (2009), *Influence of the Metakaolin on the Properties of Mortar and Concrete: A Review*, „Applied Clay Science”, 43, s. 392-400.
16. Siemieniuk J., Szatyłowicz E. (2018), *Zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> w procesie produkcji cementu*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 9, 2, s. 81-87.
17. Środa B. (2020), *Przemysł cementowy na drodze do Zielonego Ładu*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”, 7, s. 68-74.
18. Wang D., Shi C., Farzadnia N., Shi Z., Jia H. (2018), *A Review on Effects of Limestone Powder on the Properties of Concrete*, „Construction and Building Materials”, 192, s. 153-166.

## Effect of Additives of Low-Emission Materials on the Properties of Cement Mortars

**Abstract:** The chapter checks the possibility of replacing CEM I cement in a cement mortar with additives showing pozzolanic properties: metakaolin, silica fly ash, silica fume, ground granulated blast furnace slag and ground limestone. Each of the mentioned raw materials was replaced by up to 15% by mass of cement. The influence of raw materials on mortar consistency and compressive and bending strength after 28 from mortar preparation was examined. The tests were performed on blocks made of mortar with dimensions of 40 mm x 40 mm x 160 mm. The addition of metakaolin had the most beneficial effect on the strength properties of the analyzed samples. The silica fly ash also had a beneficial effect on the compressive strength in the entire analyzed range.

**Keywords:** cement mortar, compressive strength, flexural strength, ground blast furnace slag, metakaolin, limestone powder, silica dust, silica fly ash

## Rozdział 14

# Charakterystyka ceramiczno-węglowych tarcz hamulcowych

Justyna Owczarek, Anna Zawada

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** Celem rozdziału było dokonanie analizy materiałoznawczej tarczy ceramiczno-węglowej typu CCM. Przedstawiono wyniki badań tarcz ceramiczno-węglowych typu CCM. Przeprowadzono obserwacje struktury, wyznaczono chropowatość powierzchni, skład chemiczny, mikrotwardość metodą Vickersa, grubość włókien węglowych występujących w materiale, a także zidentyfikowano fazy występujące w materiale badawczym.

**Słowa kluczowe:** tarcze ceramiczno-węglowe, tarcze hamulcowe

## Wprowadzenie

Tarcze hamulcowe stanowią jeden z podstawowych elementów układu hamulcowego w każdym pojeździe mechanicznym. Pełnią bardzo ważną funkcję, między innymi odpowiadają za zatrzymanie oraz zmniejszanie prędkości pojazdu, a tym samym zapewniają bezpieczeństwo użytkowników. Wraz z rozwojem motoryzacji oraz produkcją samochodów sportowych, które osiągają bardzo duże prędkości i przyspieszenia, zaczęto poszukiwać lepszych rozwiązań dla klasycznych układów hamulcowych, które będą spełniać swoją funkcję w tzw. super szybkich samochodach. Tradycyjne tarcze żeliwne w samochodach, które rozwijają duże prędkości w krótkim czasie, zastąpione zostały tarczami ceramiczno-węglowymi. Tarcze ceramiczno-węglowe sprawdzają się lepiej niż tradycyjne tarcze żeliwne w samochodach, które rozwijają duże prędkości w krótkim czasie. Producenci super samochodów często wykorzystują nowoczesne technologie, aby polepszyć osiągi swoich pojazdów, tym samym zadowolić najbardziej wymagających klientów. Tarcze ceramiczno-węglowe niewątpliwie pozwalają na zwiększenie skuteczności hamowania samochodów o dużych osiągnięciach prędkości, co za tym idzie, zwiększają bezpieczeństwo ich użytkowania. Charakteryzują się lepszą przewodnością cieplną, wytrzymują wyższe temperatury oraz posiadają wysoką

odporność na ścieranie, która umożliwia dłuższe i bardziej intensywne użytkowanie. Niektóre tarcze ceramiczno-węglowe po procesie eksploatacji, kiedy tarcza uznawana jest za zużytą lub na jej powierzchni pojawiły się pęknięcia, rozwarstwienia czy drobne ubytki, poddawane są procesowi regeneracji. Proces regeneracji tarcz ceramiczno-węglowych jest stosunkowo nową technologią, która staje się coraz bardziej powszechna wśród użytkowników tego rodzaju hamulców.

W niniejszym rozdziale przeprowadzono charakterystykę porównawczą tarczy ceramiczno-węglowej typu CCM nowej, po eksploatacji oraz po procesie regeneracji, stosując analizę mikrostrukturalną, rentgenowską analizę fazową oraz ocenę parametrów powierzchniowych (chropowatość).

### Materiał do badań

Materiał badawczy stanowiły tarcze ceramiczno-węglowe typu CCM: nowe (rys. 14.1), po eksploatacji oraz po procesie regeneracji.



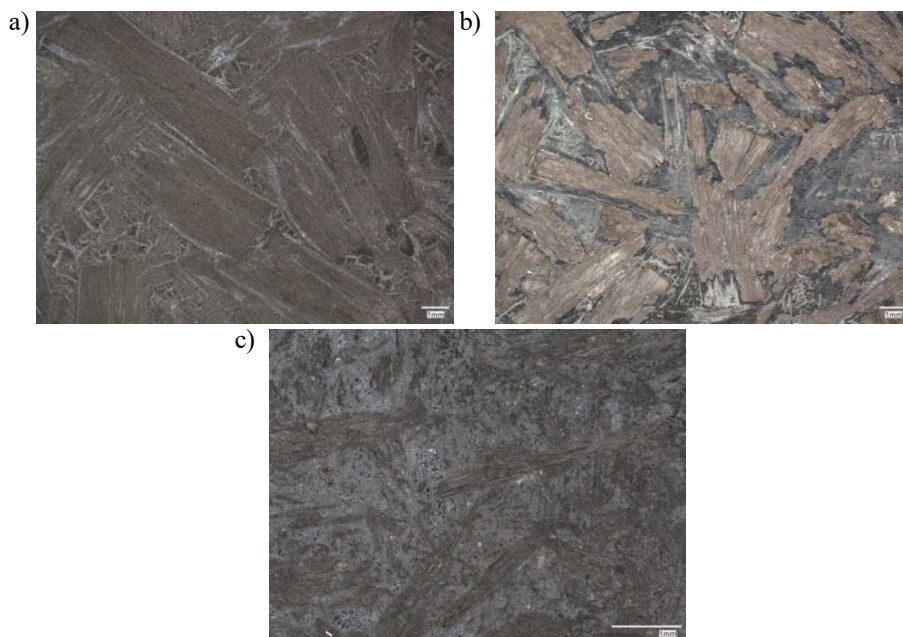
Rysunek 14.1. Nowa tarcza

Źródło: Opracowanie własne

### Analiza mikrostrukturalna

Badanie mikrostrukturalne przeprowadzono za pomocą mikroskopu optycznego Keyence VHX-7000. Mikroskop Keyence VHX-7000 pozwala na rejestrację obrazów w wysokiej rozdzielczości, dzięki funkcji tworzenia obrazów zarówno 2D, jak i 3D. Urządzenie tego typu wyposażone jest w oprogramowanie umożliwiające m.in. przeprowadzenie analizy obrazu, w tym pomiaru wielkości ziarna pomiaru oraz chropowatości analizowanej powierzchni.





**Rysunek 14.2.** Tarcza typu CCM, pow. 20 x: a) nowa, b) po eksploatacji, c) po regeneracji

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 14.3.** Fazy występujące w tarczy typu CCM

Źródło: Opracowanie własne

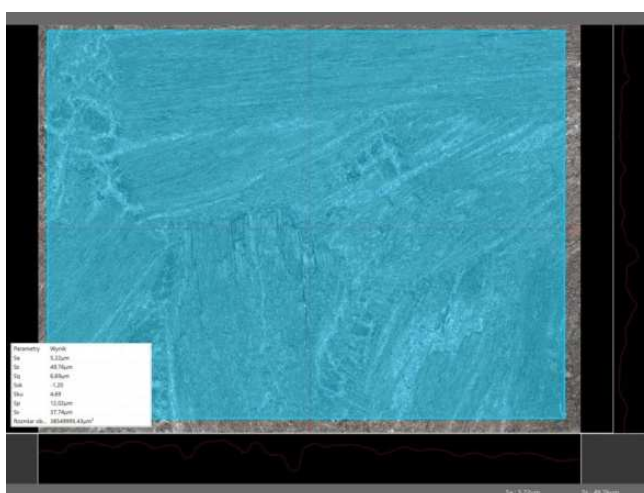
Na rys. 14.2-14.3 przedstawiono mikrostrukturę tarcz typu CCM. Na rys. 14.2a, przedstawiono nową tarczę typu CCM. Na zamieszczonej mikrostrukturze widoczne są pakiety włókien zatopione w osnowie. Mikrostruktura tarczy CMM po eksploatacji, zamieszczona na rys. 14.2b, uwidacznia ubytki na powierzchni tarczy w postaci powyrywanych włókien, które powstały podczas procesu



hamowania w trakcie tarcia klocka hamulcowego o powierzchnię tarczy. Na *rys. 14.2c* przedstawiono mikrostrukturę tarczy ceramiczno-węglowej po procesie regeneracji. Na mikrostrukturze przedstawionej na *rys. 14.4* zaznaczono poszczególne elementy tarczy w postaci włókien węglowych i osnowy.

## Chropowatość

Badania chropowatości powierzchni przeprowadzono dla tarczy typu CCM: nowej, eksploatowanej oraz po regeneracji. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu Keyence VHX-7000. Przykładowy wynik pomiaru chropowatości powierzchni zaprezentowano na *rys. 14.4*.



**Rysunek 14.4.** Przykładowa analiza chropowatości powierzchni dla nowej tarczy typu CCM

Źródło: Opracowanie własne

Chropowatość opisuje nierówności powierzchni materiału, które nie wynikają z jej kształtu. Parametr ten ma istotny wpływ na właściwości trybologiczne. Duża chropowatość zwiększa wartość współczynnika tarcia oraz zwiększa intensywność zużycia materiału. Ocena chropowatości powierzchni można określić za pomocą profilometrii optycznej – wynikiem tych badań jest profilogram, który określa podstawowe parametry chropowatości powierzchni:

- Sa – średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia,
- Sz – maksymalna wysokość profilu,
- Sq – średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia.

Parametry chropowatości przedstawiono w *tab. 14.1*.

**Tabela 14. 1. Parametry chropowatości powierzchni tarcz typu CCM: nowej, po eksploatacji oraz po procesie regeneracji**

Tarcza typu CCM	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]
Nowa	5,22	49,76	6,69
Po eksploatacji	110,72	528,95	124,94
Po regeneracji	45,91	279,5	55,44

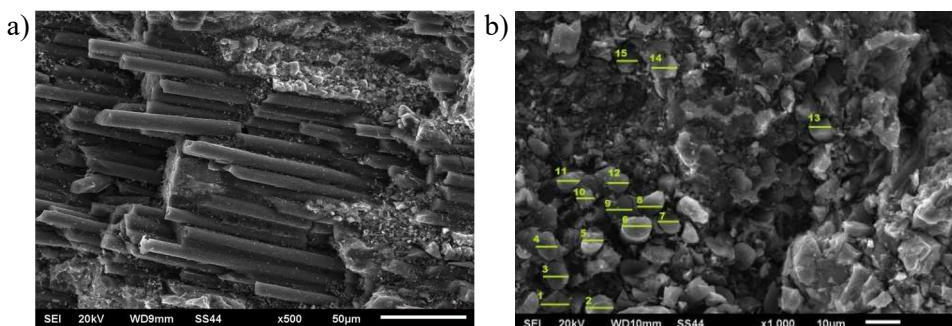
Sa – średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia, Sz – maksymalna wysokość profilu, Sq – średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia.

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy chropowatości powierzchni badanych tarcz można stwierdzić, że w przypadku tarczy typu CCM najmniejszą chropowatość posiada tarcza nowa, po eksploatacji chropowatość ulega znacznemu zwiększeniu, natomiast zabieg regeneracji wygładza powierzchnię tarczy oraz zmniejsza jej chropowatość. Chropowatość tarczy zregenerowanej typu CCM jest większa niż nowej tarczy typu CCM.

### Mikroskopia skaningowa oraz oznaczenie składu chemicznego

Analizę mikrostrukturalną wraz z oznaczeniem grubości włókien węglowych, będących fazą zbrojąca kompozytu tarczy ceramiczno-węglowych CCM (rys. 14.5), a także oznaczenie składu chemicznego przeprowadzono przy wykorzystaniu elektronowego mikroskopu skaningowego JOEL JSM 6610-LV z zamontowaną przystawką EDS.



**Rysunek 14.5.** a) Mikrostruktura tarczy CCM (SEM), b) pomiar grubości włókien węglowych

Źródło: Opracowanie własne

Średnia grubość włókien węglowych używanych do produkcji tarcz ceramiczno-węglowych wynosi około  $6,5 \mu\text{m}$ . Pomiar średnic włókien przedstawiono na rys. 14.5b.

W *tab. 14.2* przedstawiono wyniki analizy pierwiastkowej tarczy po eksploatacji typu CCM. Na podstawie otrzymanych wartości udziałów wagowych poszczególnych pierwiastków można stwierdzić, że w badanych tarczach ponad 70% stanowi węgiel oraz krzem w ilości 20% wagowych. Analiza ta potwierdza, że głównymi składowymi badanych tarcz są włókna węglowe oraz węgiel krzemu.

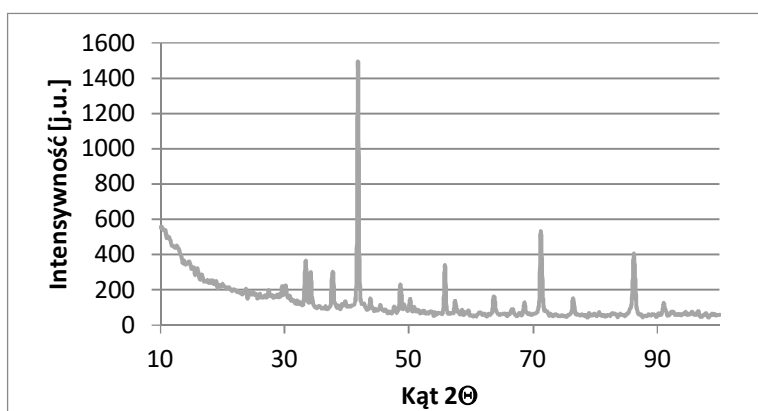
**Tabela 14.2.** Skład pierwiastkowy tarczy typu CCM uzyskany na podstawie analizy EDS

Pierwiastek	% wagowy	% atomowy
C	77,10	88,46
O	0,83	0,71
Si	22,07	10,83

Źródło: Opracowanie własne

## Analiza rentgenostrukturalna

W celu identyfikacji faz występujących w badanych tarczach wykorzystana została analiza rentgenostrukturalna. Rentgenowską analizę fazową przeprowadzono za pomocą dyfraktometru XRD 3003 T-T firmy Seifert, przy lampie kobaltowej emitującej promieniowanie X o długości  $\lambda = 0,179021$  nm oraz kroku pomiarowym 0,2. Na podstawie otrzymanych wyników oraz dokonanej ich interpretacji, stwierdzono obecność dwóch podstawowych faz: węglowej, którą stanowiły włókna, oraz węgla krzemu, stanowiącego osnowę kompozytu (*rys. 14.6* oraz *tab. 14.4*). Wyniki otrzymane z analizy rentgenostrukturalnej są spójne z wynikami otrzymanymi z analizy składu chemicznego metodą EDS.



**Rysunek 14.6.** Dyfraktogram tarczy typu CCM

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 14.4. Fazy krystaliczne oraz kąt  $2\theta$  dla tarczy typu CCM, dane uzyskane na podstawie badań rentgenostrukturalnych**

Kąt $2\theta$	Faza krystaliczna
33,3884	SiC
34,2086	C
37,7686	SiC
39,5941	SiC
41,8054	SiC
42,5608	SiC
43,8215	C
48,6400	SiC
50,1930	SiC
55,8032	C
57,4467	SiC
63,7596	C
66,6192	SiC
68,6212	SiC
71,2407	SiC
76,4265	SiC
86,2113	SiC
91,0407	SiC
92,3977	SiC

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

Celem rozdziału była materiałoznawcza analiza porównawcza tarcz ceramiczno-węglowych CCM. Jako materiał do badań użyto tarcze: nową, po eksploatacji oraz po procesie regeneracji. Cel pracy został osiągnięty poprzez odpowiednio dobraną metodykę badawczą, w skład której wchodziła: analiza mikrostrukturalna, rentgenowska analiza fazowa, analiza składu chemicznego metodą EDS oraz chropowatości powierzchni.

Poddane padaniu tarcze charakteryzowały się zbliżoną do siebie mikrostrukturą, która różniła się nieznacznie, w zależności od stanu zużycia tarcz. Na podstawie przeprowadzonych badań mikrostrukturalnych można było ocenić wielkość oraz rozkład włókien węglowych w osnowie z węgliku krzemu, a także stan tarcz po eksploatacji i po przeprowadzonym zabiegu regeneracji.

Analiza składu pierwiastkowego oraz rentgenowska analiza fazowa potwierdziły, iż tarcze typu CCM składają się głównie z włókien węglowych stanowiących zbrojenie oraz węgliku krzemu pełniącego funkcję osnowy w badanym

kompozycje. Pomiar chropowatości ujawnił, że nowa tarcza typu CCM charakteryzuje się wysoką gładkością powierzchni, która gwałtownie zmienia się podczas eksploatacji. Zabieg regeneracji przywraca w dużym stopniu gładkość powierzchni tarcz, co pozwala na wydłużenie ich żywotności, poprzez wypełnienie węglikiem krzemu ubytków powstałych na powierzchni na skutek użytkowania.

## Literatura

1. Ciferri L. (2009), *Brembo Predicts Surge in Carbon Ceramic Brakes*, <https://europe.autonews.com/article/20090615/ANE/906129996/brembo-predicts-surge-in-carbon-ceramic-brakes> (dostęp: 15.01.2023).
2. *Material*, <http://www.carbonceramicbrakes.com/en/technology/Pages/material.aspx> (dostęp: 15.01.2023).
3. Owczarek J. (2023), *Charakterystyka materiałoznawcza ceramiczno-węglowych tarcz hamulcowych*, praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Częstochowska.
4. Rancsó B. (2015), *Manufacture and Examination of Carbon Ceramic Brakes*, „Technical Report”, November.
5. *Tarcze karbonowo-ceramiczne*, <https://www.brembo.com/pl/samochody/oryginalne-wyposazenie/produkty/tarcze-w%C4%99glowo-ceramiczne> (dostęp: 07.11.2022).
6. *The Carbon Ceramic Brakes History*, <http://www.carbonceramicbrakes.com/en/company/Pages/history.aspx> (dostęp: 07.11.2022).

## Characteristic of Carbon-Ceramic Brake Discs

**Abstract:** The aim of the chapter was to carry out a material analysis of a CCM-type ceramic-carbon disc. The paper presents the results of testing CCM-type ceramic-carbon discs. Structure observations were carried out, surface roughness, chemical composition, Vickers microhardness, thickness of carbon fibers present in the material were determined, and the phases present in the test material were identified.

**Keywords:** carbon-ceramic discs, brake discs

## Rozdział 15

# Opracowanie technologii wytwarzania wielowarstwowego pancerza kompozytowego na bazie materiałów wysokoentropowych i ceramicznych

Hubert Sokół-Twarowski, Gabriel Płodowski, Szymon Rakoczy  
Bartłomiej Pabich, Kamil Cichocki, Łukasz Lisiecki

AGH Akademia Górniczo Hutnicza  
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

**Streszczenie:** Celem rozdziału było opracowanie oraz wykonanie próbki pancerza kompozytowego składającego się z warstwy ceramicznej oraz blachy z materiału wysokoentropowego, a następnie zbadanie jakości pancerza poprzez wykonanie testów balistycznych. Procedura badawcza obejmowała dobór składu chemicznego materiału wysokoentropowego, jego wytworzenie w postaci wlewka oraz jego przeróbkę plastyczną poprzez kucie i walcowanie na gorąco. Parametry procesowe dobrano tak, aby otrzymać blachy o grubościach 2 oraz 3 mm bez naruszenia spójności materiału. Na drugim etapie prac wykonano ceramiczną część pancerza z tlenku glinu. Ostatecznie wytworzono sześć różnych wariantów próbek pancerza uwzględniających samą ceramikę, połączenie ceramiki ze stalą Hardox oraz połączenie ceramiki z wykonanym materiałem wysokoentropowym. Otrzymane próbki poddano testom balistycznym z wykorzystaniem pocisków małego kalibru. W rozdziale przedstawiono zarówno wyniki tych testów, jak i procedurę wykonania pancerza kompozytowego uwzględniającego materiał wysokoentropowy.

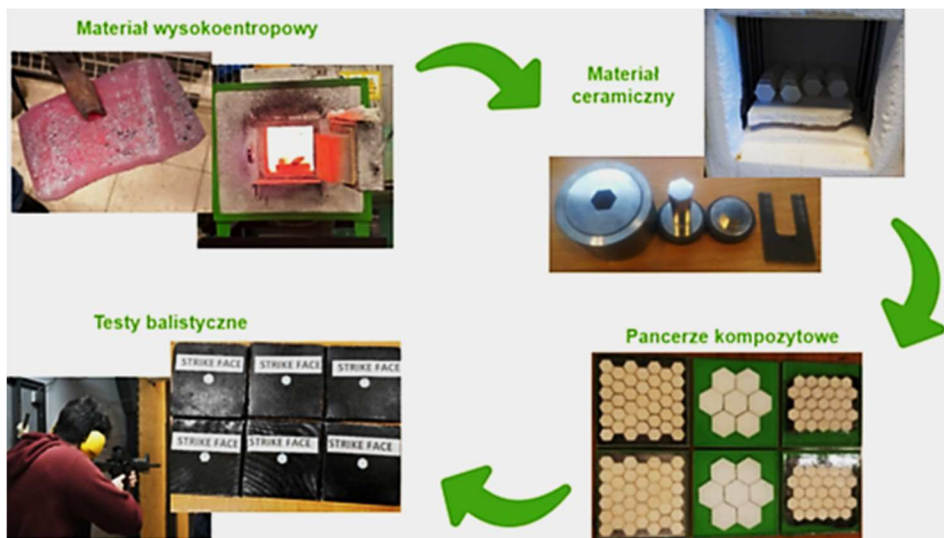
**Słowa kluczowe:** badania balistyczne, kompozyty warstwowe, pancerz, stop wysokoentropowy

## Wprowadzenie

Konflikty zbrojne wybuchające na świecie oraz codzienna praca funkcjonariuszy służb porządkowych skłania do refleksji nad lepszymi środkami ochrony balistycznej. Dane FBI (*LEOKA*) wykazują, że w latach 1987-2015 ponad 92% wszystkich śmierci funkcjonariuszy na służbie było spowodowanych bronią palną.

Prezentowana praca badawcza miała na celu wykonanie wielowarstwowego pancerza kompozytowego, w którego skład wchodziły materiały metaliczne oraz

materiał ceramiczny. Na podstawie dotychczas wykonywanych badań prowadzonych w ramach działalności Koła Naukowego Hefajstos (Pabich 2022) oraz Projektu Kół Naukowych EGIDA AGH jako wkład wybrano płaskownik z stopu wysokoentropowego  $(\text{FeMnNiCo})_{95}\text{Mo}_5$  oraz płaskownik z blachy HARDOX<sup>®</sup> 450 o grubościach 2 i 3 mm. Na wkład ceramiczny wybrano ceramikę tlenkową  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



**Rysunek 15.1.** Schematyczny przebieg wykonanych prac

Źródło: Opracowanie własne

## Procedura badawcza

### Wytworzenie materiału badawczego

Przy współpracy z Siecią Badawczą Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny wytopiono cylindryczny wlewek stopu  $(\text{FeMnNiCo})_{95}\text{Mo}_5$  o masie 1 kg i średnicy 20 mm. Wytop wykonano na elektrycznym piecu indukcyjnym Ultraflex Ultramelt 300. Tygiel wytworzono z krzemianu cyrkonu z powłoką z tlenku cyrkonu. Wlewek następnie wyżarzano w temperaturze 1100°C przez 24 godziny dla ujednoczenia struktury.

### Przeróbka plastyczna wlewka

Wlewek podzielono na dwie części o masie 500 g. Uzyskane wsady zostały wstępnie przetworzone w procesie kucia swobodnego w temperaturze 1100°C do uzyskania grubości 15 mm. Materiały o grubości 15 mm zostały poddane procesowi walcowania do grubości 10 mm z redukcją grubości o 1 mm w każdym przejściu oraz dogrzewaniem do temperatury 1100°C pomiędzy przepustami.

Materiały o grubości 10 mm zostały poddane procesowi walcowania do grubości 2 mm oraz 3 mm z redukcją grubości 0,5 mm w każdym przejściu oraz dogrzewaniem do temperatury 1100°C pomiędzy przepustami. Gotowe blachy o grubościach 2 mm oraz 3 mm chłodzono na powietrzu do osiągnięcia temperatury pokojowej. Wyznaczono gniot bezwzględny w dwóch etapach walcowania jako:

$$\Delta h_i = h_{i-1} - h_i \quad (1)$$

Grubość początkową przyjęto  $h_0 = 15$  mm.

**Tabela 15.1. Własności procesu walcowania płaskowników z HEA**

Docelowa grubość blachy [mm]	I etap walcowania 15 -> 10 [mm] $\Delta h_1$	II etap walcowania 10 -> 2; 3 [mm] $\Delta h_2$	Temperatura [°C]	Chłodzenie
2	1	0,5	1100	Na powietrzu
3	1	0,5	1100	Na powietrzu

Źródło: Opracowanie własne

### Płytki ceramiczne

Płytki ceramiczne wytworzono we współpracy z Kołem Naukowym Konstrukcji Militarnych „Adamantium” AGH z czystego proszku  $Al_2O_3$  uzyskanego w procesie Bayera. Proszek odmierzone i sprasowano w heksagonalne wypraski o boku 12,5 mm. Nacisk prasowania obliczono na 4,8 MN. Wypraski umieszczono w laboratoryjnym piecu elektrycznym. Temperaturę spiekania ustalono na 1200°C. Czas przetrzymania wyniósł 2 godziny. Gotowe płytki studzono swobodnie wraz z piecem do temperatury pokojowej.

### Wytworzenie próbek kompozytu

Wkład metalowy z HARDOX® 450 grubości 2 i 3 mm wycięto za pomocą noża wodnego. W celu zapewnienia powtarzalności próbek wytworzono 6 form i szablon metodą wytwarzania przyrostowego z ABS. Gotowe elementy oczyszczono i odłuszczone za pomocą kąpieli w alkoholu izopropylowym. Osuszone płaskowniki ułożono w pakiety na wcześniej przygotowanych formach. Aby uzyskać odstęp między płytkami wynoszący 1 mm, do ułożenia warstwy ceramicznej użyto wytworzony wcześniej szablon.

W celu połączenia kompozytu wykorzystano żywicę poliuretanową TechniArt Techniplast 500 PU. Złożone składniki zalano żywicą i pozostawiono do zastygnięcia na 72 godziny. Następnie krawędzie próbek poddano fazowaniu. Do wykonania powłoki antyrykoszetowej wykorzystano tkaninę nylonową CORDURA® o gramaturze 380 g/m<sup>2</sup> (warstwy 1, 3, 5) oraz tkaninę aramidową Kevlar® firmy DuPont™ o gramaturze 200 g/m<sup>2</sup> (warstwy 2, 4).





**Rysunek 15.3.** Próbkę kompozytu po fazowaniu krawędzi (lewy) oraz po nałożeniu warstwy antyrykoszetowej i opisaniu (prawy)

Źródło: Opracowanie własne

## Testy balistyczne

W celu wykonania testów balistycznych gotowe próbki przewieziono do Stacji Prób będącej częścią MESKO SA. Badania przeprowadzono według następujących kryteriów:

- ostrzał amunicją 5.56 x 45 NATO (SS109) wykonano za pomocą lufy balistycznej;
- odległość strzelca od celu wynosiła 15 m;
- wykonano jeden strzał w środek próbki;
- próbkę ustawiono na podłożu z gliny modelarskiej odwzorowującej „świadka”;
- zmierzono początkową prędkość pocisku;
- zmierzono wartość BFS po strzale, czyli deformację powierzchni podłoża próbki wg Normy NIJ (NIJ 2008, s. 5-6);
- próby zarejestrowano przez 2 kamery w celu dokumentacji i późniejszej analizy.

Po wykonaniu strzału sklasyfikowano próbki według kryteriów:

- przebicie próbki,
- wartość wskaźnika BFS (ang. *Backface Signature*).

Wyniki dokonanej analizy przedstawiono w *tab. 15.2*.

**Tabela 15.2. Warunki testowe na stanowisku testów balistycznych oraz wynik po strzale**

Nr próbki	Masa próbki [g]	Prędkość pocisku [m/s]*	Energia uderzenia [J]	Rezultat**	BFS [mm]
1	1050	966.25	1867.3	Z	0
4	909	966.25	1867.3	P	> 44
5	870	958.1	1835.9	Z	27.63
6	961	959.32	1840.6	P	> 44
7	1070	964.38	1860.1	Z	27.24

\*Prędkość pocisku mierzona przy wylocie lufy

\*\*Rezultat: Z – próbka zatrzymała pocisk, P – pocisk przebił próbkę

Źródło: Opracowanie własne

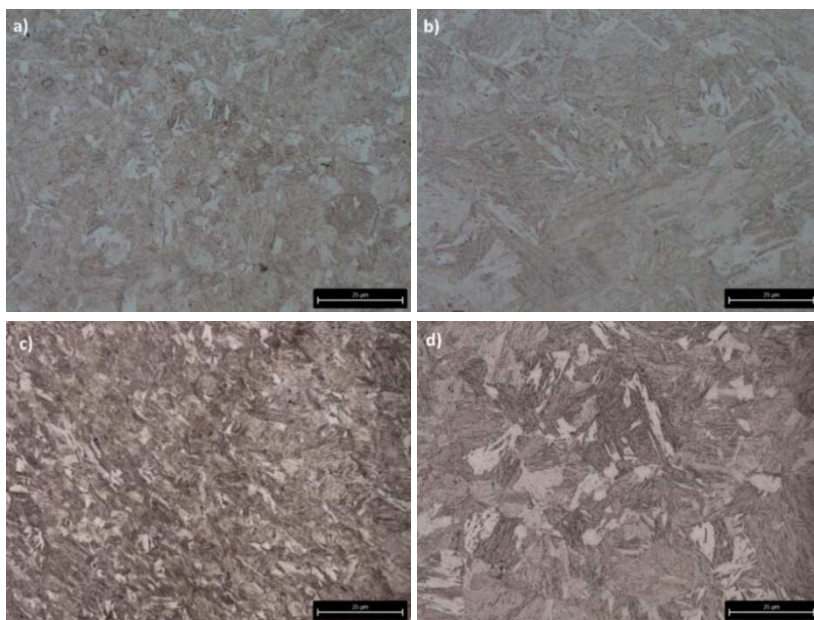
Próbki zostały opisane numerycznie:

- próbka 1 – referencyjna blacha HARDOX® 500 grubości 8 mm,
- próbka 4 – wkład metaliczny z HEA grubości 2 mm z wkładem ceramicznym Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grubości 6 mm,
- próbka 5 – wkład metaliczny z HEA grubości 3 mm z wkładem ceramicznym Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grubości 5 mm,
- próbka 6 wkład metaliczny z HARDOX® 450 grubości 2 mm z wkładem ceramicznym Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grubości 6 mm,
- próbka 7 wkład metaliczny z HARDOX® 450 grubości 3 mm z wkładem ceramicznym Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grubości 5 mm.

## Dyskusja wyników badań

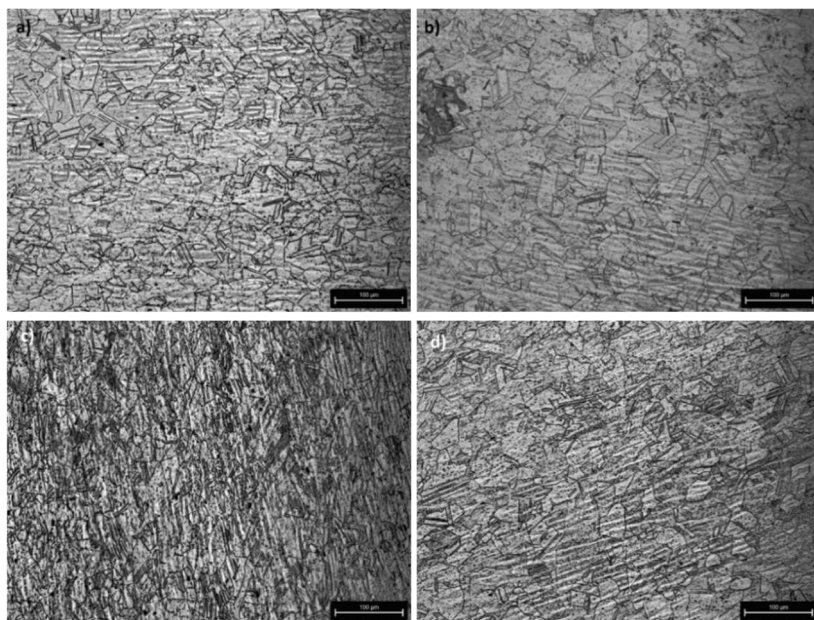
W celu analizy wpływu uderzenia pocisku na własności i mikrostrukturę wkładów metalicznych, wycięto fragmenty płaskowników z miejsca trafienia pocisku oraz z części nieodkształconej, następnie wykonano z nich zgłady metalograficzne. Analizę mikrostruktury wykonano za pomocą mikroskopu optycznego. Na *rys. 15.3* przedstawiono mikrostruktury HARDOX® 450, składające się z martenzytu odpuszczonego. Analizując mikrostrukturę płaskownika o grubości 3 mm w miejscu trafienia pocisku, zaobserwowano jedynie umiarkowaną deformację ziaren w pobliżu powierzchni. W przypadku próbki o grubości 2 mm mikrostruktura w miejscu przebiecia pociskiem uległa silnemu odkształceniu oraz rozdrobnieniu na przekroju całego płaskownika.

Mikrostruktura stopów HEA, przedstawiona na *rys. 15.4*, składa się z równosiowych ziaren z widocznymi bliźniakami wyżarzania, powstałymi w wyniku wpływu ciepła podczas walcowania i dogrzewania płaskowników. Trafienie pociskiem wpłynęło na mikrostrukturę HEA analogicznie jak na Hardox, silnie deformując oraz rozdrabniając ziarna w przypadku próbki o grubości 2 mm. Dodatkowo analiza mikrostruktury nie wykazała wystąpienia znaczących różnic w materiałach walcowanych na grubość 3 i 2 mm.



**Rysunek 15.3.** Zdjęcia mikrostruktur próbki HARDOX 450 a) 2 mm i b) 3 mm w miejscu nieodkształconym przez pocisk, c) 2 mm i d) 3 mm w miejscu trafienia pancerza przez pocisk

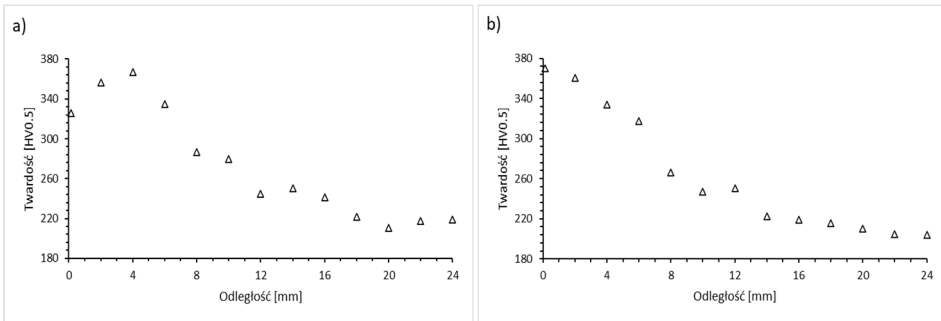
Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 15.4.** Zdjęcia mikrostruktur próbki HEA a) 2 mm i b) 3 mm w miejscu nieodkształconym przez pocisk, c) 2 mm i d) 3 mm w miejscu trafienia pancerza przez pocisk

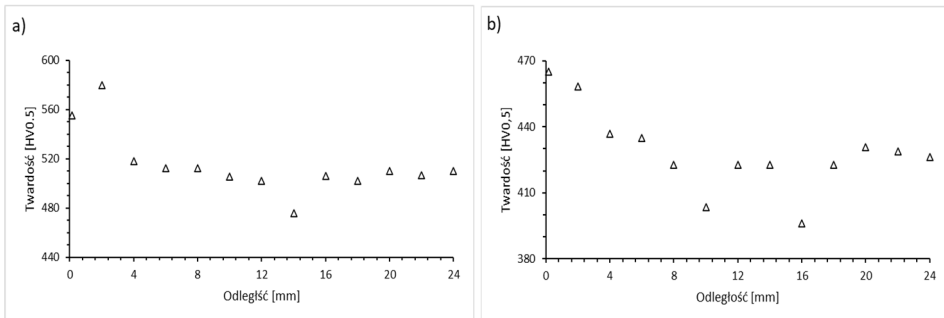
Źródło: Opracowanie własne

Przeprowadzono również pomiary twardości metoda Vickersa przy obciążeniu 0,5 kg. Wykonano po 13 pomiarów twardości, zaczynając od punktu w osi trafienia pocisku, wzdłuż przekroju płaskownika, wykonując każdy kolejny odcisk co 2 mm. Uzyskane wartości twardości dla stopów HEA przedstawiono na *rys. 15.5*, dla stali Hardox natomiast na *rys. 15.6*.



**Rysunek 15.5.** Wykres twardości w funkcji odległości od osi trafienia pocisku dla płaskownika HEA o grubości: a) 2 mm, b) 3 mm

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 15.6.** Wykres twardości w funkcji odległości od osi trafienia pocisku dla płaskownika Hardox o grubości: a) 2 mm, b) 3 mm

Źródło: Opracowanie własne

Otrzymane wartości twardości ukazują, że niezależnie od grubości zastosowane płaskowniki ze stopu wysokoentropowego uległy umocnieniu do wartości maksymalnej 370 HV0,5. Wraz z oddalaniem się miejsca trafienia twardości maleją, po przekroczeniu 15 mm stabilizując się do wartości  $217 \pm 5$  HV0,5 dla płaskownika o grubości 2 mm oraz  $212 \pm 7$  HV0,5 dla 3 mm. W przypadku płaskowników ze stali Hardox stopień umocnienia w wyniku trafienia pocisku jest zdecydowanie mniejszy. Dla płaskownika o grubości 2 mm maksymalna otrzymana twardość wyniosła 580 HV0,5 dla średniej twardości płaskownika wynoszącej  $504 \pm 11$  HV0,5, natomiast dla płaskownika 3 mm maksymalna twardość wyniosła 465 HV0,5, podczas gdy średnia twardość płaskownika wyniosła

$421 \pm 12$  HV0,5. Należy również zauważyć, że stabilizacja twardości dla Hardoxu wystąpiła już w odległości 5 mm od osi trafienia pocisku.

## Podsumowanie

Opracowany proces technologiczny pozwolił na wytworzenie skutecznych kompozytów z przeznaczeniem do osłon balistycznych o parametrach odporności zbliżonych do K3B według Polskiej Normy PN-V-87000:2011. Dwie próbki pozytywnie przeszły testy z wykorzystaniem wojskowej amunicji 5.56 x 45 z penetratorem z stali (typ SS109).

Wyniki prób balistycznych (*tab. 15.2*) oraz analiza mikrostruktury (*rys. 15.3 i 15.4*) i wykresu twardości (*rys. 15.5 i 15.6*) wykazały, że zaproponowany stop wysokoentropowy sprawdza się jako warstwa metaliczna do kompozytu tak jak komercyjna blacha stali trudnościeralnej Hardox, z tym, że w przypadku HEA występuje znacznie większe umocnienie materiału w miejscu odkształcenia, co motywuje do dalszych badań tego materiału jako wkładu kompozytu kuloodpornego oraz udoskonalania procesu dla osiągnięcia najbardziej optymalnych parametrów gotowego kompozytu.

## Podziękowania

*Podziękowania dla Sz. Pani Prezes Elżbiety Śreniawskiej za wykonanie przez Mesko SA testów balistycznych oraz dla Koła Naukowego Konstrukcji Militarynych „Adamantium” za pomoc w wykonaniu wkładu ceramicznego. Praca finansowana w ramach Grantu Rektora AGH nr 45/GRANT/2023.*

## Literatura

1. Pabich B. (2022), *Wpływ historii odkształcenia na wybrane własności stopu wysokoentropowego dla zastosowań militarynych*, praca dyplomowa, AGH, Kraków.
2. PN-V-87000:2011, Osłony balistyczne lekkie – Kamizelki kulo- i odłamkoodporne – Wymagania i badania.
3. U.S. Department of Justice, Federal Bureau of Investigation, *LEOKA – Law Enforcement Officers Killed and Assaulted*, <https://ucr.fbi.gov/leoka> (dostęp: 16.05.2023).
4. U.S. Department of Justice, National Institute of Justice (2008), Standard-0101.06: *Ballistic Resistance of Body Armor*, Office of Justice Programs.
5. U.S. Department of Justice, National Institute of Justice (2018), Standard-0101.07: *Changes to Test Methods and Test Threats*, Office of Justice Programs.

## Development of a Technology for Producing Multi-Layer Composite Armor based on High-Entropy and Ceramic Materials

**Abstract:** The aim of the chapter was to develop and produce a composite armor sample consisting of a ceramic layer and a sheet made of a high-entropy material, and then to test the quality of the armor by conducting ballistic tests. The research

procedure included selecting the chemical composition of the high-entropy material, producing it in the form of a casting, and then processing it plastically by forging and hot rolling. The process parameters were chosen to obtain sheets of 2 and 3 mm thickness without compromising the material's integrity. In the second stage of the work, the ceramic part of the armor was made from aluminum oxide. Finally, six different variants of armor samples were produced, including: only ceramic, ceramic combined with Hardox steel, and ceramic combined with the high-entropy material. The obtained samples were subjected to ballistic tests using small-caliber projectiles. The chapter presents both the results of these tests and the procedure for producing composite armor incorporating high-entropy material.

**Keywords:** armor, ballistic tests, high-entropy alloy, layered composites

## Rozdział 16

# Charakterystyka odporności korozyjnej materiałów stosowanych na układy wydechowe

Justyna Owczarek, Grzegorz Golański, Karina Jagielska-Wiaderek

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wyniki badań stali nierdzewnej oraz stopu tytanu pod kątem odporności na korozję tych materiałów w potencjalnym ich zastosowaniu na układy wydechowe. Na próbkach wyznaczono skład chemiczny oraz przeprowadzono badania potencjokinetyczne. Badania wykazały, że tytan jest lepszym materiałem stosowanym na układy wydechowe pod względem podatności na korozję.

**Słowa kluczowe:** korozyjność, stal nierdzewna, stopy tytanu, układy wydechowe

## Wprowadzenie

Jednym z podstawowych materiałów wykorzystywanych do produkcji układów wydechowych w samochodach osobowych są stale nierdzewne. Zastosowanie tych materiałów wynika głównie z ich bardzo dobrej odporności korozyjnej, a także dobrych własności mechanicznych i technologicznych. Tytan i jego stopy to materiały o niższej gęstości niż stal, dzięki czemu możliwa jest redukcja masy całego pojazdu, co znacznie poprawia osiągi samochodów sportowych. Tytan charakteryzuje się wyższą wartością wytrzymałości właściwej oraz właściwym modułem sprężystości, przy lepszej odporności korozyjnej w porównaniu ze stalą nierdzewną. Wpływa to na trwałość całego układu, a tym samym zmniejsza koszty konserwacji i wymiany. Tytanowe układy wydechowe charakteryzują się dużą przepustowością, dzięki czemu spaliny w łatwiejszy i szybszy sposób mogą swobodnie przepływać przez cały układ (Idzior i in. 2017).

## Materiał do badań

Materiałem do badań były próbki ze stopu tytanu oraz ze stali nierdzewnej o składzie chemicznym przedstawionym w *tab. 16.1* i *16.2*. Skład chemiczny tytanu odpowiada gatunkowi 3,7035, natomiast stali gatunku X5CrNi18-10.



**Tabela 16.1. Skład chemiczny stopu tytanu, % masy**

Ti	C	Nb	Cr	Fe	Ni
99,788	0,117	0,011	0,015	0,052	0,017

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 16.2. Skład chemiczny stali nierdzewnej, % masy**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,05	0,42	1,64	0,022	0,001	17,49	9,19

Źródło: Opracowanie własne

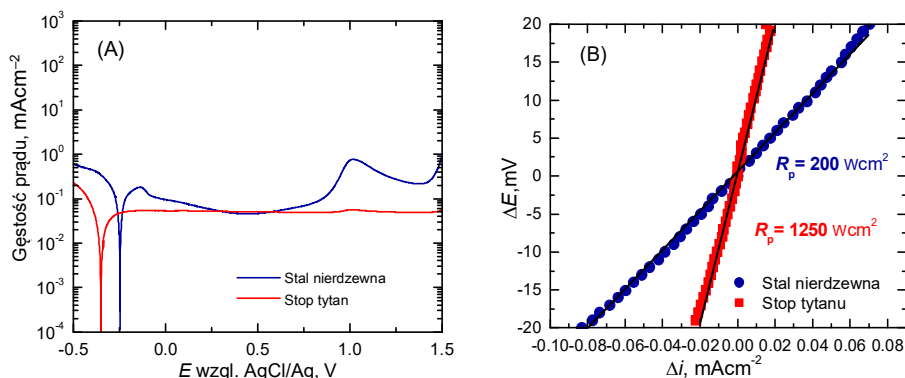
## Metodyka badań

Do badań potencjokinetycznych użyto próbek w postaci wirujących dysków o powierzchni roboczej  $0,2 \text{ cm}^2$ . Wszystkie pomiary wykonywano w temperaturze  $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ , przy prędkości obrotowej dysku równej 12 obr/s i szybkości skaningu potencjału 10 mV/s. Dokonano oceny odporności na korozję ogólną, wykreślając krzywą potencjokinetyczną w zakresie od  $-0,5$  do  $1,5 \text{ V}$  w napowietrzonym  $0,5 \text{ M}$  roztworze  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , zakwaszonym do wartości  $\text{pH} = 2$ . W celu określenia podatności materiałów na korozję wżerową do ww. roztworu korozyjnego wprowadzono dodatkowo jony  $\text{Cl}^-$  o trzech różnych stężeniach:  $0,2$ ;  $0,6$  i  $0,8 \text{ mol/dm}^3$ . Przy czym dla wyznaczenia wartości potencjałów zarodkowania wżerów ( $E_{\text{pit}}$ ) zastosowano metodę jednokierunkowych krzywych polaryzacji, rozpoczynając ich rejestrację od wartości katodowych  $E_{\text{pocz}} = -0,5 \text{ V}$ , a kończąc pomiar po przebicciu warstwy pasywnej i osiągnięciu przez prąd anodowy wartości kilku  $\text{mA/cm}^2$ . Dla wyznaczenia potencjału repasywacji ( $E_{\text{rp}}$ ) zastosowano przebiegi dwukierunkowe, odwracając kierunek przesuwu potencjału po osiągnięciu anodowego prądu przebiccia na poziomie  $10 \text{ mA/cm}^2$ . Jako potencjał repasywacji przyjmowano punkt przecięcia krzywej powrotnej z krzywą narastającą w zakresie pasywnym, analogicznie do sposobu opisanego np. w pracach K. Jagielskiej-Wiaderek (Jagielska-Wiaderek i in. 2009; Jagielska-Wiaderek 2012). Wartości wszystkich potencjałów elektrodowych wyrażone są względem elektrody chlorosrebrowej, dla której  $E_{\text{AgCl/Ag}}^{\text{równ}} = 0,222 \text{ V}$ .

## Wyniki badań i dyskusja

Otrzymane dla stopu tytanu oraz stali nierdzewnej krzywe polaryzacji wykonane w  $0,5 \text{ M}$  roztworze  $\text{H}_2\text{SO}_4$  zakwaszonym do  $\text{pH} = 2$  oraz wyznaczone na ich podstawie wartości oporu polaryzacji, będącego miarą szybkości korozji, przedstawiono na rys. 16.1.





**Rysunek 16.1.** a) Potencjokinetyczne krzywe polaryzacji dla stali nierdzewnej i stopu tytanu, b) Pomiary polaryzacji liniowej  $\Delta E = E - E_{kor} = f(i_{zew})$  dla tych materiałów

Źródło: Opracowanie własne

Jak wynika z przebiegu krzywych polaryzacji (rys. 16.1a), zarówno stal nierdzewna, jak i stop tytanu wykazują w zastosowanym środowisku korozyjnym bardzo dobre własności korozyjne. Dla obu materiałów obserwuje się po stronie anodowej szeroki zakres potencjałów, w którym występuje stan pasywny, a mierzona gęstość prądu pomimo wzrastającego potencjału utrzymuje się na stałym poziomie. Jak wiadomo, im wyższa wartość potencjału korozyjnego ( $E_{kor}$ ) i niższe wartości prądów anodowych, tym wyższą odpornością na działanie środowiska korozyjnego odznacza się materiał (Bala 2002). Stal nierdzewna pomimo późniejszego przejścia w stan aktywny wykazuje nieznacznie wyższą wartość krytycznego prądu pasywacji ( $i_{kp}$ ), którego wielkość świadczy o nieco trudniejszym przejściu w stan pasywny. Materiał ten wykazuje również węższy zakres potencjałów, przy których warstwa pasywna jest stabilna. Od potencjału ok. 0,75 V na wykresie obserwuje się już przejście powierzchni stali nierdzewnej w zakres transpasywny, związany z przebudową i osłabieniem własności ochronnych warstw tlenkowych. Z kolei dużą stabilnością warstwy pasywnej odznacza się badany stop tytanu. Jak wynika z rys. 16.1, w zastosowanym środowisku korozyjnym materiał ten łatwo przechodzi w stan pasywny, a prąd anodowy utrzymuje się na stałym, niskim poziomie. Na rys. 16.1b przedstawiono zależność  $\Delta E = f(\Delta i)$  w pobliżu potencjału korozyjnego. Zgodnie z równaniem Sterna-Hoara (Cottis, Shreir 2010) dla potencjałów nieznacznie różniących się od potencjału korozyjnego, zwykle  $E_{kor} = \pm 20$  mV, gęstość prądu zewnętrznego jest liniową funkcją potencjału, a nachylenie odpowiednich prostych miarą oporu polaryzacji ( $R_p$ ).

$$R_p = (\Delta E / \Delta i)_{E_{kor}} \quad (1)$$

Przyjmując formalnie  $b_a = \infty$  i  $b_k = 0,12$  V, znajdujemy:

$$i_{kor} = \frac{b_a b_k}{2,3(b_a + b_k)} = \frac{0,052[\text{V}]}{R_p} \quad (2)$$

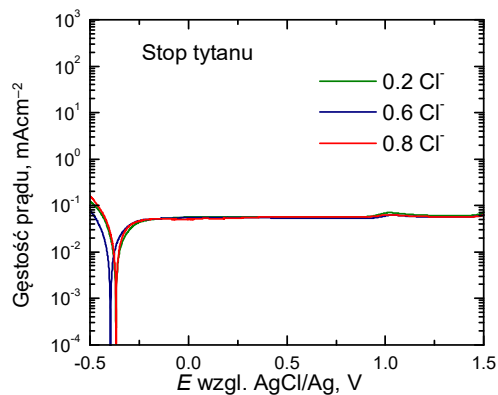
W *tab. 16.3* przedstawiono charakterystyczne wielkości elektrochemiczne odczytane z krzywych polaryzacji (*rys. 16.1a*) oraz wartości oporu polaryzacji  $R_p$ , którego odwrotność jest proporcjonalna do gęstości prądu korozyjnego.

**Tabela 16.3. Parametry odporności korozyjnej stali nierdzewnej i stopu tytanu w środowisku 0,5M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o pH = 2**

	$E_{kor}$ [V]	$i_{kp}$ [mAcm <sup>-2</sup> ]	$i_{pas}$ [mAcm <sup>-2</sup> ]	$R_p$ [Ωcm <sup>2</sup> ]	$i_{kor}$ [mAcm <sup>2</sup> ]
Stal nierdzewna	-0,20	0,2	0,05	200	0,26
Stop tytanu	-0,30	0,05	0,05	1250	0,05

Źródło: Opracowanie własne

Dla oceny podatności badanych materiałów na korozję wżerową wykonano krzywe polaryzacji w 0,5 M roztworach siarczanowych zawierających jony Cl<sup>-</sup>. Odpowiednie krzywe polaryzacji dla stopu tytanu przedstawiono na *rys. 16.3*.



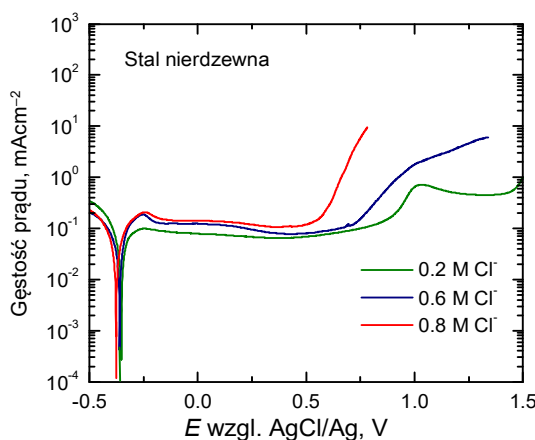
**Rysunek 16.3.** Potencjokinetyczne krzywe polaryzacji wykonane dla stopu tytanu w zakwaszonym środowisku siarczanowym zawierającym różne stężenia jonów chlorkowych

Źródło: Opracowanie własne

Przedstawione na *rys. 16.3* krzywe polaryzacji potwierdziły wysoką odporność tytanu na korozję wżerową. Przy zastosowanych stężeniach jonów chlorkowych nie zaobserwowano ich wyraźnego wpływu na przebiegi krzywych w zakresie pasywnym. Nie obserwuje się tym samym uszkodzenia warstwy tlenkowej i związanego z tym charakterystycznego potencjału przebicia ( $E_{pit.}$ )

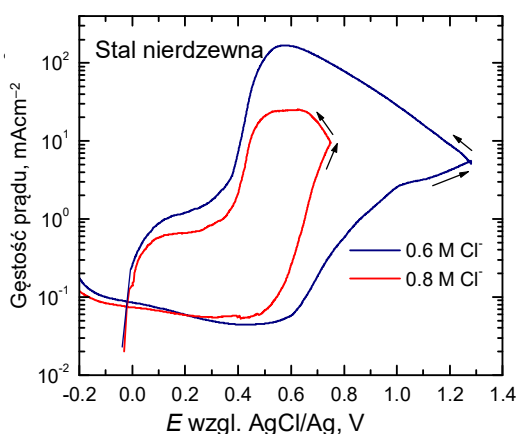
Stal nierdzewna, pomimo swojej odporności korozyjnej, nie wykazuje aż tak wysokiej jak tytan odporności na działanie jonów chlorkowych. Przykładowo w roztworze Hanksa potencjał przebicia dla stopu tytanu wynosi 1,9 V, podczas gdy dla austenitycznej stali nierdzewnej zaledwie 0,28V (Leda 2011).

Na rys. 16.4 i 16.5 przedstawiono przebiegi krzywych potencjokinetycznych dla stali nierdzewnej w środowiskach o różnym stężeniu jonów chlorkowych. Jak można było oczekiwać, zwiększanie stężenia jonów  $\text{Cl}^-$  w roztworze ułatwia zarodkowanie wżerów, a więc i niższe wartości przyjmuje potencjał przebicia ( $E_{\text{pit}}$ ). W zastosowanych roztworach nie zaobserwowano jednak istotnego wpływu stężenia jonów chlorkowych na potencjał repasywacji. Przyjmuje on bardzo zbliżone wartości, niezależnie od zastosowanych stężeń jonów  $\text{Cl}^-$  (rys. 16.5).



**Rysunek 16.4.** Potencjokinetyczne krzywe polaryzacji wykonane dla stali nierdzewnej w zakwaszonym środowisku siarczanowym zawierającym różne stężenia jonów chlorkowych

Źródło: Opracowanie własne

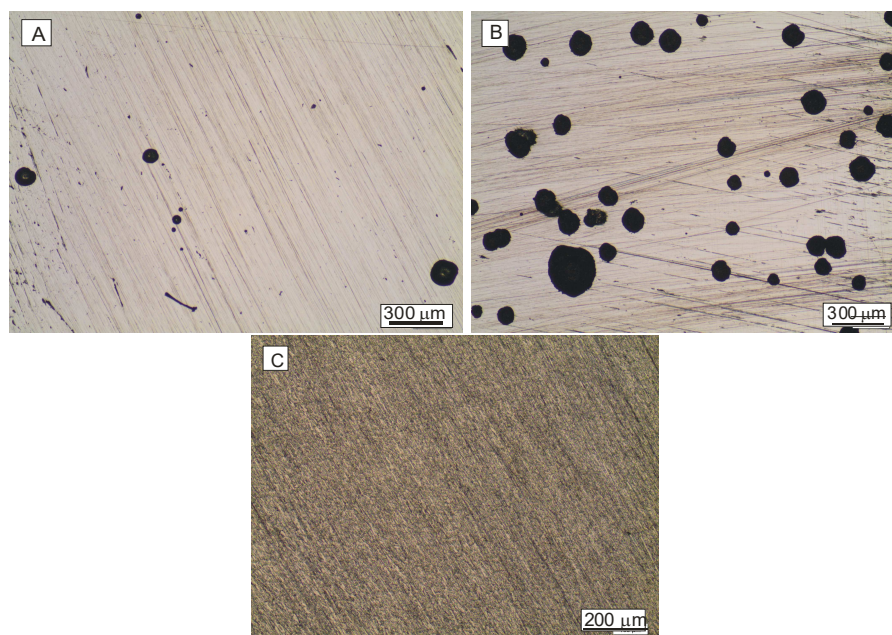


**Rysunek 16.5.** Potencjokinetyczne krzywe dwukierunkowe wykonane dla stali nierdzewnej w zakwaszonym środowisku siarczanowym zawierającym różne stężenia jonów chlorkowych

Źródło: Opracowanie własne

Jak widać na *rys. 16.5*, dla stali nierdzewnej odwrócenie kierunku przesuwu potencjału po osiągnięciu prądu anodowego na poziomie ok.  $10 \text{ mA/cm}^2$  początkowo powoduje dalszy wzrost gęstości prądu, co świadczy o intensywnym roztwarzaniu powierzchni. Należy jednak zauważyć, że powyżej  $E_{\text{pit}}$  krzywa dla stężenia  $0,6 \text{ M Cl}^-$  wykazuje najmniejszą stromość, co świadczy o małej szybkości rozwoju wżerów. Stromość krzywej dla stężenia  $0,8 \text{ M}$  jonów chlorkowych jest natomiast znacznie większa, co jest efektem intensywnego procesu rozwoju wżerów. Jak wiadomo, termodynamiczna podatność materiału na korozję wżerową jest tym większa, im niższy potencjał zarodkowania wżerów ( $E_{\text{pit}}$ ) (Szkłarska-Śmiałowska 2005).

Dla obu analizowanych stężeń jonów  $\text{Cl}^-$  spadek gęstości prądu widoczny jest dopiero od potencjału ok.  $0,4 \text{ V}$ . Dodatkowo na ostatnim etapie rejestracji krzywych ich przebiegi są na tyle zbliżone, że nie obserwuje się różnic w wartościach potencjału repasywacji. Na *rys. 16.6* przedstawiono najbardziej reprezentatywne zdjęcia powierzchni stali nierdzewnej wykonane po przekroczeniu potencjału  $E_{\text{pit}}$  i osiągnięciu prądu na poziomie ok.  $10 \text{ mA/cm}^2$  (*rys. 16.6a*) oraz przy potencjale  $0,45 \text{ V}$  (*rys. 16.6b*), po ich ekspozycji w roztworze siarczanowym zawierającym  $0,6 \text{ M Cl}^-$  ( $\text{pH} = 2$ ). Dla porównania na *rys. 16.6c* przedstawiono pozbawiony wżerów wygląd powierzchni stopu tytanu po wykonanym teście korozyjnym w tym samym środowisku.



**Rysunek 16.6.** Powierzchnia próbek po teście korozyjnym w  $0,5 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$  ( $\text{pH} = 2$ ) +  $0,6 \text{ M Cl}^-$  ( $\text{pH} = 2$ ) charakterystyczna dla: a) gęstości prądu ok.  $10 \text{ mA/cm}^2$  przy potencjale  $E = 0,45 \text{ V}$ , b) stali nierdzewnej, c) stopu tytanu po wykreśleniu pełnej krzywej polaryzacji

Źródło: Opracowanie własne

Jak wynika z przedstawionych zdjęć (*rys. 16.6a i 16.6b*), po przeprowadzonym teście korozyjnym pomimo odwrócenia kierunku potencjału zarówno liczba wżerów, jak i ich wielkość intensywnie wzrasta. Podkreślić jednak należy, że – pomimo zmniejszonej odporności materiału na szybkość rozwoju wżerów wraz ze wzrostem agresywności środowiska – wartość potencjału repasywacji pozostaje niezmienna. Stałość  $E_{rp}$  skutkuje mniejszą histerezą potencjałowo-prądową dla środowisk, dla których potencjał przebicia jest najniższy. W tym kontekście, pomimo wzrostu podatności na korozję wżerową wraz ze wzrostem agresywności korozyjnej środowiska, zniszczenia powierzchni wywołane korozją nie powinny intensywnie wzrastać.

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- zarówno badana stal nierdzewna, jak i stop tytanu wykazują w zastosowanym środowisku korozyjnym bardzo dobre własności korozyjne;
- stop tytanu, poddany badaniom charakteryzuje się wysoką odpornością na korozję wżerową, w porównaniu do badanej stali nierdzewnej.

## Literatura

1. Bala H. (2002), *Korozja materiałów*, Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
2. Cottis R.A., Sheir L.L. (2010), *Shreir's Corrosion*, 2, s. 1466-1467, Academic Press / Elsevier, Amsterdam.
3. Idzior M., Karpiuk W., Bor M., Smolec R. (2017), *Nowoczesne technologie stosowane w silniczkach motocyklowych*, „Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, 6, s. 743-748.
4. Jagielska-Wiaderek K. (2012), *Struktura warstw wierzchnich obrobionych cieplno-chemicznie stali nierdzewnych i ich podatność na korozję lokalną*, „Ochrona przed Korozją”, 11, s. 491-494.
5. Jagielska-Wiaderek K., Bala H., Rudnicki J. (2009), *Elektrochemiczne charakterystyki odporności na korozję wżerową azotowanej jarzeniowo stali austenitycznej*, „Ochrona przed Korozją”, 4-5, s. 123-127.
6. Leda H. (2011), *Tytan i jego stopy. Materiały inżynierskie w zastosowaniu biomedycznym*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, s. 176-204.
7. Szklarska-Śmiałowska Z. (2005), *Pitting and Crevice Corrosion*, NACE, Houston.

## Characteristics of Corrosion Resistance of Materials Used for Exhaust Systems

**Abstract:** The chapter presents the results of testing stainless steel and titanium alloy in terms of corrosiveness of these materials. The chemical composition of the samples was determined and potentiokinetic tests were carried out. The conducted tests showed that titanium is a better material used for exhaust systems in terms of susceptibility to corrosion.

**Keywords:** corrosivity, exhaust systems. stainless steel, titanium alloys

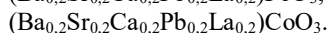
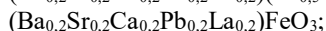
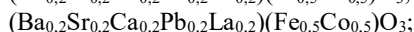
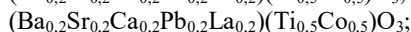
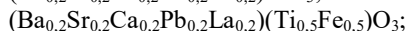
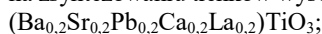
## Rozdział 17

# Synteza i badanie tlenków wysokoentropowych (HEO) jako materiałów o dużym potencjale w technice termoelektrycznej

Michał Kozanecki

Politechnika Gdańska  
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej

**Streszczenie:** Tematyką niniejszego rozdziału jest opis syntezy tlenków wysokoentropowych oraz pokazanie ich potencjału jako materiałów do budowy termogeneratorów. W pracy zsyntetyzowano 8 przedstawicieli tej grupy związków, o składzie chemicznym zapewniającym wysoki współczynnik Seebecka. Badania polegały na zsyntezowaniu tlenków wysokoentropowych o wzorach:



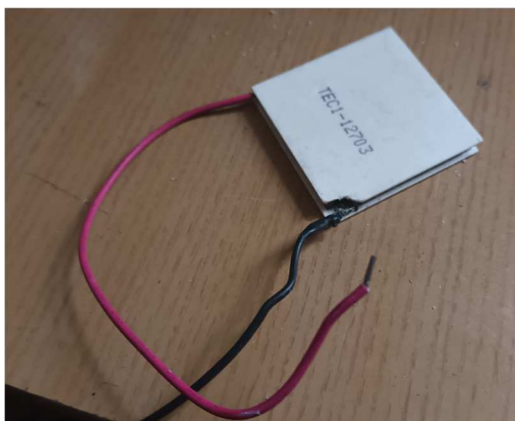
Główną motywacją przeprowadzonych badań było wytworzenie tanich oraz efektywnych materiałów, które można by wykorzystać do budowy termogeneratorów. W rozdziale przedstawiono i opisano proces syntezy w fazie stałej. Zaprezentowano również warunki syntezy i problemy wynikłe podczas przeprowadzonych syntez oraz możliwe rozwiązania problemów, a także pomiary współczynnika Seebecka próbki o wzorze:  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{TiO}_3$  w różnych temperaturach. Podczas badań termoelektrycznych otrzymano bardzo wysoki współczynnik Seebecka, dochodzący do  $-3000 \frac{\mu\text{V}}{\text{K}}$  w temperaturze 750 K. Z przedstawionych badań wynika, że badane tlenki wysokoentropowe posiadają duży potencjał do zastosowania w urządzeniach wykorzystujących zjawiska termoelektryczne.

**Słowa kluczowe:** entropia, termoelektryk, tlenek wysokoentropowy, współczynnik Seebecka

## Wstęp

Generatory termoelektryczne (TEG) są urządzeniami konwertującymi ciepło odpadowe na energię elektryczną. Mogą stać się ważnymi źródłami zasilania dla

elektroniki o niskim poborze prądu. Jest to spowodowane tym, że TEG są ciche oraz kompaktowe, przez co zajmują mało miejsca. Nie bez znaczenia jest również ich niska masa, która jest istotna zwłaszcza w kontekście zastosowań w transporcie (Lan i in. 2022) i lotnictwie (Dilhac i in. 2014; Becker i in. 2015). Termogeneratory są technologią, która może znaleźć szerokie zastosowanie w czasach kryzysu klimatycznego. Na zdjęciu (rys. 17.1) przedstawiono komercyjnie dostępny generator TEG.



**Rysunek 17.1.** Komercyjnie dostępny moduł Peltiera

Źródło: Opracowanie własne

Podstawą działania generatorów termoelektrycznych jest zjawisko Seebecka, które polega na generowaniu różnicy potencjałów  $\Delta V$  pod wpływem różnicy temperatur  $\Delta T$  na końcach próbki. Zjawisko jest scharakteryzowane poprzez współczynnik Seebecka:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1)$$

Współczynnik Seebecka jest stałą charakterystyczną dla danego materiału. W mikroskali zjawisko Seebecka można wyjaśnić poprzez nałożenie dwóch efektów: z jednej strony poprzez dyfuzję nośników ładunku z obszaru cieplejszego, gdzie nośniki ładunku mają większą energię, do obszaru zimniejszego o mniejszej energii nośników (Markowski 2008). W ten sposób po stronie zimniejszej powstaje nadmiarowy ładunek elektryczny. Drugi efekt jest związany z powstaniem gradientu temperatury i tym samym z dyfuzją fononów, które następnie zderzają się z nośnikami ładunków i zmuszają je do poruszania się w kierunku zimniejszej strony. W ten sposób następuje zwiększenie nadmiaru ładunku po stronie zimniejszej. Z powodu występowania obu przedstawionych efektów pod wpływem gradientu temperatury na końcach próbki powstaje różnica potencjałów. Generatory termoelektryczne składają się z szeregu małych termopar, które to z kolei składają się ze złącza metalicznego oraz dwóch półprzewodników typu p i n (Jaziri i in.



2020). Okładki takiego termogeneratora są najczęściej wykonane z materiałów izolujących wytrzymujących wysokie temperatury, takich jak  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Jakość użytych materiałów do budowy termogeneratorów opisuje współczynnik ZT. Współczynnik ten łączy trzy najważniejsze parametry dla termoelektryków: przewodność cieplną ( $\kappa$ ), przewodność elektryczną ( $\sigma$ ) oraz współczynnik Seebecka ( $S$ ). Współczynnik ZT jest przedstawiony poniższym wzorem:

$$ZT = \frac{S^2\sigma}{\kappa} \quad (2)$$

Jak wynika ze wzoru (2), im większa przewodność cieplna, tym mniejszy współczynnik ZT, z kolei im większa przewodność elektryczna oraz współczynnik Seebecka, tym współczynnik ZT staje się większy. Należy przy tym podkreślić, że współczynnik Seebecka jest w drugiej potęgce, ma więc on nadrzędne znaczenie. Współcześnie najczęściej stosowanymi materiałami są związki na bazie  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (Królicka i in. 2012). Niestety obecne generatory termoelektryczne charakteryzują się niską sprawnością – rzędu 5-8%. Jednym ze sposobów poprawy sprawności takich generatorów jest zastosowanie nowych materiałów o wysokim współczynniku ZT. Klasą materiałów posiadających właściwości, które są pożądane z punktu widzenia zastosowań termoelektrycznych, są tlenki wysokoentropowe (HEO).

## Tlenki wysokoentropowe

Tlenki wysokoentropowe to tlenki najczęściej o strukturze perowskitu ( $\text{ABO}_3$ ), gdzie A i B są podsięciami struktury krystalicznej. W tlenkach wysokoentropowych występuje przynajmniej pięć różnych pierwiastków w jednej podsięci. Związki te są stabilizowane za pomocą wysokiej entropii zgodnie z prawem Gibbsa:

$$\Delta G = H - T\Delta S \quad (3)$$

gdzie:  $H$  – entropia,  $T$  – temperatura,  $\Delta S$  – entropia

Wysoka entropia sprawia, że energia swobodna jest minimalna, dzięki czemu otrzymuje się stabilny jednofazowy układ. Z powyższego wynika również, że im większa liczba jonów w strukturze krystalicznej, tym układ jest stabilniejszy. Innym ważnym parametrem strukturalnym wykorzystywanym w opisie tychże związków jest współczynnik Goldschmidta. Współczynnik ten pozwala przewidywać wygląd struktury krystalicznej. Jest dany przez wzór (Banerjee i in. 2020):

$$t = \frac{r_A - r_O}{\sqrt{2}(r_B + r_O)} \quad (4)$$

gdzie  $r_A$  – średni promień kationów w podsięci A,  $r_B$  – średni promień kationów w podsięci B,  $r_O$  – promień anionu tlenowego.

Średnie arytmetyczne promieni kationów  $r_A$  oraz  $r_B$  występują odpowiednio w podsięci A i B. Gdy współczynnik  $t$  jest pomiędzy 0,9 a 1, występuje



struktura kubiczna; jeśli  $t$  jest powyżej 1, wtedy występuje struktura tetraedryczna lub heksagonalna. Wreszcie gdy  $t < 0,9$ , wówczas występuje struktura romboedryczna lub oktaedryczna. Mnogość różnych kationów w podsieci związku sprawia, że struktura krystaliczna jest bardzo zniekształcona, co utrudnia przepływ fononów. To z kolei zmniejsza przewodnictwo termiczne i tym samym zwiększa współczynnik ZT. Jednak aby struktura krystaliczna była stabilna, kationy nie powinny różnić się znacząco od siebie wartościowością, ponieważ przy dużych różnicach w wartościowości oddziaływania elektrostatyczne zaczynają odgrywać większą rolę i marginalizują wpływ wysokiej entropii na stabilność związku.

## Przewodnictwo w tlenkach wysokoentropowych

Przewodnictwo w tlenkach wysokoentropowych jest przewodnictwem mieszanym jonowo-elektronowym. Przewodnictwo jonowe odbywa się poprzez mechanizm hoppingowy, gdzie nośnikiem ładunku jest anion tlenowy przeskakujący w lokalne minima energetyczne. Minimami energetycznymi będą puste miejsca po anionach tlenowych (wakanse). Dla wysokiego przewodnictwa jonowego kluczowe jest zapewnienie dużej liczby wakansów w strukturze kryształu. W tym celu w tlenkach wysokoentropowych umieszcza się kationy pierwiastków międzymetalicznych o zmiennej walencyjności, które pod wpływem wysokiej temperatury zmniejszają swój stopień utlenienia, zwiększając tym samym liczbę wakansów tlenowych. Takimi kationami są między innymi Ti, Co, Fe.

Oprócz przewodnictwa jonowego zwykle występuje również przewodnictwo elektronowe, zachodzące przez mechanizm pasmowy oraz poprzez hopping elektronów, zwany hoppingiem małych polaronów. Zniekształcona struktura krystaliczna utrudnia przewodnictwo elektronowe, zmniejszając tym samym jego składową. Całkowitą przewodność elektryczną w HEO opisuje relacja Arrheniusa, przedstawiona poniższym wzorem:

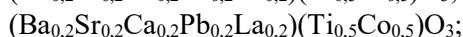
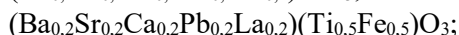
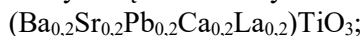
$$\sigma = \frac{\sigma_0}{T} \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (5)$$

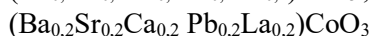
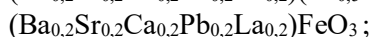
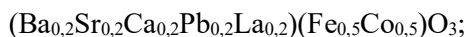
gdzie  $\sigma_0$  – czynnik przed eksponencjalny,  $T$  – temperatura,  $E_a$  – energia aktywacji,  $k$  – stała Boltzmanna.

Z powyższego wzoru można wyznaczyć energię aktywacji  $E_a$ . Jest to energia potrzebna do zajścia hoppingu jonu tlenowego i jest charakterystyczna dla danego materiału.

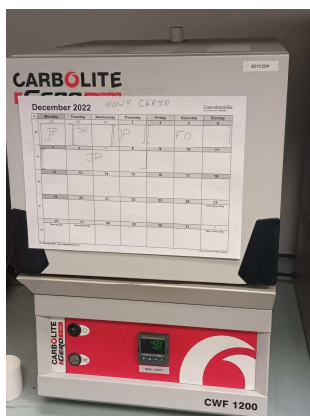
## Synteza tlenków wysokoentropowych

Syntezę tlenków wysokoentropowych o wzorach:





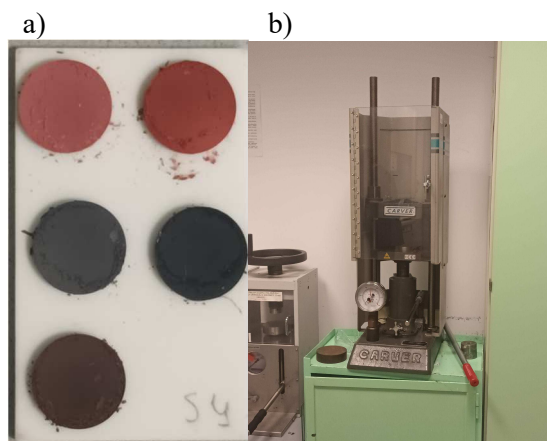
przeprowadzono metodą syntezy w fazie stałej. W programie Excel wyliczono naważki, następnie dla każdego związku odważono po dwie próbki, każda o masie 5 g. Następnie każdą z próbek osobno przesypano do moździerzy agatowych i ucierano przez około 10 min. Każdą z wstępnie zmielonych próbek umieszczono w młyńcu kulowym. Młyn kulowy umożliwia włożenie tylko 2 kubeczków w tym samym czasie. W celu zmielenia próbek utarty proszek przesypano do ceramicznych kubeczków i zasypano ceramicznymi kulkami zrobionymi z  $\text{ZrO}_2$  w stosunku 1 : 3 (masa proszku : masa kulek). Całość zalano izopropanolem i wstawiono do młyna na 600 obrotów/min, na 24 godziny. Następnego dnia wyjęto pierwszą partię próbek i wylano każdą z próbek na oddzielną szalkę. Pozostałości, które osadziły się na kubeczku, zeskrobano metalową szpatułką. Całość pozostawiono do wyschnięcia. W międzyczasie włożono kolejną partię próbek, która została uprzednio przygotowana tak jak poprzednia partia, warunki mielenia również ustawiono tak samo jak dla poprzedniej partii. Tak jak w przypadku pierwszej partii kolejną również wylano na oddzielne szalki. Gdy wszystkie próbki wyschły, z każdej szalki zeskrobano powstałe osady i ponownie każdą próbkę oddzielnie zmielono w moździerzu. Następnie każdą ze startych próbek umieszczono w oddzielnych ceramicznych łożeczkach i włożono do pieca komorowego (Carbolite Gero CWF1200) w celu usunięcia  $\text{CO}_2$  z próbek. Piec zaprogramowano na  $1200^\circ\text{C}$ , przy prędkości grzania 5 stopni na minutę. Od momentu uzyskania przez piec temperatury  $1200^\circ\text{C}$ , piec utrzymywał tę temperaturę przez 4 godziny. Po 4 godzinach rozpoczęło się chłodzenie do  $30^\circ\text{C}$  z prędkością 5 stopni na minutę. Użyty piec przedstawiono na rys. 17.2.



Rysunek 17.2. Piec użyty do wypiekania próbek

Źródło: Opracowanie własne

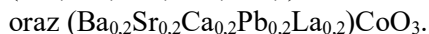
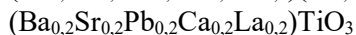
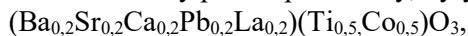
Po procesie wypiekania każdą z próbek ponownie utarto w moździerz, a następnie przesypano do specjalnej cylindrycznej formy i wstawiono do prasy hydraulicznej w celu uzyskania pastylek. Wyjątek stanowiła tu próbka  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{TiO}_3$ , którą włożono do prostokątnej formy. W prasie hydraulicznej dla każdej próbki użyto nacisku ok. 2 t. użytą prasę oraz wytworzone za jej pomocą pastylki przedstawiono na *rys. 17.3*.



**Rysunek 17.3.** a) Wytworzone pastylki związków  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})(\text{Ti}_{0,5}\text{Fe}_{0,5})\text{O}_3$ ;  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})(\text{Ti}_{0,5}\text{Co}_{0,5})\text{O}_3$ ;  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})(\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5})\text{O}_3$ ;  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{FeO}_3$ ;  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{CoO}_3$ . b) Prasa hydrauliczna Carver, za pomocą której wytworzono pastylki

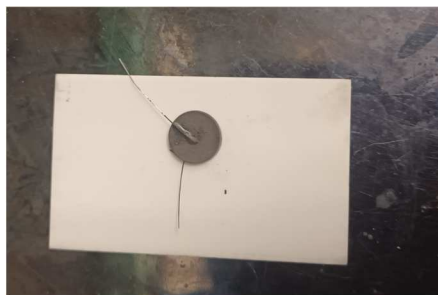
Źródło: Opracowanie własne

Gdy z każdej próbki utworzono pastylki, włożono je do pieca przepływowego na II etap syntezy. Wypiekanie w piecu przeprowadzono w atmosferze argonu przy przepływie  $\sim 20$  ml/min, w temperaturze  $1200^\circ\text{C}$ , temperaturę tą utrzymywano przez 2 godziny, a następnie chłodzono materiał do temperatury pokojowej, z prędkością chłodzenia  $-3$  stopni na minutę. Z powodu występowania warunków redukcyjnych w atmosferze argonowej doszło do redukcji stopnia utlenienia Fe, Co, oraz Ti, co spowodowało powstanie wakansów. Niestety podczas badań część próbek stopiła się, przez co ich dalsza obróbka stała się niemożliwa. Stopienie się próbek wynikało prawdopodobnie z niewłaściwie dobranej temperatury spiekania. Jednak trzy próbki przetrwały, były to związki:



Pastylki, które przetrwały, pomalowano z obu stron pastą platynową oraz doczepiono do nich platynowe druty po obu stronach. W przypadku

$(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{TiO}_3$  przyklejono cztery elektrody, dwie na krótszych bokach oraz dwie na dłuższym boku, w niewielkim odstępnie od siebie. Następnie pastylki z drutami wygrzewano na hot placie przez 20 min z obu stron. Po wygrzewaniu platynowe druty były silnie przymocowane do okrągłych pastylek. Zdjęcie przedstawiające pastylki z przymocowanymi drutami przedstawiono na *rys. 17.4*.



**Rysunek 17.4.** Pastylka  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})(\text{Ti}_{0,5}\text{Co}_{0,5})\text{O}_3$  z przyklejonymi elektrodami

Źródło: Opracowanie własne

Tak przygotowane pastylki są gotowe do pomiarów. Dla pozostałych związków które się stopiły, naważono nowe próbki, starto je, a następnie wypieczono w I etapie i utworzono z nich pastylki, przy tych samych parametrach jak uprzednio.

### Pomiary współczynnika Seebecka związku $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{TiO}_3$

Wykonano badania współczynnika Seebecka związku o wzorze  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{TiO}_3$ . Badania wykonano na aparaturze LSR-3 firmy Linseis, której zdjęcie przedstawiono na *rys. 17.5*.



**Rysunek 17.5.** Aparatura użyta do pomiarów współczynnika Seebecka

Źródło: Opracowanie własne

Próbkę umieszczano w komorze na wysięgniku i ustabilizowano za pomocą dwóch zacisków. Do dwóch elektrod umieszczonych na dłuższym boku przyłożono dwie termopary szczytujące temperaturę z jednoczesnym pomiarem potencjału elektrycznego. Po uruchomieniu aparatury na dwóch zaciskach generowany był gradient temperatury. Badania przeprowadzono w szerokim zakresie temperatur od 773 K do 1067 K. Program wyliczał współczynnik Seebecka ze wzoru:

$$S = \frac{-V_{th}}{T_d - T_g} \quad (6)$$

$S$  – współczynnik Seebecka,  $V$  – napięcie między elektrodami,  $T_d$  – temperatura dolnej elektrody,  $T_g$  – temperatura górnej elektrody.

Pomiary przeprowadzono w dwóch atmosferach: suchej i mokrej. Wyniki pomiarów zostały przedstawione poniżej:

**Tabela 17.1. Wyniki pomiarów współczynnika Seebecka (S) oraz napięcia (U) przy występowaniu różnicy temperatur  $\Delta T$  dla atmosfery suchego powietrza**

U [uV]	$\Delta T$ [K]	$T_{\text{średnie}}$ [K]	S [uV/K]
7709	-7,5	1067,15	-1027,867
2801	-7,6	1018,15	-368,553
1998,07	-7,5	969,30	-266,409
3188,67	-7,9	920,30	-403,629
13 758,32	-8	871,35	-1719,790
21 476,03	-8,4	822,15	-2556,670
24 823,31	-8	773,25	-3102,913

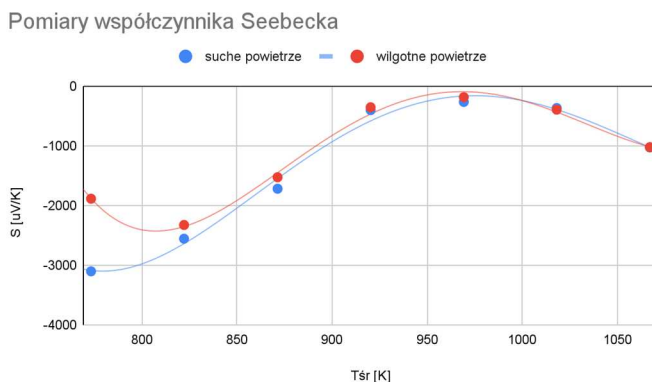
Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 17.2. Wyniki pomiarów współczynnika Seebecka (S) oraz napięcia (U) przy występowaniu różnicy temperatur  $\Delta T$  dla atmosfery mokrego powietrza**

U [uV]	$\Delta T$ [K]	$T_{\text{średnie}}$ [K]	S [uV/K]
7574,41	-7,4	1066,75	-1023,570
3007,02	-7,6	1018,15	-395,660
1420,25	-7,6	969,35	-186,875
2816,16	-7,9	920,60	-356,476
12527,53	-8,2	871,45	-1527,746
19544,08	-8,4	822,55	-2326,676
15661,37	-8,3	773,70	-1886,912

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie tabel przygotowano wykres:



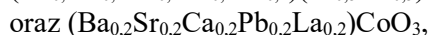
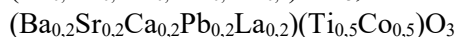
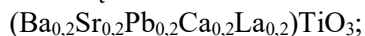
**Rysunek 17.6.** Współczynnik Seebecka dla różnych temperatur

Źródło: Opracowanie własne

Z wykresu wynika, że dla badanego związku otrzymano wysoki ujemny współczynnik Seebecka, co wskazuje na przewodnictwo typu n. Współczynniki Seebecka różnią się od siebie w zależności od badanej atmosfery. Jest to szczególnie widoczne w zakresie niższych temperatur – co ciekawe, dla niższych temperatur współczynnik Seebecka jest większy.

## Podsumowanie

Za pomocą syntezy w fazie stałej otrzymano sześć związków chemicznych o wzorach  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{TiO}_3$ ;  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})(\text{Ti}_{0,5}\text{Fe}_{0,5})\text{O}_3$ ;  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})(\text{Ti}_{0,5}\text{Co}_{0,5})\text{O}_3$ ;  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})(\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5})\text{O}_3$ ;  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{FeO}_3$ ;  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{CoO}_3$ . Po I etapie syntezy wszystkie próbki wyszły jednofazowe. Dla każdego związku utworzono po dwie pastylki. Niestety II etap syntezy zakończył się powodzeniem tylko w przypadku trzech związków:



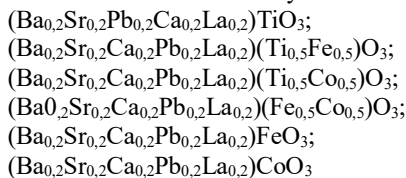
reszta pastylek stopiła się. Jednym z proponowanych rozwiązań problemu jest obniżenie temperatury II etapu syntezy o 50 stopni. Do dwóch udanych pastylek przyklejono elektrody, dzięki czemu pastylki były gotowe do pomiarów. Dla próbki  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{TiO}_3$  otrzymano wysokie wartości współczynnika Seebecka, które różniły się w zależności od użytej atmosfery. Planuje się przeprowadzenie badania spektroskopią impedancyjną. Wykonana również zostanie analiza FT-IR. Dla pozostałych nieudanych próbek planuje się ponowne przeprowadzenie syntezy w niższej temperaturze.

## Literatura

1. Banerjee R., Chatterjee S., Ranjan M., Bhattacharya T., Mukherjee S., Jana S.S., Dwivedi A., Maiti T. (2020), *High-Entropy Perovskites: An Emergent Class of Oxide Thermoelectrics with Ultralow Thermal Conductivity*, „ACS Sustainable Chemistry & Engineering”, 8, 46, s. 17022-17032.
2. Becker T., Elefsiniotis A., Kiziroglou M.E. (2015), *Thermoelectric Energy Harvesting in Aircraft*, [w:] Briand D., Yeatman E., Roundy S. (red.), *Micro Energy Harvesting*, Wiley-VCH, s. 415-434.
3. Dilhac J.-M., Monthéard R., Bafleur M., Boitier V., Nolhier N., Durand-Estébe P., Tounsi P. (2014), *Implementation of Thermoelectric Generators in Airliners for Powering, Battery-free Wireless Sensor Networks*, „Journal of Electronic Materials”, 43, 6, s. 2444-2451.
4. Jaziri N., Boughamoura A., Müller J., Mezghani B., Tounsi F., Ismail M. (2020), *A Comprehensive Review of Thermoelectric Generators: Technologies and Common Applications*, „Energy Reports”, 6, s. 264-287.
5. Królicka A., Hruban A., Mirowska A. (2012), *Nowoczesne materiały termoelektryczne – przegląd literaturowy*, „Materiały Elektroniczne”, 40, 4, s. 19-34.
6. Lan S., Stobart R., Wang X. (2022), *Matching and Optimization for a Thermoelectric Generator Applied in an Extended-Range Electric Vehicle for Waste Heat Recovery*, „Applied Energy”, 313(1), 118783.
7. Markowski P. (2008), *Właściwości termoelektryczne kompozytów grubowarstwowych*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław.

## Synthesis and Testing of High Entropy Oxides (HEO) as Materials with Great Potential in Thermoelectric Technology

**Abstract:** The subject of the chapter is a description of the synthesis of high entropic oxides and showing their potential as materials for the construction of thermogenerators. In this work 8 representatives of this group of compounds were synthesized, with a chemical composition ensuring a high Seebeck coefficient. The research involved the synthesis of high entropy oxides with the formulas:



The main motivation for the research was to produce cheap and effective materials that could be used to build thermogenerators. The paper presents and describes the solid-phase synthesis process. The synthesis conditions and problems arising during the performed syntheses, as well as possible solutions to the problem are also presented. Paper also presents measurements of Seebeck coefficient of sample with formula  $(\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,2}\text{Pb}_{0,2}\text{Ca}_{0,2}\text{La}_{0,2})\text{TiO}_3$  in different temperature. During thermoelectric tests, a very high Seebeck coefficient was obtained, reaching up to  $-3000 \mu\text{V/K}$  in temperature of 750K. The presented research shows that the tested high-entropy oxides (HEO) have great potential for use in devices using thermoelectric phenomena.

**Keywords:** entropy, thermoelectric, high entropy oxide, Seebeck coefficient

## Rozdział 18

# Cyfrowa oraz numeryczna analiza zużycia narzędzi w procesie kucia matrycowego

Piotr Bathelt<sup>1</sup>, Aneta Łukaszek-Sotek<sup>1</sup>, Grzegorz Ficak<sup>2</sup>, Łukasz Lisecki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej  
<sup>2</sup>GK Forge Sp. z o.o. Goleiszów

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono badania przeprowadzone na zużytej matrycy do kucia odkuwki przeciwcieżaru. W czasie produkcji detalu zaobserwowano stały problem związany z pękającą dolną wkładką matrycującą. Celem przeprowadzonych badań było znalezienie przyczyny zniszczenia narzędzi. W tym celu poddano analizie numerycznej proces kucia, a następnie na podstawie oceny wyników symulacji kształtowania wprowadzono zmiany, które miały zredukować przedwczesne zużycie się wkładek kuźniczych. W pierwszym kroku wykorzystano technologię skanowania 3D do zbadania stopnia zużycia matrycy. Utworzony w czasie skanowania model porównano z modelem CAD matrycy, a otrzymane wyniki przeanalizowano pod kątem wytypowania obszarów intensywnego zużycia narzędzia. Kolejno wykonano symulacje numeryczne istniejącego procesu technologicznego za pomocą oprogramowania QForm. W celu otrzymania bardziej satysfakcjonujących wyników wprowadzono zmiany w wyjściowej symulacji. Zmiany te dotyczyły zarówno czynników technologicznych, jak i geometrycznych. Po przeprowadzeniu symulacji numerycznych z zastosowaniem zmian otrzymane wyniki porównano ze sobą oraz z symulacją wyjściową, a następnie wybrano taki proces kucia odkuwki przeciwcieżaru, który był optymalny.

**Słowa kluczowe:** kucie matrycowe, skanowanie 3D, symulacja numeryczna, zużycie narzędzi

## Wprowadzenie

Przedwczesne zużycie narzędzi do kucia matrycowego może nastąpić z kilku powodów. Najczęściej spotykaną przyczyną jest użycie nieprawidłowych lub niskiej jakości materiałów do wykonania narzędzi bądź niewłaściwa obróbka cieplna, niegwarantująca osiągnięcia wymaganych własności eksploatacyjnych. Narzędzia do kucia matrycowego wykonane są zazwyczaj z wysokowytrzymałej stali narzędziowej, aby mogły sprostać trudnym warunkom pracy w procesie



kucia. Jeśli użyta stal jest niskiej jakości lub nie jest odpowiednio obrobiona cieplnie, może to prowadzić do szybkiego zużycia narzędzia (Gronostajski i in. 2013). Inną przyczyną przedwczesnego zużycia narzędzi do kucia matrycowego jest nieodpowiednia konserwacja i smarowanie powierzchni roboczej matrycy. Narzędzia te pracują w warunkach wysokiego obciążenia i jeśli nie są regularnie konserwowane i smarowane, tarcie powstające podczas kucia może spowodować szybkie zużycie narzędzia. Niewłaściwe użytkowanie narzędzia może również prowadzić do jego przedwczesnego zużycia. Jeżeli narzędzie jest używane do kucia części większych lub twardszych niż te, do których zostało zaprojektowane, może to prowadzić do nadmiernego zużycia (Krawczyk i in. 2022). Wreszcie konstrukcja samego narzędzia może również przyczynić się do przedwczesnego zużycia. Jeśli narzędzie jest źle zaprojektowane lub jego kształt nie jest zoptymalizowany do konkretnego procesu kucia i odpowiedniej maszyny, może to prowadzić do koncentracji niekorzystnego stanu naprężeń i przyspieszonego zużycia w niektórych obszarach. Ogólnie rzecz biorąc, przedwczesne zużycie narzędzi do kucia matrycowego może być poważnym problemem, ale można je ograniczyć poprzez stosowanie materiałów wysokiej jakości, właściwą konserwację i smarowanie, odpowiednie użytkowanie i staranne projektowanie narzędzi (Krawczyk i in. 2023). Ważną rolę w analizie procesów kucia pod kątem prognozowania zużycia narzędzi odgrywa symulacja numeryczna, która pozwala na korektę parametrów procesu już na etapie jego projektowania. W niniejszym rozdziale poddano analizie zużyta matrycę do kucia przeciwciężaru (*rys. 18.1*).



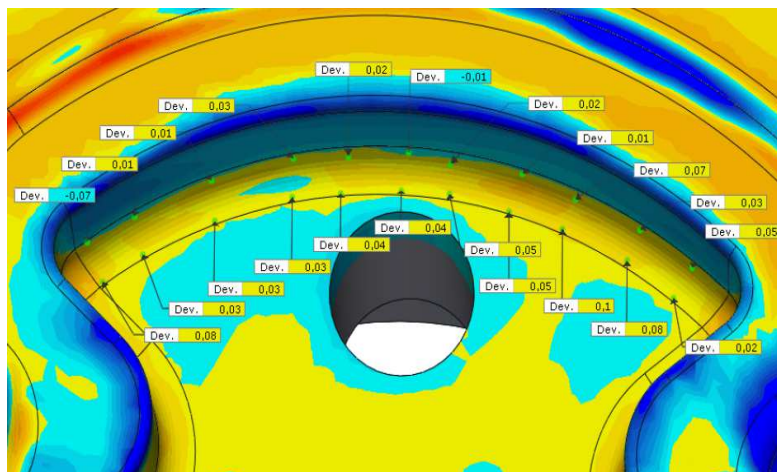
**Rysunek 18.1.** Zużyta wkładka matrycująca dolna do kucia przeciwciężaru

Źródło: Opracowanie własne

Wykorzystując technologię skanowania 3D oraz symulację numeryczną, określono obszary intensywnego zużycia matrycy oraz przyczyny powstania uszkodzeń (takich jak pęknięcie).

## Cyfrowa analiza zużycia narzędzia do kucia przeciwiężaru

Do przeprowadzenia analizy zużycia narzędzi do kucia matrycowego wykorzystano technologię skanowania 3D. Otrzymany model porównano z modelem CAD, a wyniki poddano analizie pod kątem zbadania stopnia zużycia matrycy do kucia. W pierwszym kroku po nałożeniu skanu 3D na model CAD przeanalizowano odchyłki wymiarów w miejscu pęknięcia matrycy (rys. 18.2). Pęknięcie narzędzia nastąpiło na promieniu zaokrąglenia krawędzi, którego wartość wynosiła 3 mm. Tolerancja dla tego wymiaru wynosi  $-0,75 \sim 1,5$  mm. Z otrzymanych wyników widać, że wartość promienia zaokrąglenia w zużytej matrycy mieści się w odchyłkach, ponieważ miara maksymalnych odchyłów wynosi od  $-0,07$  mm do  $0,1$  mm. Oznacza to, że nie nastąpiło znaczące zużycie się tego obszaru wykroju, jednak doszło do pęknięcia narzędzia na promieniu zaokrąglenia krawędzi.

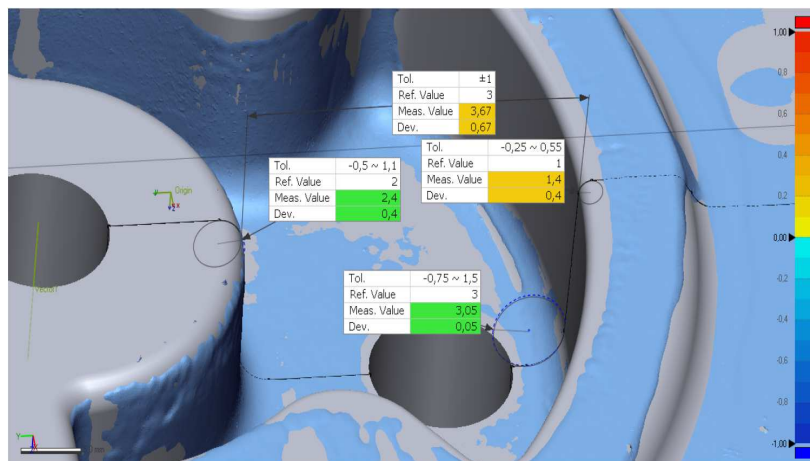


**Rysunek 18.2.** Odchyłki wymiarowe w miejscu pęknięcia narzędzia

Źródło: Opracowanie własne

Kolejnym etapem prac była weryfikacja kształtu wykroju matrycy. Badano wartości promieni zaokrąglenia oraz pochylenia kuźniczego w celu wyznaczenia stopnia zużycia wykroju do kucia (rys. 18.3). Wartości mierzonych parametrów mieszczą się w tolerancjach dla każdego wymiaru. Miara promienia zaokrąglenia w miejscu pęknięcia narzędzi jest niemal wartością nominalną. Pochylenie kuźnicze również mieści się w tolerancji, a jego różnica względem modelu CAD może być spowodowana powstaniem szczeliny wskutek pęknięcia matrycy i rozwarstwieniem się materiału na dwie części. Promień zaokrąglenia krawędzi

w miejscu rowka na wypływkę również mieści się w normie, jednak uległ on znaczącemu zużyciu, ponieważ wartość tego promienia wynosi 1 mm. Jest to miejsce, w którym działają duże siły tarcia oraz powstają duże naprężenia, przez co następuje szybsze zużycie się tego promienia.



**Rysunek 18.3.** Wartości parametrów technologicznych na przekroju wykroju matrycującego

Źródło: Opracowanie własne

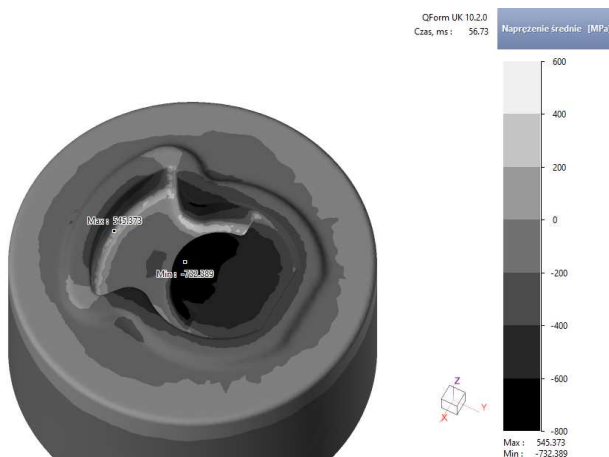
Porównując wyniki skanowania 3D z modelem CAD, można dojść do wniosku, że nie nastąpiło znaczące zużycie się finalnego wykroju matrycującego, jednak doszło do zniszczenia narzędzia poprzez mechanizm pęknięcia. Pęknięcie to musiało powstać poprzez złe zaprojektowanie procesu technologicznego lub przez nieprawidłową obróbkę cieplną matrycy, co spowodowało nadanie narzędziu nieodpowiednich własności mechanicznych.

## Numeryczna analiza zużycia narzędzi do kucia w programie QForm

### Analiza wariantu wyjściowego

Na kolejnym etapie pracy przeprowadzono analizę symulacji numerycznej w programie QForm procesu technologicznego, który jest stosowany w kuźni. Odkuwkę wykonuje się ze stali S355J2. Wsadem do procesu kucia jest pręt o średnicy 30 mm oraz długości 74 mm, który nagrzano do temperatury 1150°C. Temperatura matryc wykonanych ze stali WCL wynosiła 300°C. Proces kształtowania przebiega na prasie śrubowej o nacisku nominalnym wynoszącym 4 MN. W pierwszym kroku zbadano rozkład naprężenia średniego w obszarze wykroju (rys. 18.4). Z otrzymanych wyników widać, że największe naprężenie o charakterze rozciągającym (naprężenie średnie dodatnie) w wykroju znajdują się w miejscu, w którym nastąpiło pęknięcie narzędzia. Taka wartość naprężenia

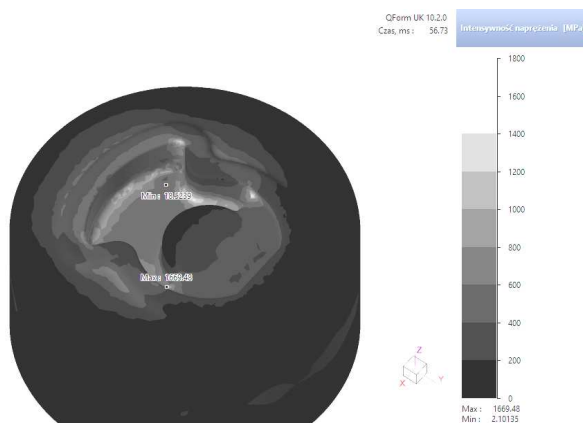
w znacznym stopniu mogła przyczynić się do przedwczesnego zużycia się matrycy do kucia przeciwcieżaru.



**Rysunek 18.4.** Rozkład naprężenia średniego na powierzchni roboczej dolnej matrycy

Źródło: Opracowanie własne

W kolejnym kroku przeprowadzono analizę rozkładu intensywności naprężenia w wykroju matrycującym (rys. 18.5). Z otrzymanych wyników widać, że w wykroju znajdują się miejsca, w których wartość intensywność naprężenia dochodzi do 1700 MPa. Przyjmuje się, że im większa wartość tego parametru, tym większe prawdopodobieństwo plastycznego odkształcenia się narzędzia.

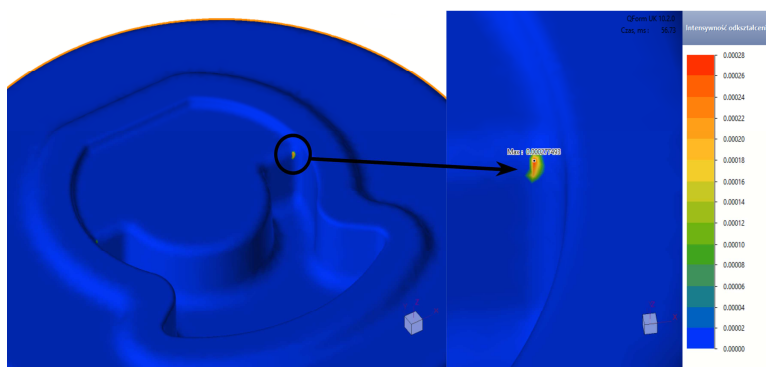


**Rysunek 18.5.** Rozkład intensywności naprężenia na powierzchni roboczej dolnej matrycy

Źródło: Opracowanie własne

Następnie zbadano rozkład intensywności odkształcenia w obszarze narzędzia (rys. 18.6). Wyniki rozkładu tego parametru są powiązane z rozkładem intensywności naprężenia w matrycy. Można zauważyć, że narzędzie uległo uplastycznieniu

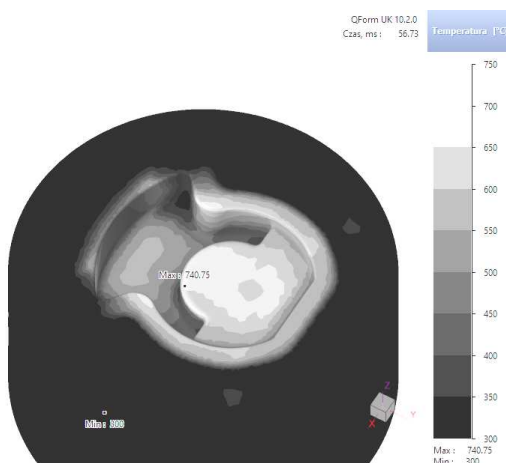
w miejscach, w których wartość intensywności naprężenia osiąga około 1670 MPa. Oznacza to, że zarówno narzędzie, jak i technologia kucia zostały zaprojektowane nieprawidłowo, co spowodowało przedwczesne uszkodzenie matrycy.



**Rysunek 18.6.** Rozkład intensywności odkształcenia w matrycy dolnej

Źródło: Opracowanie własne

Ostatnim parametrem, który analizowano, był rozkład temperatury w narzędziu po wykonaniu odkuwki (rys. 18.7). Z otrzymanych wyników wywnioskować można, że nastąpił nierównomierny rozkład temperatury w wykroju matrycującym.



**Rysunek 18.7.** Rozkład temperatury na powierzchni roboczej matrycy dolnej

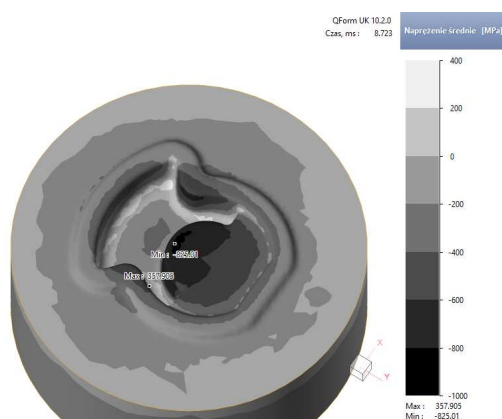
Źródło: Opracowanie własne

W wykroju tym znajdują się miejsca, w których temperatura znacząco przekracza 700°C, oraz miejsca, w których temperatura wynosi około 400°C. Spowodowane jest to umiejscowieniem wsadu podczas operacji kucia. W miejscu, gdzie temperatura osiąga wartość około 740°C, wsad od samego początku styka się z matrycą, przez co następuje intensywna wymiana ciepła między

nimi, a co za tym idzie – znaczne nagrzewanie się wykroju w tym miejscu. Taka temperatura przyczynić może się do odpuszczenia narzędzia oraz utraty własności mechanicznych i przedwczesnego zużycia się matrycy.

### Analiza symulacji numerycznej po wprowadzaniu zmian

Po przeanalizowaniu wyjściowej symulacji numerycznej wprowadzono pierwszą zmianę, jaką było zastosowanie kucia z uwzględnieniem wykroju wstępnego. Konstrukcja wykroju wstępnego nie zawiera rowka na wypływkę, dodatkowo wykroj nie uwzględnia wszystkich szczegółów w budowie odkuwki oraz ma większe promienie zaokrągleń. Wykroj wstępny ma pomniejszone wymiary względem wykroju finalnego, a co za tym idzie – musi mieć większą głębokość, aby objętość odkuwki w wykroju wstępnym była równa objętości odkuwki wraz z wypływką w wykroju finalnym. Zaprojektowano więc kilka narzędzi, które różniły się między sobą różnymi promieniami zaokrągleń, pochyleniami kuźniczymi oraz wymiarami wykroju. Dodatkowo badano również możliwość kucia na prasie śrubowej zarówno z wyrzutnikiem, jak i bez jego zastosowania. Jednak po przeprowadzeniu kilku wariantów symulacji numerycznej okazało się, że nie udało się zoptymalizować procesu kucia przeciwcieżaru, ponieważ otrzymano takie same lub nawet gorsze wyniki związane ze zużyciem narzędzi. Postanowiono wprowadzić zmiany również w konstrukcji wykroju finalnego. Pierwszą z tych zmian była zmiana pozycji narzędzi. Oznaczało to, że narzędzie górne stało się narzędziem dolnym i na odwrót. Spowodowało to, że nie można było zastosować wypychacza w narzędziu górnym z powodu charakterystyki budowy prasy śrubowej. Dlatego zastosowano większe pochylenia kuźnicze w celu zapobiegnięcia zakleszczenia się odkuwki w wykroju. Dodatkowo zwiększono promień zaokrąglenia w miejscu pęknięcia matrycy. Po wprowadzeniu takich zmian przeprowadzono symulację numeryczną. Poniżej przedstawiono rozkład naprężeń średnich w wykroju finalnym po wprowadzeniu zmian (rys. 18.8).



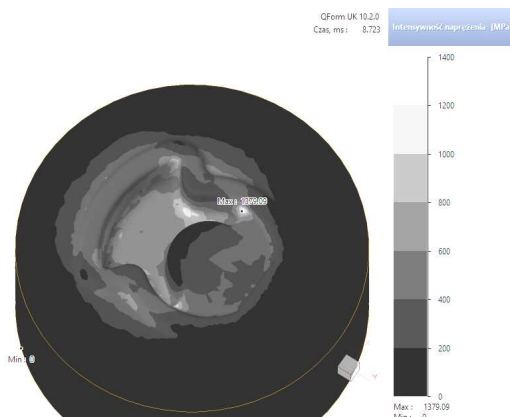
**Rysunek 18.8.** Rozkład naprężeń średnich w wykroju finalnym po wprowadzaniu zmian

Źródło: Opracowanie własne



Z otrzymanych wyników widać, że maksymalne wartości naprężenia średniego w wykroju matrycującym uległy zmniejszeniu o około 200 MPa. Dodatkowo maksymalna wartość naprężenia rozciągającego w wykroju nie znajduje się teraz w miejscu, gdzie nastąpiło pęknięcie matrycy.

Kolejnym parametrem, który przeanalizowano po zastosowaniu zmian, był rozkład intensywności naprężenia w narzędziu (*rys. 18.9*).



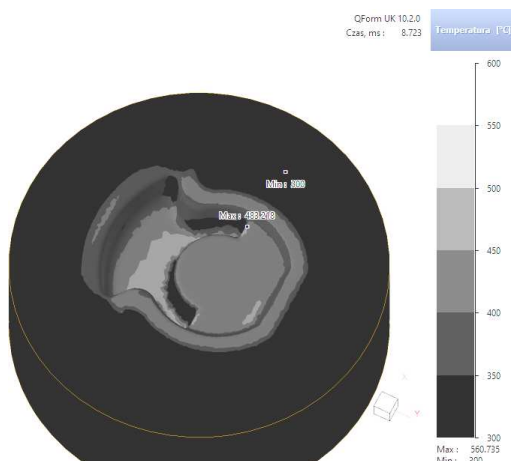
**Rysunek 18.9.** Rozkład intensywności naprężenia w wykroju finalnym po wprowadzeniu zmian

Źródło: Opracowanie własne

Na *rys. 18.9* widać, że zmniejszono nie tylko maksymalną wartość intensywności naprężenia w wykroju, ale również ilość miejsc, w których wartość ta przekraczała 1000 MPa. Intensywność naprężenia osiąga maksymalną wartość w tych samych miejscach, co w wyjściowej symulacji, jednak w tym przypadku matryca już nie odkształcała się plastycznie.

Z otrzymanych wyników można wywnioskować, że poprzez zmniejszenie wartości intensywności naprężenia w wykroju udało się wyeliminować powstające odkształcenie plastyczne narzędzia, a co za tym idzie, wzrosło jego żywotność. Ostatnim parametrem, który porównano, był rozkład temperatury w wykroju (*rys. 18.10*).

Z otrzymanego rozkładu widać, że obniżeniu uległa maksymalna temperatura narzędzia w wykroju finalnym względem wyjściowej symulacji o około 250°C. Dodatkowo rozkład temperatury w tym wykroju był równomierny. Spowodowane było to zastosowaniem wstępnego kształtowania, przez co w wykroju finalnym wsad krócej oddziaływał cieplnie z narzędziem. W wykroju wstępnym odnotowano maksymalną temperaturę wynoszącą 680°C. Udało się zatem zmniejszyć temperaturę na wykroju wstępnym względem wykroju finalnego symulacji wyjściowej. W *tab. 18.1* przedstawiono porównanie wyników wyjściowej symulacji numerycznej z wynikami po zastosowaniu zmian.



**Rysunek 18.10.** Rozkład temperatury w wykroju po wprowadzaniu zmian

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 18.4.** Porównanie wyników symulacji numerycznej

Symulacja	Wyjściowa	Po wprowadzeniu zmian
Naprężenia średnie [MPa]	545	360
Intensywność naprężenia [MPa]	1670	1380
Intensywność odkształcenia	0,00028	0
Temperatura wykroju finalnego [°C]	740	480
Temperatura wykroju wstępnego [°C]	-	680

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

Wykonane badania oraz analiza otrzymanych wyników symulacji numerycznych pozwoliła na wprowadzenie zmian w procesie kucia przeciwcieżaru, a co za tym idzie – na zwiększenie żywotności narzędzi kuźniczych. Przeprowadzone badania pozwoliły na optymalizację procesu kucia. Wykorzystanie oprogramowania takiego jak QForm pozwala na wykrycie wad, które mogły powstać na etapie projektowania technologii. Dlatego po wprowadzaniu oraz zastosowaniu zmian można wyeliminować wady, które miałyby odzwierciedlenie w warunkach przemysłowych.

Główną różnicą pomiędzy technologią zaproponowaną przez kuźnię a technologią po wprowadzeniu zmian jest ilość operacji, w których wykonuje się element. W przemyśle przeciwcieżar wykonuje się w trzech operacjach, natomiast po zmianach już w czterech. Taka technologia powoduje wzrost kosztów związanych z koniecznością wykonania dodatkowych narzędzi. Jednakże poprzez wprowadzone zmiany spodziewa się wzrostu żywotności narzędzi, a co za tym idzie, przy produkcji wieloseryjnej nastąpi szybki zwrot poniesionych kosztów.



Kluczowa, z punktu widzenia zwiększenia trwałości narzędzi, okazała się zamiana narzędzia górnego z dolnym. Wówczas newralgiczna część wykroju została umieszczona w matrycy górnej, co wpłynęło na zmianę mechanizmu wypełniania wykroju. Ponadto wprowadzone modyfikacje w kształcie wykroju (głównie zmiana promieni zaokrągleń) spowodowały, że zmniejszono wartości intensywności naprężenia i wyeliminowano odkształcenie plastyczne narzędzi.

## Literatura

1. Gronostajski Z., Hawryluk M., Marciniak M., (2013), *Niskocyklowe zmęczenie cieplne stali narzędziowej WCLV*, „Obróbka Plastyczna Metali”, 24, 4, s. 233-242.
2. Krawczyk J., Łukaszek-Sołek A., Śleboda T., Lisiecki Ł., Bembenek M., Cieślik J., Góral T., Pawlik J. (2023), *Tool Wear Issues in Hot Forging of Steel*, „Materials”, 16, 471, s. 1-20.
3. Krawczyk J., Łukaszek-Sołek A., Lisiecki Ł., Śleboda T., Hawryluk M. (2022), *Wear Mechanisms of the Forging Tool Used in Pre-Forming in a Double Forging System of Truck Parts*, „Materials”, 16, 351, s. 1-16.

## Digital and Numerical Analysis of Tool Wear in the Closed-Die Forging Process

**Abstract:** In this chapter, investigations on a forging die of counterweight part were carried out. During the production of the workpiece, a constant problem was observed, related to the cracking of the lower die insert. The purpose of the research to find the cause of tool failure was conducted. For this purpose the forging process was analyzed numerically, and then, based on the results of the shaping simulation, changes were made to reduce premature wear of the forging inserts. In a first step, 3D scanning technology was used to investigate the wear of the die. The model created during the scanning was compared with the CAD model of the die. The results were used to identify areas of intensive tool wear. Subsequently, numerical simulations were performed, of the existing technological process using QForm software. Changes were made to the initial simulation in order to obtain more satisfactory results. These changes involved both technological and geometrical factors. After conducting numerical simulations using the changes, the results obtained were compared with each other and with the initial simulation, and then such a forging process for the counterweight forging was selected that was the most optimal.

**Keywords:** closed-die forging, 3D scanning, numerical simulation, tool wear

## Rozdział 19

# Popioły lotne ze spalania biomasy jako wypełniacz w kompozytach poliamidowych

Szymon Drózdź, Renata Caban

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych oraz struktury kompozytów na osnowie poliamidu z wypełniaczem w postaci popiołów lotnych powstałych ze spalania biomasy. W celu analizy wpływu wypełniacza na właściwości mechaniczne przeprowadzono trójpunktową próbę zginania oraz pomiar twardości. Stwierdzono, że dodatek popiołu lotnego wpływa korzystnie na badane właściwości mechaniczne. Popiół lotny nie tylko pełni rolę wypełniacza, ale także zbrojenia. W celu analizy struktury wykorzystano mikroskopię optyczną i skaningową mikroskopię elektronową. Analiza mikrostrukturalna wykazała, że w badanych kompozytach cząstki popiołu lotnego mają nieregularny kształt i wydłużone krawędzie, a ich rozmiary nie przekraczają 100  $\mu\text{m}$ . Większość badanych cząstek popiołów lotnych powstałych ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych jest bogata w krzemionkę i tlenek glinu. Ponadto w składzie chemicznym popiołów zanotowano również obecność potasu, wapnia i magnezu, czyli głównych składników odżywczych dla roślin.

**Słowa kluczowe:** kompozyty, poliamid, popioły lotne, właściwości mechaniczne

## Wprowadzenie

Biomasa ma pochodzenie ekologiczne, jest to odpad głównie pochodzenia roślinnego i zwierzęcego. Biopaliwami wykorzystywanymi w największej ilości w Polsce są odpady drzewne, do których należą zrębki, wióry, trociny, kora i drewno odpadowe. W gospodarstwach domowych jako źródła paliwa używa się pelletu, często składającego się z odpadów organicznych produktów rolnych pochodzenia roślinnego, takich jak słonecznik, trzcina, kukurydza, rzepak i wiele innych (Bala-Litwiniak 2019, s. 49-54).

Biomasa podlega różnym procesom przeróbki i jest wykorzystywana jako paliwo ciekłe lub gazowe. Proces fluidalny umożliwia spalanie wszelkiego rodzaju materiałów wydzielających ciepło w reakcji z tlenem zawartym w powietrzu,

różniących się w szerokim zakresie kalorycznością (Knapik 2015, s. 413-416). Skutkiem ubocznym spalania zarówno biomasy, jak i paliw konwencjonalnych w piecach jest otrzymywanie popiołu. Coraz większa ilość otrzymywanego popiołu przyczyniła się do poszukiwania sposobów wykorzystania go w taki sposób, aby nie stanowił on odpadu. Popioły lotne znajdują najczęściej zastosowanie w budownictwie, drogownictwie oraz górnictwie (Gawlicki i in. 2018, s. 7-19, Szczygielski i in. 207-216).

W przemyśle energetycznym ważnym źródłem przy pozyskiwaniu energii jest wykorzystanie biomasy. Rocznie na całym świecie na skutek spalania biomasy może powstać około 480 milionów ton popiołu, zakładając, że rocznie procesowi spalania poddaje się 7 miliardów ton biomasy. W zależności od rodzaju biomasy oraz technologii spalania otrzymany popiół posiada różne właściwości. Otrzymane odpady często stanowią popioły lotne, których różne składy chemiczne czynią je trudnymi do zagospodarowania (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016, s. 149-162).

Skład chemiczny popiołów pochodzących z różnych elektrowni jest zbliżony, a niewielkie różnice dotyczą poszczególnych składników. Częstka popiołów lotnych zawiera w sobie różne tlenki, jednak najczęściej są to ditlenek krzemu (> 40%), tlenek glinu (> 30%), tlenek wapnia (> 10%), tlenek siarki (> 3%) oraz wolna krzemionka (> 5%). Skład ten jest bardzo zbliżony do składu napełniaczy szklanych w postaci włókien. Popioły lotne posiadają powierzchnię właściwą wynoszącą od 20 do 47 m<sup>2</sup>/g, gęstość w zakresie od 1800 do 2700 kg/m<sup>3</sup>. Mikrosfery te zbudowane są z cząstek o różnej wielkości, wynoszącej od 0,5 do poniżej niż 0,063 nm, a zawartość najmniejszych cząstek może osiągnąć 93%. Powstałe ziarna w wyniku spalania charakteryzują się różnorodnym kształtem (nieregularnym lub kulistym) o wypełnieniu pełnym lub gazowym (Wójcik i in. 2017, s. 377-393).

Obecnie coraz częściej popioły lotne są wykorzystywane przez przedsiębiorstwa jako napełniacze do polimerów takich jak polipropylen, polichlorek winylu, polietylen i politereftalan etylenu. Wykorzystanie napełniaczy przy produkcji tworzyw polimerowych ma znaczenie ekologiczne, gdyż przyczynia się do zmniejszenia ilości powstałych odpadów, oraz ekonomiczne, ponieważ wpływa na obniżenie kosztów wyrobów. Popioły lotne będące napełniaczami w kompozytach polimerowych w wielu przypadkach poprawiają właściwości mechaniczne, a także powodują wzrost odporności na ścieranie (Czarnecka-Komorowska i in. 2010, s. 31-32).

Celem przeprowadzonych badań była analiza wpływu napełniacza w postaci popiołów lotnych pochodzących ze spalania biomasy na właściwości mechaniczne i strukturę kompozytów na osnowie poliamidu. W celu analizy właściwości mechanicznych przeprowadzono trójpunktową próbę zginania oraz pomiar twardości. Do analizy struktury wykorzystano mikroskopię optyczną i skaningową mikroskopię elektronową.

## Materiał do badań

W rozdziale zostaną przedstawione wyniki badań właściwości i struktury kompozytów na podstawie poliamidu napełnionego popiołem lotnym ze spalania biomasy. Próbkki badawcze zostały wykonane technologią wtryskiwania na wtryskarce firmy Krauss Maffei KM 65. Wytworzono próbki zawierające 5, 10 i 15% popiołów lotnych pochodzących ze spalania biomasy w kotle fluidalnym. W celach porównawczych badano również materiał osnowy. Jako osnowę kompozytów użyto poliamid 6 o nazwie handlowej TARNAMID T-27, produkowany przez Zakłady Azotowe Tarnów. Jako napełniacz zastosowano popioły lotne produkcji GDF SUEZ Energia Polska SA, pochodzące ze spalania biomasy zawierającej 80% odpadów pochodzenia drzewnego i 20% łupin orzecha kokosowego. Skład chemiczny popiołów lotnych przedstawiono w *tab. 19.1*.

**Tabela 19.1. Skład chemiczny popiołów lotnych ze spalania biomasy, % masowy**

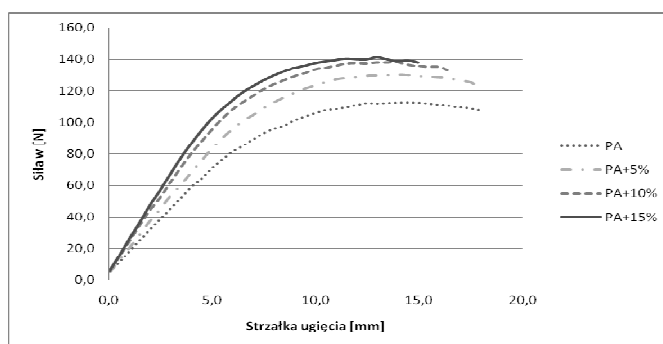
SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SrO	Cl	strata praż.
57,54	17,26	4,82	2,32	2,94	3,93	0,39	2,01	2,71	0,30	0,04	1,06	4,68

Źródło: Opracowanie własne

## Metodyka i wyniki badań

Badanie wytrzymałości na zginanie zostało przeprowadzone zgodnie z obowiązującą normą PN-79/C-89027. Do badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową – Zwick/Roell Z100. Prędkość badania wynosiła 2 mm/min. Rozstaw między podporami wynosił 50 mm.

Na *rys. 19.1* przedstawiono zarejestrowane krzywe zginania, natomiast w *tab. 19.2* zestawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie badanych materiałów.



**Rysunek 19.1.** Trójpunktowa próba zginania dla próbek kompozytowych w porównaniu do poliamidu

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 19.2. Uzyskane wyniki badań w trójpunktowej próbie zginania**

Tworzywo	Wytrzymałość na zginanie [MPa]
PA 6	53,0
PA 6 + 5% popiołu lotnego	61,4
PA 6 + 10% popiołu lotnego	65,2
PA 6 + 15% popiołu lotnego	66,1

Źródło: Opracowanie własne

Poddając analizie uzyskane wyniki wytrzymałości na zginanie (*tab. 19.2*) badanych próbek, tj. poliamidu 6 oraz poliamidu 6 z odpowiednio 5, 10 i 15% zawartością popiołu lotnego, zauważono zależność pomiędzy zawartością napelnacza a wytrzymałością na zginanie. Maksymalne przenoszone obciążenie wykazała próbka poliamidu z dodatkiem 15% popiołu lotnego, przy kącie ugięcia  $\alpha = 70^\circ$ . Wszystkie próbki wykazały wysoką plastyczność, a zawartość popiołu lotnego podwyższa wytrzymałość na zginanie. Popiół nie tylko pełni rolę napelnacza, ale także zbrojenia. Próbki odkształcają się plastycznie, a po przeprowadzonym badaniu nie ulegają pęknięciu.

Pomiar twardości wykonano metodą Shore'a. W *tab. 19.3* zestawiono wyniki pomiarów twardości (Shore'a typ D) poliamidu oraz kompozytów na jego osnowie zawierających 5, 10 i 15% popiołu lotnego.

**Tabela 19.3. Uzyskane wartości twardości mierzone metodą Shore'a typ D**

Pomiar	PA	PA+ 5% popiołu lotnego	PA+ 10% popiołu lotnego	PA+ 15% popiołu lotnego
	70	73	71	73
	65	75	72	72
	66	70	76	71
	74	60	72	76
	67	68	68	73
	64	67	69	75
	68	71	70	73
	60	64	67	68
Średnia:	66,8	68,5	70,6	72,6
Odch. stand.	4,2	4,9	2,8	2,4

Źródło: Opracowanie własne

Na *rys. 19.2* przedstawiono zmianę twardości w zależności od ilości użytego napelnacza.

Analizując wyniki pomiaru twardości, można zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego rośnie twardość (*tab. 19.3*). Dowodzą tego badania opisane w literaturze, wskazujące na to, że istnieje zależność pomiędzy

twardością a zawartością popiołów lotnych (Koszkul 1999). Poliamid posiada średnią twardość ok. 67°ShD. Dodatek napełniacza powoduje nieznaczne podwyższenie twardości. Poliamid z 15-proc. zawartością napełniacza posiada najwyższą średnią twardość wynoszącą ok. 73°ShD.



**Rysunek 19.2.** Twardość PA6 oraz kompozytów na osnowie PA6 z różną zawartością napełniacza z popiołów lotnych

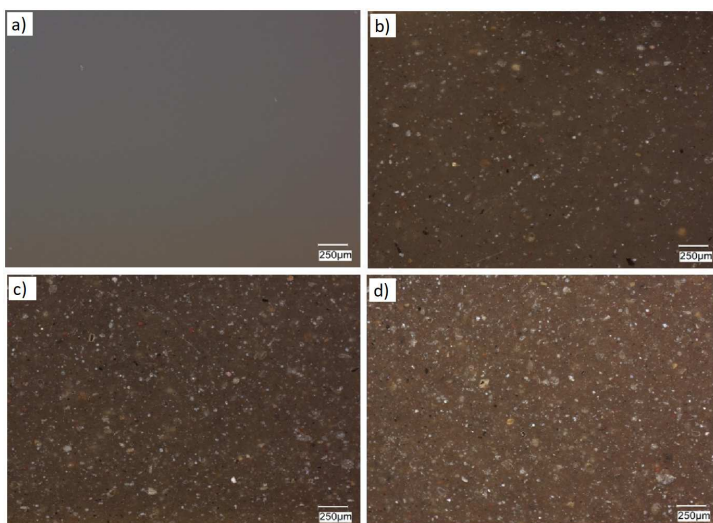
Źródło: Opracowanie własne

Do obserwacji mikrostruktury próbek wykorzystano mikroskop cyfrowy Keyence serii VHX-7000. Obserwacji poddano poliamid 6 oraz poliamid 6 z zawartością 5%, 10% i 15% popiołu lotnego ze spalania biomasy. Preparatyka próbek składała się z kilku etapów. W pierwszej kolejności wycięto próbki, zatopiono w żywicy (zainkludowano), a następnie przystąpiono do szlifowania i polerowania zgładów w celu uzyskania gładkiej powierzchni, umożliwiającej obserwację struktury pod mikroskopem. Podczas obserwacji mikrostruktury przygotowanych próbek wykonano zdjęcia (rys. 19.3), przedstawiające w sposób obrazowy m.in. rozmieszczenie, kształt oraz barwę cząstek napełniacza.

Poddając analizie mikrostrukturę poliamidu oraz kompozytów na jego osnowie posłużono się mikroskopem optycznym. Rozmieszczenie cząstek popiołu lotnego w polimerowej osnowie jest równomierne, nie zauważono występowania konglomeratów. Większość cząstek popiołu lotnego posiada wymiary od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów, przy czym największe cząstki nie przekraczają 100  $\mu\text{m}$ . Większość widocznych na obrazach mikrostruktur kompozytów cząstek popiołu lotnego jest koloru białego, przezroczystego i ciemnego. Jednakże spotykane są również cząstki w innych kolorach, np. pomarańczowym, żółtym lub fioletowym (rys. 19.3). Kolor cząstek napełniacza zależy może od występujących w nich tlenków krzemu, aluminium i żelaza.

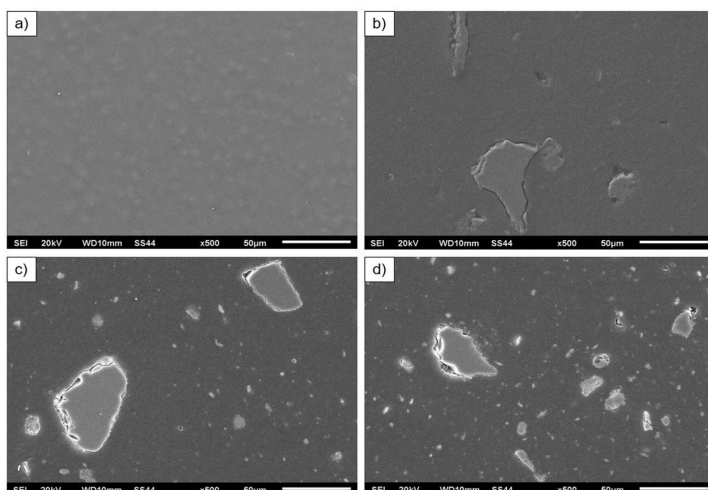
Kolejnym etapem badań było wykonanie skaningowej mikroskopii elektronicznej pozwalającej na obserwację mikrostruktury oraz analizę rozkładu pierwiastków chemicznych w badanych próbkach (rys. 19.4). Do badań wykorzystano skaningowy mikroskop elektroniczny JEOL JSM-6610 LV z mikroanalizatorem EDS.

W czasie obserwacji zdecydowano, że optymalnym powiększeniem na mikroskopie skaningowym będzie powiększenie 500 x. Mikrostruktury badanych próbek pokazano na *rys. 19.4*.



**Rysunek 19.3.** Mikrostruktura badanych materiałów, powiększenie 100 x:  
a) poliamid 6, b) poliamid 6 + 5% popiołu lotnego, c) poliamid 6 + 10% popiołu lotnego, d) poliamid 6 + 15% popiołu lotnego

Źródło: Opracowanie własne

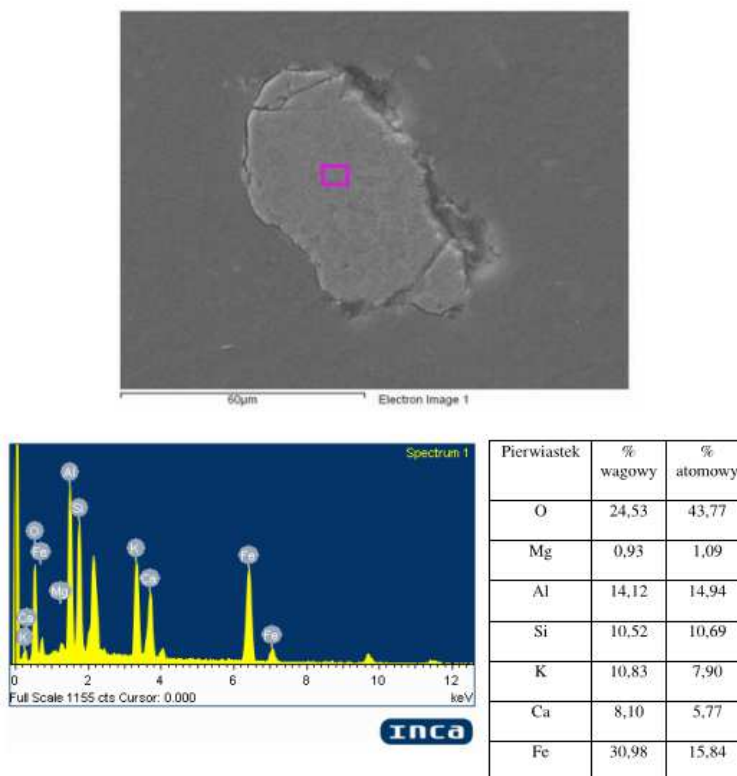


**Rysunek 19.4.** Mikrostruktura SEM badanych materiałów: a) poliamid 6,  
b) poliamid 6 + 5% popiołu lotnego, c) poliamid 6 + 10% popiołu lotnego,  
d) poliamid 6 + 15% popiołu lotnego

Źródło: Opracowanie własne

Ziarna popiołu powstałego ze spalania w kotłach fluidalnych są cząstkami o bardzo nieregularnych kształtach i wydłużonych krawędziach (*rys. 19.4*), a ich

rozmiar zwykle nie przekracza 100  $\mu\text{m}$  (Popławski, Lelusz 2018, s. 89-94). W *tab. 19.1* przedstawiono skład chemiczny popiołów lotnych ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych, które zostały wykorzystane jako napełniacz w badanych kompozytach. Popiół ten charakteryzuje się wysoką zawartością krzemu ( $\text{SiO}_2$  57,54% wag.) oraz przekroczoną zgodnie z normą PN-EN 450-1, dopuszczalną ilością reaktywnego  $\text{CaO} < 10\%$  tlenku wapnia (17,26% wag.). Ponadto w składzie chemicznym popiołów lotnych występują również: tlenek glinu (ok. 5% wag.), tlenek magnezu (2,32% wag.) oraz hematytu (ok. 3% wag.), tlenek potasu (ok. 4% wag.), tlenek sodu (0,39% wag.) dekatlenek tetrafosforu (ok. 2% wag.), siarczany poniżej (33% wag.), tlenek tytanu (IV) (ok. 0,30% wag.) oraz anion chlorkowy powyżej 1% wag. Obecność wyżej wymienionych tlenków została potwierdzona badaniami analizy składu chemicznego wybranych cząstek napełniacza przy użyciu przystawki EDS mikroskopu skaningowego JEOL JSM-6610 LV. Skład chemiczny przykładowej cząstki popiołu lotnego przedstawiono na *rys. 19.5*.



**Rysunek 19.5.** Skład chemiczny cząstki popiołu lotnego w kompozycie poliamidu 6 + 5% popiołu lotnego

Źródło: Opracowanie własne



Znaczny udział tlenu w składzie pierwiastkowym popiołów lotnych z biomasy (rys. 19.5) świadczy o występowaniu tlenków ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oraz  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ). Popioły z biomasy roślinnej zawierają więcej tlenków:  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  oraz  $\text{P}_2\text{O}_5$  w stosunku do innych paliw energetycznych (Czech i in. 2012, s. 73-82).

## Podsumowanie

Popiół lotny powstały ze spalania biomasy w piecu fluidalnym posiada właściwości środków barwiących, gdyż nadaje polimerom ciemnobrązowe zabarwienie. Poliamid występujący bez napełniacza posiada biały, mleczny, mętny (nieprzezroczysty) kolor. Niewielka ilość (5%) popiołu spowodowała zauważalną zmianę koloru. Jednakże dla udziału 10% i 15% popiołu nie dostrzeżono wpływu w tak znaczny sposób, jak to ma miejsce w przypadku zawartości 5%. Dodatek popiołów lotnych ze spalania biomasy do poliamidu korzystnie zmienia wytrzymałość na zginanie i twardość badanych materiałów. Badania mikrostrukturalne pozwoliły określić kształt cząstek napełniacza oraz oznaczyć rozkład pierwiastków chemicznych w badanych kompozytach. Analiza wykazała, że badane popioły lotne posiadają cząstki o nieregularnym kształcie i wydłużonych krawędziach. Cząstki nie przekraczają rozmiarów  $100\ \mu\text{m}$ , dlatego można zaliczyć je do kategorii drobnoziarnistych. Większość badanych cząstek popiołów lotnych powstałych ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych jest bogata w krzemionkę i tlenek glinu. Ponadto w składzie chemicznym popiołów zanotowano również obecność potasu, wapnia i magnezu, czyli główne składniki odżywcze dla roślin. Wytwarzanie kompozytów poliamidu z dodatkiem popiołów lotnych pozwala uzyskać kompozyty o korzystniejszych parametrach mechanicznych w porównaniu do czystego poliamidu. W odniesieniu do konwencjonalnych napełniaczy mineralnych popioły lotne są tańsze i bardziej przyjazne dla środowiska, dlatego stanowią atrakcyjną alternatywę jako wzmocnienie polimerów.

## Literatura

1. Bala-Litwiniak A. (2019), *Możliwości zagospodarowania wybranych rodzajów biomasy do celów energetycznych*, „Material Economy and Logistics Journal”, 11, s. 49-54.
2. Czarnicka-Komorowska D., Szostak M., Kujawa N. (2010), *Kompozyty na bazie odpadów poliolefin napełnianych popiołami lotnymi*, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna”, 5, s. 31-32.
3. Czech T., Sobczyk A.T., Jaworek A., Krupa A. (2012), *Porównanie własności fizycznych popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego, brunatnego i biomasy*, Materiały Konferencyjne POL-EMIS, s. 73-82.
4. Gawlicki M., Jarosz-Krzemińska E., Poluszyńska J. (2018), *Popioły ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych”, 34, s. 7-19.
5. Knapik K. (2015), *Wybrane właściwości fluidalnego popiołu lotnego przeznaczonego do wzmocniania podłoża gruntowego*, „Inżynieria Morska i Geotechnika”, 3, s. 413-416.

6. Koszkuł J. (1999), *Materiały Polimerowe*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
7. Popławski J., Lelusz M. (2018), *Wpływ popiołu lotnego ze spalania biomasy i pyłu węglowego na wybrane właściwości kompozytów o matrycy cementowej*, „Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym”, 7, 1, s. 89-94.
8. Szczygielski T., Tora B., Kornacki A., Hycnar J. J. (2017), *Popioły fluidalne – właściwości i zastosowanie*, „Inżynieria Mineralna”, 1, s. 207-216.
9. Uliasz-Bocheńczyk A., Pawluk A., Pyzalski M. (2016), *Charakterystyka popiołów ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych*, „Mineral Resources Management”, 32, 3, s. 149-162.
10. Wójcik M., Stachowicz F., Masłoń A. (2017), *Możliwość wykorzystania popiołów lotnych w celu poprawy odwadniania osadów ściekowych*, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury”, 64, 1, s. 377-393.

## Fly Ash from Biomass Combustion as a Filler in Polyamide Composites

**Abstract:** This chapter presents the results of a study of the mechanical properties and structure of polyamide matrix composites with a filler in the form of fly ash from biomass combustion. In order to analyse the influence of the filler on the mechanical properties, a three-point bending test and hardness measurements were carried out. It was found that the addition of fly ash had a positive effect on the mechanical properties tested. Fly ash not only acts as a filler but also as a reinforcement. Optical microscopy and scanning electron microscopy were used to analyse the structure. The microstructural analysis showed that in the composites studied, the fly ash particles have an irregular shape and elongated edges and their size does not exceed 100  $\mu\text{m}$ . Most of the fly ash particles investigated from biomass combustion in fluidised bed boilers are rich in silica and alumina. In addition, the chemical composition of the ashes also recorded the presence of potassium, calcium and magnesium, the main plant nutrients.

**Keywords:** composites, polyamide, fly ash, mechanical properties

## Rozdział 20

# Właściwości sorpcyjne węgla względem wybranych składników gazu koksowniczego

Maria Rydzik<sup>1</sup>, Wojciech Szulik, Katarzyna Czerw<sup>1</sup>, Katarzyna Zarębska<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Energetyki i Paliw

**Streszczenie:** Na jakość produkowanej stali wpływa m.in. jakość koksu, który produkowany jest z węgla metalurgicznego, a wymagania stawiane jakości koksu w tym zakresie stale rosną. Krajowe koksownie mają do dyspozycji ograniczoną bazę węgla koksujących, a jednocześnie ceny węgla zamorskich są wysokie. Dlatego istotne jest, aby w pełni wykorzystać właściwości koksotwórcze węgla rodzimych. Według danych literaturowych przebieg zjawisk sorpcyjno-dylatometrycznych dla węgla koksowych można skorelować z właściwościami koksu, które są zależne od gazów powstających w procesie koksowania. Niniejszy rozdział ma charakter przeglądowy, zostały w nim zawarte informacje dotyczące właściwości sorpcyjnych węgla kamiennych dla wybranych składników gazu koksowniczego, tj. metanu, tlenu węgla (IV) oraz wodoru. Przedstawiono zależności pomiędzy pojemnością sorpcyjną a składem petrograficznym węgla kamiennych dla metanu oraz tlenu węgla (IV). W przypadku sorpcji wodoru stwierdzono, że zmiana ilości sorbowanego wodoru jest związana z wilgotnością prób węgla. Dodatkowo najczęściej wodoru sorbują węgle silnie hydrofobowe oraz z dużą zawartością węglowodorów alifatycznych.

**Słowa kluczowe:** gaz koksowniczy, koks, pojemność sorpcyjna, węgiel kamienny

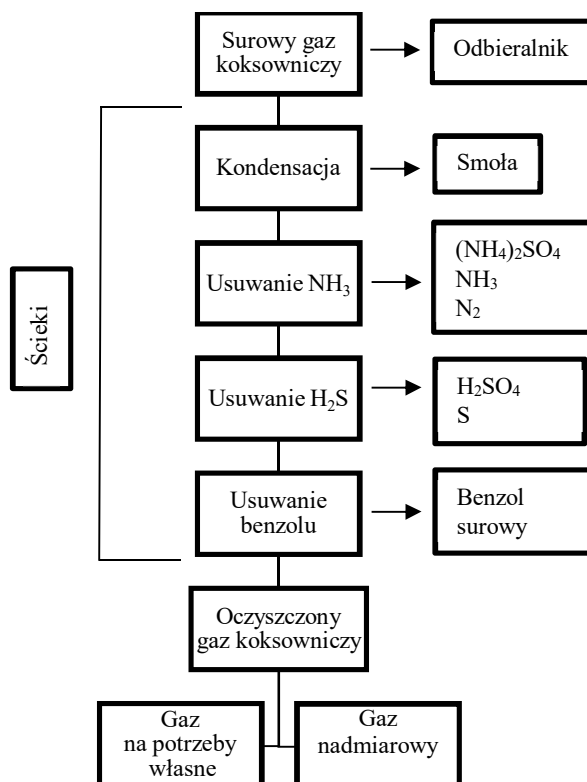
## Wstęp

Pierwsze wzmianki o procesie koksowania pochodzą z XVIII wieku (Karcz 1991). Pierwotnie jako paliwa w procesie koksowania używano węgla drzewnego. Dopiero gdy produkcja węgla drzewnego przestała nadążać za potrzebami hutnictwa, powodując straty w postaci wycinek drzew na dużych obszarach leśnych, podjęto próby wprowadzenia nowego paliwa, jakim był koks. Pierwszego udanego wytopu surówki przy pomocy koksu dokonano w 1735 roku w należącej do Abrahama Darbego hucie Coalbrookdale (Mantoux 1957, s. 261). Koks zyskał na znaczeniu, gdy wytapiana przy jego pomocy surówka stała się tańsza od żelaza otrzymywanego w hutach stosujących węgiel drzewny. Od tego momentu wielkie

piece bazujące na tym paliwie były wygaszane, a nowe huty budowano w pobliżu kopalni węgla kamiennego (Frużyński 2004). Obecnie, wraz ze wzrostem zapotrzebowania na żelazo, rośnie także popyt na koks, którego odpowiednie parametry jakościowe zależą od właściwego doboru węgla do mieszanek koksujących oraz samego procesu technologicznego.

## Gaz koksowniczy

Surowy gaz koksowniczy jest obok koksu drugim produktem technologicznego procesu koksowania węgla, którego ilość zależy przede wszystkim od węglowego surowca. Surowy gaz koksowniczy zawiera między innymi: smołę ( $80\text{--}120\text{g/mN}^3$ ), węglowodory benzolowe ( $30\text{--}40\text{g/mN}^3$ ), amoniak ( $6\text{--}10\text{g/mN}^3$ ) i siarkowodór ( $6\text{--}9\text{g/mN}^3$ ) (Chmielniak i in. 1987). Składniki te są usuwane z gazu koksowniczego podczas procesów chłodzenia i wielostopniowego oczyszczenia. Po tych procesach otrzymywany jest oczyszczony gaz koksowniczy, który jest mieszaniną pojedynczych gazów, takich jak: wodór, azot, tlenek węgla (IV), tlenek węgla (II) czy metan, a – w mniejszym udziale – węglowodorów nasyconych i nienasyconych oraz tlenu.



**Rysunek 20.1.** Schemat oczyszczenia surowego gazu koksowniczego

Źródło: (Karcz 2005, s. 91-100)

**Tabela 20.1. Skład oczyszczonego gazu koksowniczego**

Składnik	Ilość [%]
H <sub>2</sub>	53-60
CH <sub>4</sub>	23-28
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	2-4
CO	6-10
CO <sub>2</sub>	2-4
N <sub>2</sub>	3-8
O <sub>2</sub>	0,2-0,8

Źródło: (Tramer i in. 2005, s. 815-819)

## Węgiel

Węgiel składa się ze składników (macerałów i minerałów) niejednorodnych pod względem fizycznym i chemicznym, a o jego przydatności do poszczególnych procesów decyduje przede wszystkim skład petrograficzny, w tym jego cechy makroskopowe i mikroskopowe. Chcąc określić przydatność węgla do danego procesu technologicznego, wykonuje się analizę parametrów jakościowych węgla. Niektóre z parametrów nie determinują wpływu na kierunek wykorzystania węgla w procesach technologicznych. Zaliczyć można do nich np. zawartość wilgoci. Inaczej jest w przypadku określania parametrów o charakterze specjalistycznym (np. właściwości dylatometrycznych), gdzie węgiel wykorzystywany jest do określonych procesów technologicznych. Różnice w wartościach tych parametrów mogą mieć istotne znaczenie dla przebiegającego procesu.

**Tabela 20.2. Wskaźniki, za pomocą których oceniana jest jakość węgla**

Parametry charakteryzujące ogólne cechy węgla (uniwersalne), które uzyskuje się podczas wykonywania analizy technicznej	zawartość wilgoci, zawartość popiołu, zawartość części lotnych, ciepło spalania, wartość opałowa
Parametry charakteryzujące skład pierwiastkowy otrzymywany w wyniku analizy elementarnej	węgla, wodoru, tlenu, azotu, siarki, fosforu i chloru
Parametry otrzymywane w wyniku analizy technologicznej węgla dla określenia właściwości koksowniczych węgla	zdolność spiekania (RI), wskaźnik wolnego wydymania (SI), właściwości dylatometryczne, np. kontrakcja (a) i dylatacja (b), ciśnienie rozprężania
Parametry charakteryzujące analizę fizyczną	gęstość pozorna, gęstość rzeczywista, właściwości mechaniczne, np. wytrzymałość na ścinanie, podatność przemiałowa

Źródło: (Jelonek, Jelonek 2018, s. 69-76)

Petrograficzne składniki, które można rozpoznać w sposób makroskopowy noszą nazwę litotypów. W zależności od litotypu posiadają odmienne właściwości

sorpcyjne, ponieważ powstały ze zróżnicowanego materiału roślinnego. Na litotypy węgla kamiennego składają się mniejsze ze składników – tzw. macerały, które są możliwe do zidentyfikowania w skali mikro. Wśród macerałów wyróżniamy trzy zasadnicze grupy: wityrynit, inertynit oraz liptynit, które różnią się między sobą porowatością oraz odmienną strukturą porów, co w dużym stopniu przyczynia się do zdolności sorpcyjnych węgla.

Badania dotyczące wpływu składu macerałowego na pojemność sorpcyjną węgla dają zróżnicowane wyniki. Wielu autorów potwierdziło, że przy tym samym stopniu uwęglenia węgle błyszczące (bogate w wityrynit) mają większą pojemność sorpcyjną niż węgle matowe (o przewodze inertynitu). Pomimo iż wityrynit jest z natury mniej porowaty od inertynitu, to charakteryzuje się wyższym udziałem mikroporów. Część badań pokazuje jednak, że również węgle inertynitowe mogą charakteryzować się zwiększoną pojemnością sorpcyjną.

Węgiel w swej niejednorodnej budowie posiada pory (mezopory, makropory, mikropory), które w zależności od ich ilości i typu mogą w różnym stopniu przyczyniać się do procesów sorpcyjnych. W zależności od zawartości danego macerału izotermy sorpcji różnią się od siebie, a więc właściwości sorpcyjne węgla są zróżnicowane (Dutka, Wierzbicki 2008, s. 55-64).

## Macerały węgla

Macerały z grupy wityrynit, liptynit i inertynitu charakteryzują się odmiennymi właściwościami fizykochemicznymi oraz technologicznymi. Właściwości te są związane z procesem tworzenia się węgla, materiału roślinnego, z którego powstają, oraz takimi czynnikami jak temperatura i ciśnienie.

Macerały z grupy wityrynit mają najlepsze właściwości koksotwórcze. Wityrynit jest głównym reaktywnym składnikiem węgla w procesie karbonizacji, jego główną funkcją jest spajanie poszczególnych elementów masy koksowej. Macerały liptynitowe są o wiele bardziej plastyczne podczas procesu koksowania węgla i są odpowiedzialne za tworzenie się porów. W czasie procesu karbonizacji materiał węglowy staje się upłynniony. Kutynit i sporynit są dużo bardziej odporne termicznie i przez pewien czas nie ulegają przemianom. Ma to wpływ na powstające pory, ich rozkład i kształt, co przekłada się na reaktywność i stabilność koksu.

Badanie porowatości litotypów pochodzących z węgla wysokogatunkowych dało wgląd w strukturę mikroporów. Charakterystykę mikroporów przeanalizowano metodą niskociśnieniowej adsorpcji CO<sub>2</sub>, wykazując zmniejszenie pola powierzchni mikroporów i zmniejszenie objętości mikroporów w kolejności od wityrynit, klaryn, duryn, fuzyn. Macerały z grupy wityrynit i liptynit określa się jako reaktywne, a macerały z grupy inertynitu jako obojętne na procesy technologiczne (koksowania).

Do separacji reaktywnych macerałów w węglu niekoksującym, w pracy *Wzbo-gacanie reaktywnych macerałów w węglu: ich charakterystyka i wykorzystanie*

w *koksownictwie* (Nag i in. 2018), zastosowano metodę flotacji kolumnowej w celu wzbogacenia reaktywnych macerałów do produkcji koksu oraz poprawy jego jakości. Wzbogacony węgiel był charakteryzowany dla zrozumienia zmian potencjału koksowania za pomocą różnych technik. Został wykorzystany do produkcji koksu hutniczego poprzez odpowiednie mieszanie z innymi węglami. Poprzez wzbogacenie węgla poprawiono właściwości koksu hutniczego, co umożliwiło wykorzystanie węgla niekoksującego do produkcji koksu hutniczego. Przeprowadzone badania wykazały, że węgiel bogaty w wityrynit ma lepszy potencjał koksowania. Opierając się na właściwości macerałów, zaprojektowano mieszankę, do której użyto czterech wytypowanych węgli. Przeprowadzono karbonizację, a jakość koksu mierzono pod względem wytrzymałości na gorąco. Stwierdzono, że z węgla wzbogaconego macerałami wityrynit jakoś koksu ulega polepszeniu (Nag i in. 2018).

Macerał wityrynit jest najbardziej pożądanym składnikiem węgla koksowego, a macerały są jedną z substancji w węglu, które nadają węglowi właściwości płynne, a także przyczyniają się do jego plastyczności. W literaturze opisano różne metody wzbogacania macerału/wityrynit. Opierają się głównie na różnicy hydrofobowości.

Dostępnych jest niewiele badań, w których przeprowadzono separację macerałów celem wydajnego wykorzystania do produkcji koksu. Jak wspomniano, macerały węglowe można podzielić na dwie grupy: reaktywne i obojętne. Podczas karbonizacji reaktywne macerały przechodzą przez fazę plastyczną, która z kolei nadaje wytrzymałość powstałemu koksovi. Wzbogacone macerały mogą być wykorzystywane jako czyste paliwo do produkcji energii i szeregu innych produktów o wysokiej jakości.

Udowodniono, że zastosowanie węgla bogatego w wityrynit w produkcji koksu prowadzi do poprawy jego właściwości (Nag i in. 2022). Wzbogacanie węgla w wityrynit poza konwencjonalnymi technikami wymaga nowatorskich rozwiązań. W jednym z badań kruszenie węgla odbywało się przez naprężenia ścinające, co poprawiło uwalnianie wityrynit w węglu. Zaprojektowano młyn typu pozioma kruszarka płytowa, w którym pękanie cząstek odbywało się przez ścinanie. Dzięki analizie petrograficznej stwierdzono, że ilość wityrynit w węglu poddanym kruszeniu ścinającemu wzrosła. Tak więc wyższe stężenie wityrynit obserwowane w przypadku alternatywnego kruszenia świadczy o uwolnieniu wityrynit w wyniku kruszenia ścinającego (Nag i in. 2022). Prowadzone badania sugerują metodologię wzbogacania macerałów reaktywnych specyficzną metodą rozdrabniania i przesiewania. Przeprowadzono również eksperymenty wykorzystania wzbogaconych węgli w produkcji koksu, co pomogłoby w poprawie właściwości mieszanki węglowej, a tym samym właściwości koksu. Przyczyniłoby się również do wzbogacenia węgla w wityrynit i podwyższenia wartości węgla uboższego pod względem koksowania (Nag i in. 2022).

## Zależność pojemności sorpcyjnej węgla kamiennego dla metanu od składu petrograficznego węgla

Badając pojemność sorpcyjną węgla średnio uwęglonych o stopniu uwęglenia 1,07-1,12%, gdzie głównym składnikiem był wityrynit, przeanalizowano wpływ zawartości poszczególnych macerałów na pojemność sorpcyjną węgla. Podczas analizy próbek węgla stwierdzono korelację pomiędzy składem macerałowym a pojemnością sorpcyjną. Podczas zwiększania udziału macerałów z grupy wityrynit, pojemność sorpcyjna względem metanu zmniejszała się. Zauważona została zależność odwrotna dla wzrostu macerałów z grupy inertynitu, gdzie wzrost udziału tego macerału przyczynił się do zwiększenia pojemności sorpcyjnej węgla względem metanu. W przypadku występowania macerałów z grupy inertynitu nie stwierdzono, aby miał on istotny wpływ na wzrost lub spadek pojemności sorpcyjnej węgla względem metanu. Badając pojemność sorpcyjną w temperaturach 25°C, 35°C, 45°C oraz 55°C, wykazano, że pojemność sorpcyjna prób węgla błyszczących względem metanu maleje wraz ze wzrostem temperatury. Wiele wcześniejszych prac potwierdza zjawisko zmniejszenia pojemności sorpcyjnej układu węgiel – metan wraz ze wzrostem temperatury (Pan i in. 2012; Weishauptová i in. 2015; Godyń, Dutka 2017).

## Sorpcja wodoru na węglu kamiennym

Prace badawcze dotyczące sorpcji wodoru na węglach kamiennych są rzadko prowadzone. Zdecydowanie większą popularnością cieszą się eksperymenty na próbkach węgla aktywnego. Podczas prowadzenia badań zaobserwowano dużo większą pojemność sorpcyjną w przypadku węgla aktywnych niż węgla kamiennych (Nijkamp i in. 2001; Buczek i in. 2005; Kopac, Toprak 2009). Miejscowe nagromadzenie się wodoru w kopalniach lub na składowiskach może prowadzić do niebezpiecznych sytuacji wybuchowych. Wodór może powstawać w wyniku niskotemperaturowego utleniania węgla, co jest wynikiem reakcji między tlenem a nienasyconymi wiązaniami podwójnymi w konfiguracjach łańcuchowych i alicyklicznych węgla. Jako produkty tych reakcji powstają grupy aldehydowe, które, reagując z parą wodną, dają wodór i struktury zawierające grupę karboksylową.

Badając procesy sorpcji wodoru na węglu kamiennym, wykazano, że nie jest istotna zawartość grup macerałowych, tylko zawartość tlenu, wilgoci oraz węgla. Ilość zaabsorbowanego wodoru wzrasta wraz ze wzrostem zawartości węgla, ale tylko w przedziale 55-80% C. Maksimum zaabsorbowanego wodoru przypada na węgle kamienne o zawartości węgla 70-80%. Węgłe kamienne zawierające 55-73% węgla posiadają na swojej powierzchni hydrofobowej liczne grupy zawierające tlen, takie jak karboksylowe, hydroksylowe i karbonylowe, które odpowiadają za zwilżalny (hydrofilowy) charakter powierzchni węgla. Węgłe te pochłaniają stosunkowo niewielkie ilości wodoru. Próby zawierające od 70-80% węgla charakteryzują się największymi ilościami zaabsorbowanego wodoru, ich



struktura jest bogata w węglowodory alifatyczne i alicykliczne, które nadają hydrofobowy charakter tym próbkom węgla. Tak jest w przypadku węgla „koksujących”. Najprawdopodobniej zachodzi oddziaływanie dyspersyjne między obszarami hydrofobowymi na powierzchni węgla a cząsteczkami wodoru. Inne próbki węgla zawierające więcej niż 80% C są tylko nieznacznie zwilżalne. Węgłe te składają się ze skondensowanych pierścieni benzenowych zawierających sekszet zdelokalizowanych elektronów. Prawdopodobne jest, że elektrony  $\pi$  krążące w pierścieniach benzenowych są przyczyną powstawania dipoli oscylacyjnych. Dipole te odpowiadają za specyficzną polarność skondensowanej konfiguracji węglowodorów aromatycznych, co prowadzi do zmniejszenia ilości sorbowanego wodoru.

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały również, że ilości zaabsorbowanego wodoru są powiązane z procentową zawartością tlenu w węglu kamiennym. Maksimum sorpcji wodoru przypada na 6-8% zawartości tlenu. Węgłe o średniej zawartości tlenu posiadające hydrofobowy charakter powierzchni wykazują maksymalne ilości zaabsorbowanego wodoru. Istotną rolę w procesie sorpcji odgrywa także zawartość wilgoci w węglu. Przy zawartości wilgoci w zakresie 0,5-4% ilość zaabsorbowanego wodoru wyraźnie wzrasta, natomiast w zakresie 4-14% znacznie spada. Niewielka ilość wody nie przeszkadza cząsteczkom wodoru w sorpcji, ale znaczny wzrost liczby cząsteczek wody w strukturze węgla stanowi poważną przeszkodę w interakcji między cząsteczkami wodoru a centrami, do których powinny one trafić. Na tej podstawie można stwierdzić, że znaczne zawilgocenie węgla kamiennego może uniemożliwić sorpcję wodoru na węglach kamiennych. Dodatkowo wprowadzanie dużych ilości wody do węgla może powodować desorpcję wcześniej zaabsorbowanego wodoru (Cygankiewicz i in. 2012).

## Wpływ pojemności sorpcyjnej węgla kamiennego dla CO<sub>2</sub> z uwzględnieniem petrografii węgla

Mniejsze rozmiary oraz niższa energia aktywacji cząsteczek CO<sub>2</sub> w stosunku do CH<sub>4</sub> mają wpływ na różnice w efektywności wnikania gazu w pory, które są niedostępne dla innych gazów. Dodatkowo CO<sub>2</sub> jest bardzo dobrze sorbowany przez materiał węglowy oraz cechuje się częściową rozpuszczalnością w węglu. Podczas procesu pęcznienia wnika przez fazę organiczną w pory zamknięte niedostępne dla innych gazów. Różnice w procesach sorpcji CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> wynikają również z ich budowy. Molekuły CO<sub>2</sub> mają budowę liniową i są spolaryzowane, natomiast molekuły CH<sub>4</sub> są apolarne i mają budowę tetraedru.

Przeprowadzając badania pojemności sorpcyjnej węgla dla CO<sub>2</sub>, wykazano zależność pojemności sorpcyjnej od składu macerałowego. Węgłe o większej zawartości witrynu mają większą pojemność sorpcyjną CO<sub>2</sub> i korelacja ta słabnie, gdy w węglu zawierającym witrzyn i inertynit zawartość inertynitu zwiększa się.

Natomiast pojemność sorpcyjna CO<sub>2</sub> maleje wraz ze wzrostem zawartości liptynit. Należy jednak zauważyć, że liptynit nie jest głównym składnikiem węgla i jest mało prawdopodobne, aby mógł znacząco wpływać na sorpcję CO<sub>2</sub>. Telekolinit, który jest submacerałem wityritu, ma największy wpływ na zdolność sorpcji CO<sub>2</sub> wszystkich macerałów, posiada najkorzystniejszą strukturę porów do sorpcji CO<sub>2</sub> (Mastalerz i in. 2004).

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono zależności pojemności sorpcyjnych węgla kamiennych dla wybranych składników gazu koksowniczego z uwzględnieniem petrografii węgla. Wykazano, że pojemność sorpcyjna węgla kamiennych dla metanu zwiększa się wraz ze wzrostem zawartości inertynitu w próbce, natomiast maleje wraz ze wzrostem zawartości wityritu. Z kolei w przypadku badania pojemności sorpcyjnej węgla kamiennych dla CO<sub>2</sub> zauważono odwrotną zależność – pojemność sorpcyjna zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości inertynitu w próbce, a zwiększa się w przypadku występowania wzrostu zawartości wityritu. Dotychczas nie zbadano wpływu wzrostu zawartości inertynitu oraz wityritu w próbce na pojemność sorpcyjną węgla kamiennych dla wodoru, lecz badając proces sorpcji węgla kamiennych dla wodoru, zaobserwowano, że wpływ na ten proces mają dodatkowe czynniki, takie jak odpowiednia zawartość wilgoci oraz tlenu.

## Podziękowania

*Praca realizowana we współpracy Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie oraz Centralnego Laboratorium Pomiarowo-Badawczego Sp. z o.o. w Jastrzębiu Zdroju w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” edycja VI dla szkoły doktorskiej.*

*Nr umowy: U/64/2023*

## Literatura

1. Baran P., Koziół S., Czerw K., Smoliński A., Zarębska K. (2023), *Sorption-Dilatometric Properties of Coal from a High-Methane Mine in a CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Atmosphere*, „Energies”, 3, 16, 4, 1785.
2. Baran P., Czerw K., Samojeden B., Czuma N., Zarębska K. (2018), *The Influence of Temperature on the Expansion of a Hard Coal-Gas System*, „Energies”, 11, 2735.
3. Buczek B., Czepirski L., Zietkiewicz J. (2005), *Improvement of Hydrogen Storage Capacity for Active Carbon*, „Springer Science Business Media”, 11, s. 877-880.
4. Chmielniak K., Dolecki J., Dutkowski A. i in. (1987), *Koksownictwo*, WN Śląsk, Katowice.
5. Cygankiewicz J., Dudzińska A., Żyła M. (2012), *Examination of Sorption and Desorption of Hydrogen on Several Samples of Polish Hard Coals*, „Adsorption”, 18, 3-4, s. 189-198.
6. Dutka B., Wierzbicki M. (2008), *Wybrane własności węgla w rejonach zagrożonych wyrzutami metanu i skał*, „Górnictwo i Geoinżynieria”, 1, s. 55-64.

7. Dutta P., Bhowmik S., Das S. (2011), *Methane and Carbon Dioxide Sorption on a Set of Coals from India*, „International Journal of Coal Geology”, 85, s. 289-299.
8. Espinoza D.N., Vandamme M., Pereira J.M., Dangla P., Vidal-Gilbert S. (2014), *Measurement and Modeling of Adsorptive Poromechanical Properties of Bituminous Coal Cores Exposed to CO<sub>2</sub>: Adsorption, Swelling Strains, Swelling Stresses and Impact on Fracture Permeability*, „International Journal of Coal Geology”, 134, s. 80-95.
9. Frużyński A. (2004), *Historia przemysłu koksochemicznego na ziemiach polskich*, 2, Katowice.
10. Godyń K., Dutka B. (2017), *Wpływ zawartości grupy macerałów na wybrane parametry sorpcyjne w średnio uwęglonych próbkach węgla z części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*, „Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN”, 19, 3, s. 37-45.
11. Jelonek I., Jelonek Z. (2018), *Ocena jakości paliw na przykładzie węgla kamiennych i pelletów drzewnych*, „Górnictwo Odkrywkowe”, 59, 3, s. 69-76.
12. Karcz A. (1991), *Koksownictwo*, 1, AGH, Kraków.
13. Karcz A. (2005), *Problemy zagospodarowania gazu koksowniczego*, „Polityka Energetyczna”, 8, s. 91-100.
14. Kopac T., Toprak A. (2009), *Hydrogen Sorption Characteristics of Zonguldak Region Coal Activated by Physical and Chemical Methods*, „Korean Journal of Chemical Engineering”, 26, 6, s. 1700-1705.
15. Mantoux P. (1957), *Rewolucja przemysłowa w XVIII wieku*, PWN, Warszawa.
16. Mastalerz M., Gluskoter H., Rupp J. (2004), *Carbon Dioxide and Methane Sorption in High Volatile Bituminous Coals from Indiana, USA*, „International Journal of Coal Geology”, 60, s. 43-55.
17. Nag D., Das B., Singh R., Sriramoju S., Meshram A., Dash P.S. (2022), *Effect of Grinding Behavior on Liberation of Coal Macerals*, „ISIJ International”, 62, 1, s. 99-103.
18. Nag D., Kopparthi P., Dash P.S., Saxena V.K., Chandra S. (2018), *Enrichment of Reactive Macerals in Coal: Its Characterization and Utilization in Coke Making*, „Metallurgical Research and Technology”, 115(2), 209.
19. Nijkamp M.G., Raaymakers J.E.M.J., van Dillen A.J., de Jong K.P. (2001), *Hydrogen Storage Using Physisorption-Materials Demands*, „Applied Physics”, 72, s. 619-623.
20. Pan J., Hou Q., Ju Y., Bai H., Zhao Y. (2012), *Coalbed Methane Sorption Related to Coal Deformation Structures at Different Temperatures and Pressures*, „Fuel”, 102, s. 760-765.
21. Sadasivam S., Masum S., Chen M., Stańczyk K., Thomas H. (2022), *Kinetics of Gas Phase CO<sub>2</sub> Adsorption on Bituminous Coal from a Shallow Coal Seam*, „Energy and Fuels”, 36, 15, s. 8360-8370.
22. Tramer A., Ściążko M., Karcz A. (2005), *Techniczne aspekty wykorzystania gazu koksowniczego do pozyskiwania wodoru*, „Przemysł Chemiczny”, 84, 11, s. 815-819.
23. Wang Z., Tang X., Yue G., Kang B., Xie C., Li X. (2015), *Physical Simulation of Temperature Influence on Methane Sorption and Kinetics in Coal: Benefits of Temperature under 273.15 K*, „Fuel”, 158, s. 207-216.
24. Weishauptová Z., Pribyl O., Sykorová I., Machovic V. (2015), *Effect of Bituminous Coal Properties on Carbon Dioxide and Methane High Pressure Sorption*, „Fuel”, 139, s. 115-124.
25. Weniger, P., Francù, J., Hemza, P., Krooss, B.M. (2012), *Investigations on the Methane and Carbon Dioxide Sorption Capacity of Coals from the SW Upper Silesian Coal Basin*, „International Journal of Coal Geology”, 93, s. 23-39.
26. Wierzbicki M. (2013), *The Effect of Temperature on the Sorption Properties of Coal from Upper Silesian Coal Basin*, „Archives of Mining Sciences”, 58, 4, s. 1163-1176.

27. Zhang L., Ren T.-X., Aziz N. (2013), *A Study of Laboratory Testing and Calculation Methods for Coal Sorption Isotherms*, „Journal of Coal Science & Engineering”, 19, 2, s. 193-202.

## Sorption Properties of Coals in Relation to Selected Components of Coke Oven Gas

**Abstract:** The quality of produced steel is influenced by various factors, including the quality of coke, which is produced from metallurgical coal. The quality requirements for coke are constantly increasing. Domestic coking plants have a limited base of coking coals, whilst the prices of imported coals are high. Therefore, it is important to fully utilise the coking properties of native coals. According to literature data, the sorption-dilatometric behaviour of coking coals can be correlated with the coke properties, which depend on the gases generated during the coking process. This review provides information on the sorption properties of bituminous coals for selected components of coke gas, such as methane, carbon monoxide (IV), and hydrogen. The relationships between sorption capacity and petrographic composition of bituminous coals for methane and carbon monoxide (IV) are presented. In the case of hydrogen sorption, it has been observed that the variation in the amount of sorbed hydrogen is related to the moisture content of the coal samples. Additionally, coals with high hydrophobicity and a significant content of aliphatic hydrocarbons exhibit the highest hydrogen sorption capacity.

**Keywords:** coke oven gas, coke, sorption capacity, coal

## Rozdział 21

# Wpływ degradacji abiotycznej na wybrane właściwości fizykomechaniczne i morfologię biodegradowalnych materiałów polimerowych

Joanna Tomasiak, Miłosz Wrotniak, Aleksandra Pszczoła, Damian Szopiński

Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny

**Streszczenie:** Celem rozdziału było przedstawienie badań nad degradacją sznurka wykonanego z materiału biodegradowalnego, używanego w ogrodnictwie. Badano trzy próbki sznurka biodegradowalnego firmy NOWEKO wykonanego z kompozytu biodegradowalnego BIOPLAST105 firmy BIOTEC oraz sznurek wykonany z polipropylenu. Badania mechaniczne oraz mikroskopowe zostały wykonane przed starzeniem oraz po 3, 6, 9 oraz 12 tygodniach w komorze starzeniowej. Dla sznurków wykonanych z materiału biodegradowalnego wydłużenie przy zerwaniu zwiększa się wraz z czasem starzenia, siła zerwania zmienia się nieznacznie. Dla sznurka wykonanego z polipropylenu siła zerwania po 3 tygodniach zmalała, a następnie zachowywała zbliżone wartości. Badania mikroskopowe pokazały, że powierzchnia biokompozytu z czasem starzenia pęka wzdłuż włókien sznurka.

**Słowa kluczowe:** degradacja abiotyczna, kompozyt biodegradowalny, sznurek ogrodniczy

## Wprowadzenie

Tworzywa biodegradowalne składają się częściowo lub w całości z polimerów pochodzenia syntetycznego lub naturalnego, głównie z polisacharydów, białek i włókien (Rai i in. 2021, s. 2). Do 2017 roku jedynie 2,6 mld ton z 8,3 mld ton wyprodukowanych materiałów polimerowych zostało poddanych recyklingowi, co daje około 31% zrecyklingowanych odpadów. Pozostałe odpady będą się rozkładały setki lat na wysypiskach śmieci (Siwek i in. 2019, s. 480). W 2019 roku na świecie wyprodukowano 368 mln ton tworzyw polimerowych, z czego najwięcej, bo aż 51%, w Azji. Głównymi gałęziami wykorzystującymi materiały polimerowe w Europie są przemysł opakowań (około 40%) i budownictwo (20%), przemysł rolniczy to 3,4% (dane z 2019 r.). Natomiast najczęściej stosowanym

polimerem jest polipropylen (Plastics Europe 2020, s. 25). Obecnie w rolnictwie stosowane są włókniny, siatki, sznurki (Siwek i in. 2019, s. 480), folie, opakowania (Cabrera i in. 2022, s. 1-2) wykonane z tradycyjnych polimerów, na przykład polipropylenu oraz polietylenu. W krajach europejskich zwraca się coraz większą uwagę na ekologiczny aspekt nieodpowiedniej gospodarki odpadami, również w sektorze rolnictwa, na przykład w Hiszpanii, w Almerii, gdzie bardzo rozwinięte jest rolnictwo szklarniowe (Sayadi-Gmada i in. 2019, s. 1-2). Jest to bardzo potrzebny trend, ponieważ wciąż rośnie wykorzystanie artykułów wytworzonych z konwencjonalnych materiałów polimerowych (Serrano-Ruiz i in. 2021, s. 1), a przewiduje się, że wykorzystanie folii z tworzyw polimerowych wzrośnie o 59% w latach 2018-2026 (Sintim i in. 2020, s. 1). Z tego powodu rośnie zapotrzebowanie na materiały naturalne i biodegradowalne (Tor-Świątek i in. 2022, s. 1). Takie polimery, ze względów etycznych, powinny być tworzone z niejadalnych roślin lub odpadów żywności, przykładami takich substancji mogą być: trzcina cukrowa, skrobia, polilaktyd (PLA) (Siwek i in. 2019, s. 482), łuski ryżu, wytloki różnych warzyw i owoców. Dodatkowo część owoców i warzyw trafia do odpadów (Maraveas 2020, s. 1), a dzięki takiemu rozwiązaniu mogłyby być wykorzystane i nie zmarnować się. Materiały biopolimerowe wykonane z pojedynczych substancji nie posiadają właściwości mechanicznych zbliżonych do tradycyjnych materiałów polimerowych (Rai i in. 2021, s. 2). Dlatego bada się materiały kompozytowe, złożone z dwóch lub więcej materiałów biodegradowalnych (Singh i in. 2019, s. 1; Tor-Świątek, Garbacz 2021, s. 106) oraz wpływ parametrów wytwarzania (Tor-Świątek, Garbacz, Jachowicz 2016, s. 83) w celu znalezienia najwytrzymalszych kompozytów.

## Materiał i metody badawcze

Badaniom poddano trzy typy sznurka ogrodniczego wykonanego z biodegradowalnego polimeru oraz powszechnie stosowany sznurek wykonany z polipropylenu. Biodegradowalne sznurki zostały wykonane z polimeru BIOPLAST105 przez firmę NOWEKO sp. z o.o, poszczególne próbki różniły się parametrami wytwarzania. Proces wytwarzania sznurka polega na wytłaczaniu arkuszy folii, które następnie zostają pocięte i splecione w sznurek. Próbkę zostały oznaczone przez producenta jako 1480TEX, 1550TEX oraz 1850TEX, gdzie TEX jest miarą wytrzymałości sznurka. Polimer, z którego wykonano sznurki, został opracowany przez firmę BIOTEC (Niemcy) w 2018 roku (Stabingyte 2021, s. 19). Składa się on głównie ze: skrobi destrukuryzowanej i/lub pochodnej skrobi, kopoliestru alifatyczno-aromatycznego, polihydroksyalkanianu (ang. *polyhydroxyalkanoate* – PHA) oraz polilaktydu0 (poli(kwas mlekowy) (ang. *polylactic acid* – PLA). Dokładny skład procentowy oraz dodatki chronione są patentem [EP2984138A1], więc nie są udostępniane przez producenta. Sznurek wykonany z polipropylenu został wyprodukowany przez firmę F.P.H. DAGLIN.

Badania obejmowały analizę wpływu procesu starzenia na wybrane właściwości mechaniczne oraz morfologię struktury kompozytów. W tym celu wykonano pomiary wytrzymałości na rozciąganie, elastyczności, wydłużenia przy zerwaniu oraz analizę makro- i mikroskopową próbek po zerwaniu. Pomiary wykonano przed umieszczeniem próbek w komorze starzeniowej oraz po 3, 6 i 9 tygodniach w komorze. Badania wykonano zgodnie z odpowiednimi normami przedmiotowymi. Badania przeprowadzono w temperaturze normalnej.

Badania wytrzymałości na rozciąganie, elastyczności oraz wydłużenia przy zerwaniu wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z010. Siła wstępna wynosiła 0,1 MPa, prędkość badania była równa 50 mm/min. Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą: PN-EN ISO 527-2:2012.

Analiza struktury mikroskopowej została przeprowadzona z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Nikon Eclipse LV100ND. Analizę prowadzono w świetle odbitym przy użyciu obiektywów: 2,5; 5; 10 i 20 x.

Próbki poddano starzeniu abiotycznemu w komorze starzeniowej TestAn Temperature & Humidity Chamber. W komorze ustalono temperaturę równą 40°C oraz wilgotność równą 60%. Do zwilżania użyto wody destylowanej. W komorze umieszczono 24 próbki dla każdego typu sznurka. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą: PN-EN 14806:2010.



**Rysunek 21.1.** Komora starzeniowa z umieszczonymi w środku próbkami

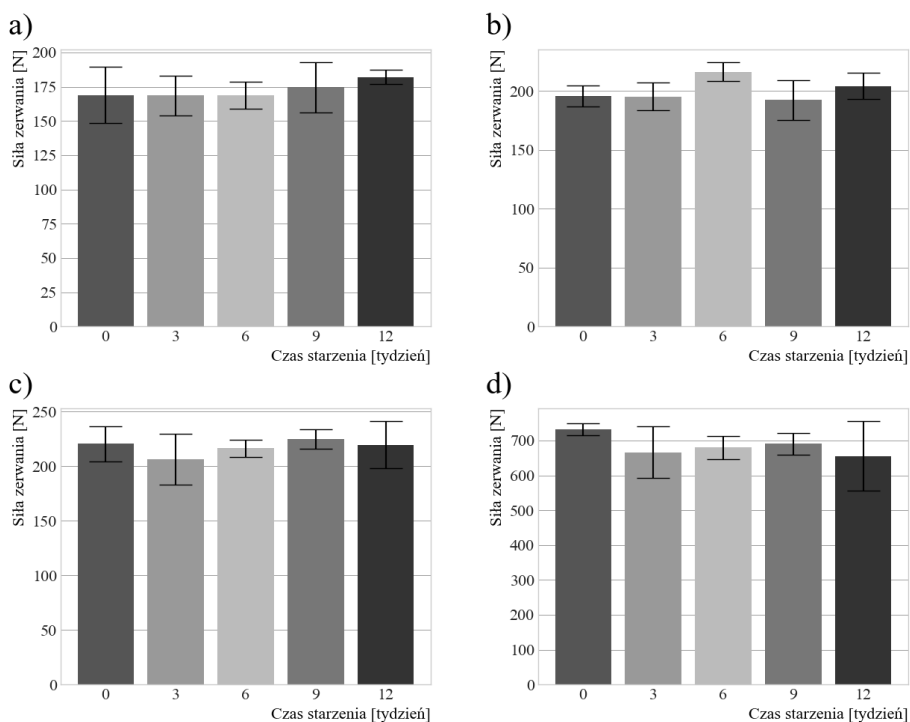
Źródło: Opracowanie własne



## Wyniki badań

Otrzymane wyniki właściwości mechanicznych przedstawiono na *rys. 21.2-21.3*, wyniki analizy makroskopowej przestawiono na *rys. 21.4*, natomiast wyniki analizy mikroskopowej na *rys. 21.5*.

Badania właściwości mechanicznych obejmowały pomiar siły zerwania oraz wydłużenia przy zerwaniu. Wyniki badań wybranych właściwości mechanicznych, tj. siły zerwania oraz wydłużenia przy zerwaniu, przedstawiono na *rys. 21.2* oraz *21.3*.



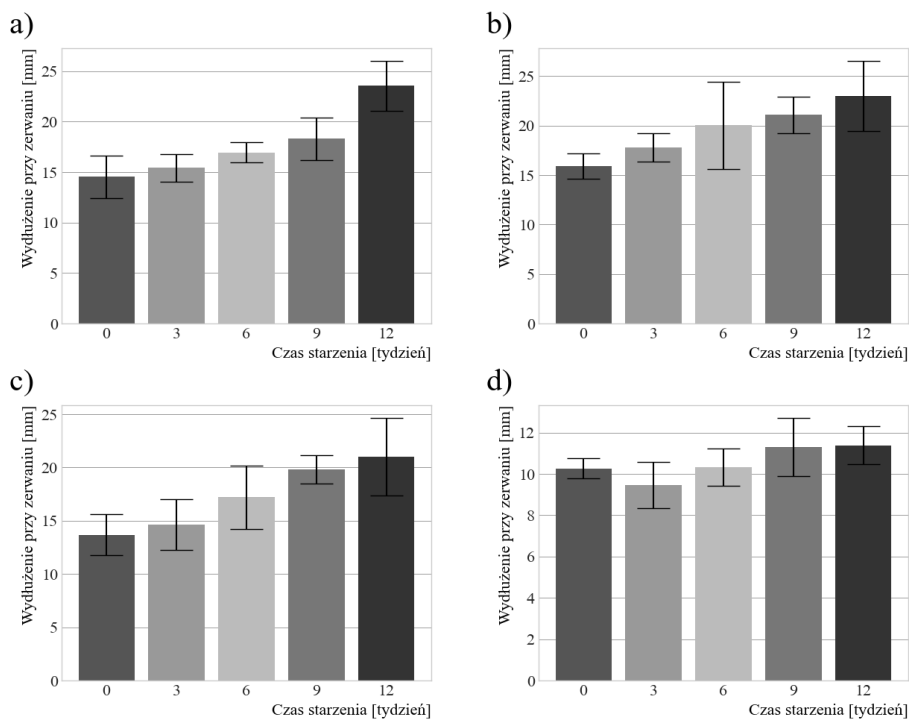
**Rysunek 21.2.** Wykresy zależności siły zerwania w funkcji czasu starzenia dla próbki a) 1480TEX, b) 1550TEX, c) 1850TEX oraz d) PP

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki siły zerwania poszczególnych próbek nie wykazały (jednoznacznych) zależności. Może to być wynikiem niehomogeniczności poszczególnych włókien tworzących próbki, z których podczas starzenia wypłukane zostały poszczególne składniki kompozytu. Próbki zbudowane są z włókien, które są niejednorodne, co potwierdzają zdjęcia mikroskopowe. Próbka PP wykazała stopniowy spadek siły, średnio o 8,2%, co świadczy o jednorodnym składzie materiałowym. Siła zerwania dla wszystkich badanych próbek zmienia się nieznacznie wraz ze wzrostem czasu starzenia.

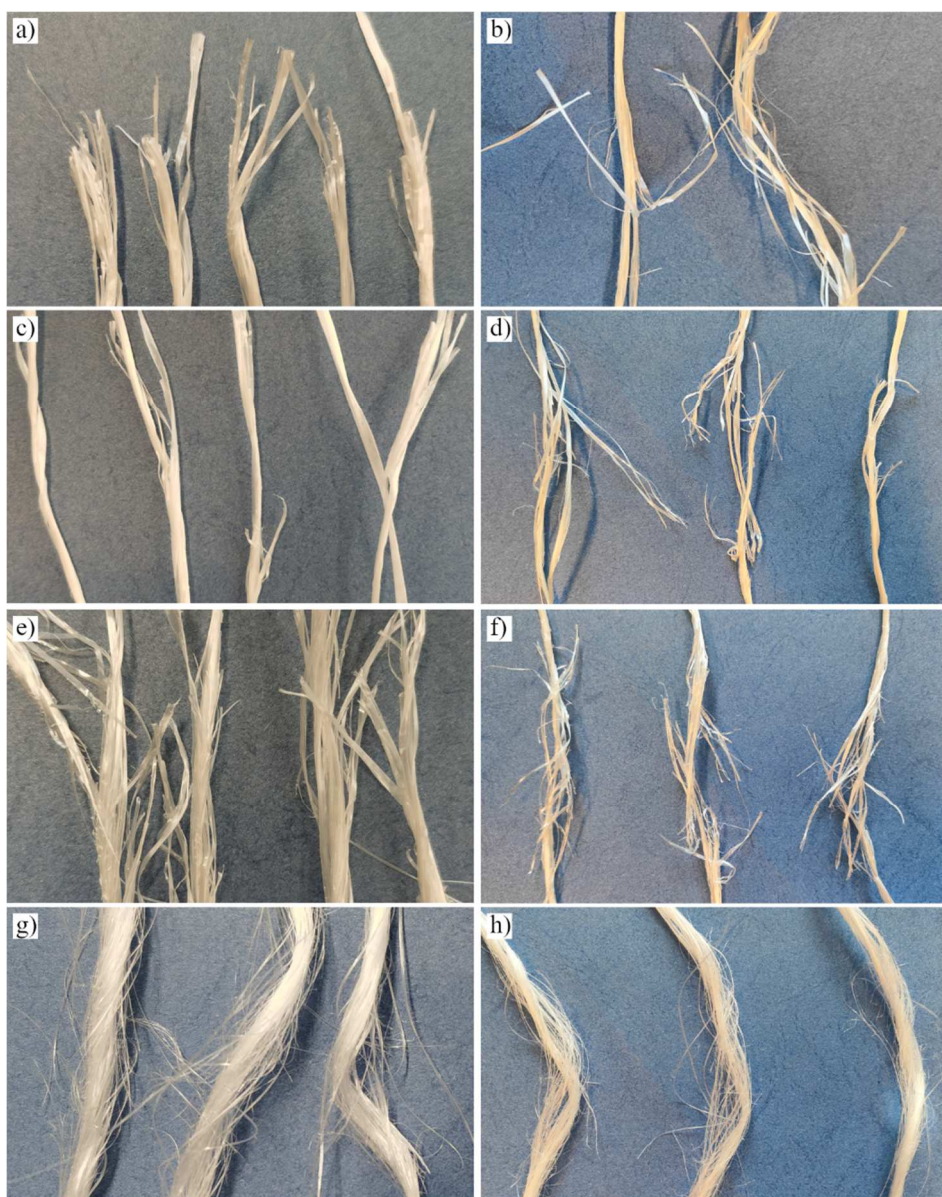


Wydłużenie przy zerwaniu próbki 1480TEX (rys. 21.3a) zwiększa się proporcjonalnie o ok. 27,7%. Wydłużenie wzrosło o 6,2; 16,7; 26 i 62,1% odpowiednio po 3, 6, 9, 12 tyg. starzenia w odniesieniu do próbki badanej przed starzeniem. Wydłużenie przy zerwaniu dla próbki 1550TEX (rys. 21.3b) zwiększa się proporcjonalnie średnio o 28,7%. Wydłużenie wzrosło o 12; 25,9; 32,4 i 44,4% odpowiednio po 3, 6, 9, 12 tyg. starzenia w odniesieniu do próbki badanej przed starzeniem. Wydłużenie przy zerwaniu dla próbki 1850TEX (rys. 21.3c) zwiększa się proporcjonalnie średnio o 32,6%. Wydłużenie przy zerwaniu wzrosło o 6,9; 25,7; 44,6 i 53,3% odpowiednio po 3, 6, 9, 12 tyg. starzenia w odniesieniu do próbki badanej przed starzeniem. Wydłużenie przy zerwaniu dla próbki PP (rys. 21.3d) po 3 tygodniach zmalało o 7,9%, następnie zwiększało się o 0,5%, 10% oraz 10,8% odpowiednio po 6, 9, 12 tyg. Starzenia w odniesieniu do próbki badanej przed starzeniem. Dla próbek wykonanych z biokompozytów wartość wydłużenia przy zerwaniu rośnie wraz z czasem starzenia, natomiast dla próbki wykonanej z polipropylenu wartość ta rośnie nieznacznie.



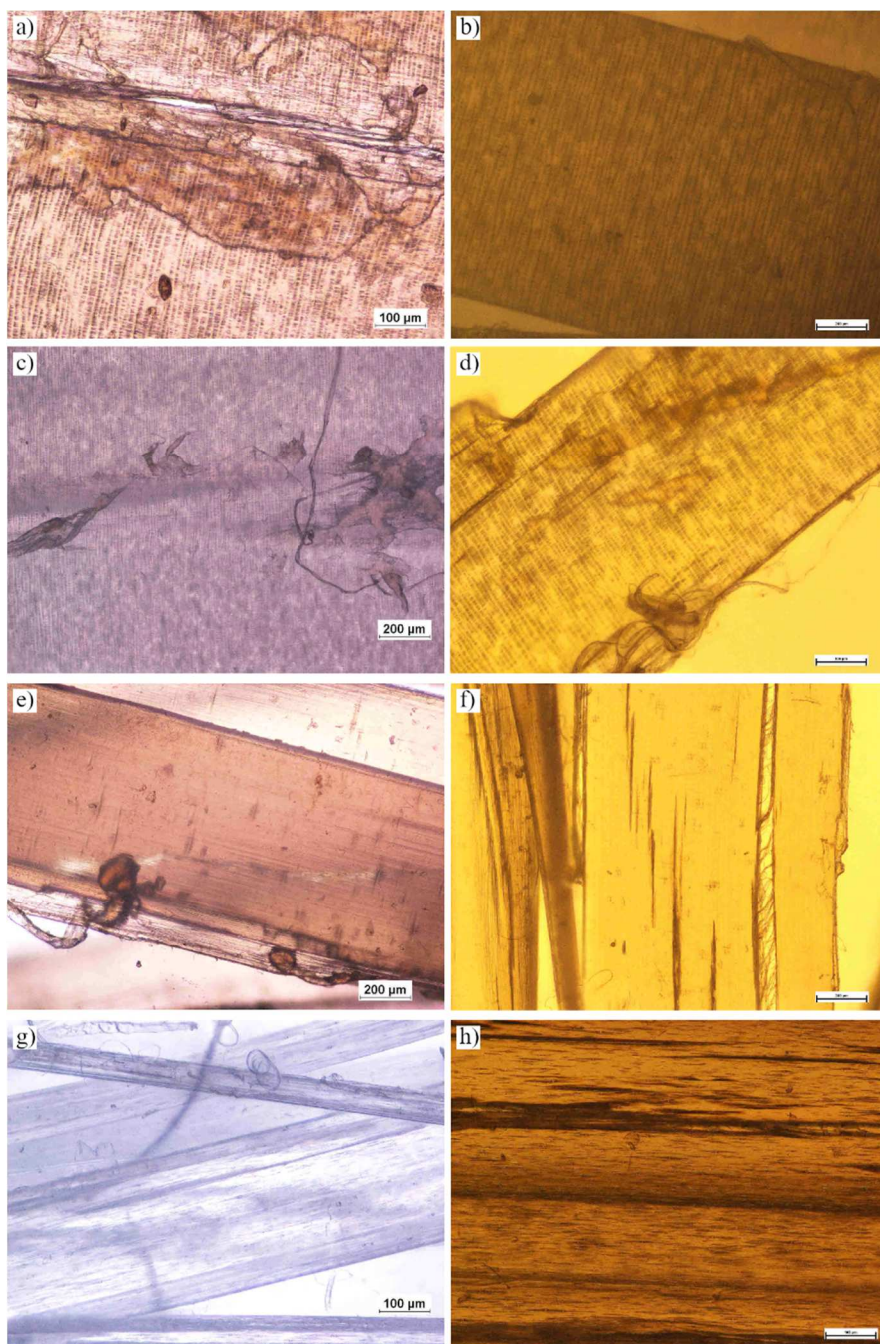
**Rysunek 21.3.** Wykresy zależności wydłużenia przy zerwaniu próbki a) 1480TEX, b) 1550TEX, c) 1850TEX oraz d) PP

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 21.4.** Struktura makroskopowa po badaniu wytrzymałościowym: próbki 1480TEX a) przed degradacją, b) po 12 tyg. starzenia; próbki 1550TEX c) przed degradacją, d) po 12 tyg. starzenia; próbki 1850TEX e) przed degradacją, f) po 12 tyg. starzenia; oraz próbki PP g) przed degradacją, h) po 12 tyg. starzenia

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 21.5.** Morfologia włókna po badaniu wytrzymałościowym: próbki 1480TEX a) przed degradacją, b) po 12 tyg. starzenia; próbki 1550TEX c) przed degradacją, d) po 12 tyg. starzenia, próbki 1850TEX e) przed degradacją, f) po 12 tyg. starzenia; oraz próbki PP g) przed degradacją, h) po 12 tyg. starzenia

Źródło: Opracowanie własne



Wraz ze zwiększaniem czasu starzenia do pęknięcia próbek biokompozytowych 1480TEX i 1550TEX dochodziło coraz bliżej środka (*rys. 21.4a-d*). Zaobserwowano również wzrost ilości poszarpań w miejscu pęknięcia. W odróżnieniu od pozostałych próbek, próbki 1850TEX pękały w środkowej części (*rys. 21.4e-f*). Próbki polipropylenowe (*rys. 21.4g-h*) po badaniu charakteryzowały się podobną ilością pęknięć, poszarpań oraz rozwarstwień niezależnie od czasu spędzonego w komorze starzeniowej.

W przypadku próbek oznaczonych jako 1480TEX (*rys. 21.5a-b*), 1550TEX (*rys. 21.5c-d*) oraz 1850TEX (*rys. 21.5e-f*) pojawiły się pęknięcia wzdłuż sznurka. Ponadto na brzegu było widać dużą ilość poszarpań. W miarę upływu czasu, jaki sznurek spędził w komorze starzeniowej oraz wraz ze wzrostem miary TEX wzrastała ilość pęknięć oraz poszarpań. Wzorcowy sznurek z PP (*rys. 21.5g-h*) bez względu na czas spędzony w komorze starzeniowej praktycznie nie zmienił swojej morfologii. Zaobserwowano jedynie pojawienie się pojedynczych poszarpań. Na *rys. 21.4-5* znajdują się wybrane fotografie struktur makroskopowych (*rys. 21.4*) oraz wybrane morfologie włókien (*rys. 21.5*) dla poszczególnych próbek.

## Podsumowanie

Badania przeprowadzono na próbkach w formie sznurka wykonanego z wchodzącego na rynek kompozytu biodegradowalnego oraz z najczęściej stosowanego materiału – polipropylenu. Przeprowadzone badania pokazały, że degradacja ma wpływ zarówno na właściwości mechaniczne, jak i morfologię próbek wykonanych z biokompozytów. Próbki wykonane z kompozytu biodegradowalnego wraz z czasem starzenia stają się bardziej elastyczne i ciągliwe. Dla próbki wykonanej z polipropylenu wartość wydłużenia przy zerwaniu się nie zmienia. Siła zerwania dla wszystkich próbek zmienia się nieznacznie po degradacji w komorze. Badania morfologii wykazały, że w próbkach wykonanych z kompozytu biodegradowalnego rozkładają się aglomeraty, które występowały w strukturze materiału przed starzeniem.

Pomimo słabszych właściwości mechanicznych w stosunku do materiału syntetycznego (PP), sznurki biokompozytowe mogą być wykorzystywane w ogrodnictwie do podwiązywania roślin. Badania wykazały, że sznurki biokompozytowe w odniesieniu do normy EN ISO 4167:2006 nie spełniają wymogów ich wykorzystania podczas procesu prasowania i wiązania beli. W przypadku użycia tego sznurka jako sznurka rolniczego, na przykład do wiązania bel słomy czy siana, konieczne jest wykorzystanie większej ilości sznurka i kilkukrotne obwiązanie, uwzględniając wytyczne ww. normy.

Przestawione badania w dalszej kolejności zostaną rozszerzone o badania wytrzymałości w podwyższonej temperaturze oraz kompostowalność.

## Podziękowanie

*Dziękujemy firmie NOWEKO sp. z o.o. za współpracę oraz udostępnienie próbek do badań.*

## Literatura

1. Cabrera G., Li J., Maazouz A., Lamnawar K. (2022), *A Journey from Processing to Recycling of Multilayer Waste Films: A Review of Main Challenges and Prospects*, „Polymers”, 14, 2319, s. 1-33.
2. Maraveas C. (2020), *Production of Sustainable and Biodegradable Polymers from Agricultural Waste*, „Polymers”, 12, 1127, s. 1-22,
3. Norma PN EN ISO 4167:2007 – Sznurki rolnicze poliolefinowe.
4. Norma PN-EN 14806 – Opakowania – Ocena wstępna rozpadu materiałów opakowaniowych w symulowanych warunkach kompostowania w badaniach w skali laboratoryjnej.
5. Norma PN-EN ISO 527-2:2012 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 2: Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do różnych technik formowania.
6. Plastics Europe – Association of Plastic Manufacturers (2020), *Plastics – The Facts 2020*, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/> (dostęp: 10.03.2023).
7. Rai P., Mehrotra S., Priya S., Gnansounou E., Sharma S. K. (2021), *Recent Advances in the Sustainable Design and Applications of Biodegradable Polymers*, „Bioresource Technology”, 325, 124739, s. 1-12.
8. Sayadi-Gmada S., Rodríguez-Pleguezuelo C.R., Rojas-Serrano F., Parra-López C., Parra-Gómez S., García-García M.d.C., García-Collado R., Lorbach-Kelle M.B., Manrique-Gordillo T. (2019), *Inorganic Waste Management in Greenhouse Agriculture in Almeria (SE Spain): Towards a Circular System in Intensive Horticultural Production*, „Sustainability”, 11, 3782, s. 1-16.
9. Serrano-Ruiz H., Martin-Closas L., Pelacho A.M. (2021), *Biodegradable Plastic Mulches: Impact on the Agricultural Biotic Environment*, „Science of the Total Environment”, 750, 141228.
10. Sintim H Y., Bary A.I., Hayes D.G., Wadsworth L.C., Anunciado M.B., English M.E., Bandopadhyay S., Schaeffer S.M., DeBruyn J.M., Miles C.A., Reganold J.P., Flury M. (2020), *In Situ Degradation of Biodegradable Plastic Mulch Films in Compost and Agricultural Soils*, „Science of the Total Environment”, 727, 138668, s. 1-33
11. Singh T., Gangil B., Patnaik A., Biswas D., Fekete G. (2019), *Agriculture Waste Reinforced Corn Starch-Based Biocomposites: Effect of Rice Husk/Walnut Shell on Physicomechanical, Biodegradable and Thermal Properties*, „Materials Research Express”, 6, 4, s. 1-23.
12. Siwek P., Domagała-Świątkiewicz I., Bucki P., Puchalski M. (2019), *Biodegradable Agroplastics in 21<sup>st</sup> Century Horticulture*, „Polimery”, 7-8, 64, s. 480-486.
13. Stabingyte L. (2021), *Design of Plant-Based Biodegradable Plastic Composites for Sustainable Packaging*, <https://publ.ktu.edu/object/elaba:95804446/> (dostęp: 10.03.2023).
14. Tor-Świątek A., Garbacz T. (2021), *Effect of Abiotic Degradation on the Colorimetric Analysis, Mechanical Properties and Morphology of PLA Composites with Linen Fibers*, „Advances in Science and Technology Research Journal”, 15, 1, s. 99-109.
15. Tor-Świątek A., Garbacz T., Jachowicz T. (2016), *Quantitative Assessment of the Microscopic Structure of Extruded and Injected Low-Density Polyethylene Modified with Microspheres by Image Analysis*, „Cellular Polymers”, 35, 2, s. 67-84.
16. Tor-Świątek A., Garbacz T., Stloukal P. (2022), *Analysis of Selected Properties of Microporous PLA as a Result of Abiotic Degradation*, „Materials”, 15, 3133, s. 1-14.

## Influence of Abiotic Degradation on Selected Physicomechanical Properties and Morphology of Biodegradable Polymeric Materials

**Abstract:** The aim of the chapter was to investigate the degradation of a string made of biodegradable material used in gardening. Three samples of the biodegradable NOWEKO string made of the biodegradable composite BIOPLAST105 by BIOTEC and a string made of polypropylene were tested. Mechanical and microscopic tests were performed before aging and after 3, 6, 9 and 12 weeks in the aging chamber. For strings made of biodegradable material, the elongation at break increases with aging time, the breaking force changes slightly. For the string made of polypropylene, the breaking force decreased after 3 weeks and then retained similar values. Microscopic examinations showed that the surface of the biocomposite cracks along the string fibers over time.

**Keywords:** abiotic degradation, biodegradable composite, garden string



## **II.**

# **Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji**





## Rozdział 22

# Wpływ wybranych czynników na polepszenie wskaźnika OEE na wybranym odcinku procesu produkcyjnego

Artur Leśniewski, Jakub Plaszczyk, Piotr Karchut, Anna Kiljan, Ewa Jonda

Politechnika Śląska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny

**Streszczenie:** Celem rozdziału było określenie wpływu czynników losowych, takich jak brak operatora lub awaria maszyny, na wskaźnik OEE oraz analiza otrzymanych wyników. Dokonano przeglądu literaturowego z dziedziny modelowania oraz zarządzania procesami. Następnie scharakteryzowano wskaźnik OEE oraz jego składowe. W części badawczej skupiono się na obliczeniu wskaźnika dla różnych losowych czynników występujących w procesie produkcyjnym. W rezultacie przeprowadzono trzy symulacje procesu, których wyniki przedstawiono.

**Słowa kluczowe:** analiza, FlexSim, proces produkcyjny, symulacja komputerowa, wskaźnik OEE

## Wprowadzenie

W przedsiębiorstwie produkcyjnym niezwykle istotną kwestią jest maksymalne wykorzystanie posiadanych zasobów rzeczowych, takich jak maszyny, nieruchomości, środki transportu itd. Jedną z kluczowych metod w optymalizacji procesu jest przeanalizowanie wartości wskaźnika OEE (ang. *Overall Equipment Effectiveness*), co pozwala określić czas pracy każdej z maszyn oraz uwydlatnić procesy wykazujące potencjał do poprawy. Celem badań było określenie wpływu losowych czynników (np. awaria maszyny / brak operatora) na polepszenie wskaźnika OEE oraz analiza otrzymanych wyników. Badaniu zostało poddane przedsiębiorstwo wytwarzające wałki stalowe, dysponujące niewielkimi zasobami zarówno pod względem parku maszynowego, jak i personelu.

## Elementy wskaźnika OEE

Wskaźnik OEE (ang. *Overall Equipment Effectiveness*) jest powszechnie stosowanym narzędziem do wyznaczania poziomu wykorzystania środków produkcji oraz oceny wydajności pracy w systemach produkcyjnych. Na ogólną postać

wskaźnika składają się 3 cząstkowe elementy, jakie można wyodrębnić oraz wyliczyć podczas obserwacji, analizy bądź też symulacji systemów produkcyjnych. Są to: dostępność, wydajność oraz jakość. Znajomość wartości każdego z wyżej wymienionych cech systemów jest niezbędna do wyznaczenia wskaźnika OEE. Ogólna postać wzoru, przy pomocy którego można wyznaczyć wskaźnik OEE, wygląda następująco (Dziekan i in. 2013, s. 1039-1047; Biały, Hąbek 2016; Gołda, Kampa 2018, s. 47-52; Gołda i in. 2018, s. 24-33; www.dsr.com.pl):

$$\text{OEE} = (\text{dostępność}) \times (\text{wydajność}) \times (\text{jakość}) \quad (1)$$

Dostępność można określić i zdefiniować jako stosunek czasu, w którym dana jednostka produkcyjna jest w stanie wykonywać zadania, do pełnej długości przedziału czasu (np. zmiana produkcyjna). Głównymi czynnikami bezpośrednio wpływającymi na dostępność są różnego rodzaju awarie maszyn, przestoje związane z brakiem materiału oraz wszystkie sytuacje losowe mające wpływ na czas realizacji procesu produkcji. Wzór na dostępność przedstawia się następująco (Dziekan i in. 2013, s. 1039-1047; Biały, Hąbek 2016; Gołda, Kampa 2018, s. 47-52; Gołda i in. 2018, s. 24-33; www.dsr.com.pl):

$$\text{dostępność} = (\text{rzeczywisty czas pracy}) / (\text{planowany czas pracy}) \quad (2)$$

Wydajność można opisywać jako stosunek liczby wykonanych elementów do maksymalnej liczby elementów możliwych do wykonania bądź też jako stosunek czasu wykonania zadania w warunkach idealnych do realizacji zadania w warunkach rzeczywistych. Głównymi czynnikami oddziałującymi na wydajność są m.in. błędy operatorów oraz konieczność stosowania operacji transportowych. Błędy ludzkie podczas procesu produkcyjnego wpływają również na dostępność, gdyż maszyny obsługiwane przez operatorów są bezpośrednio od nich zależne. Wzór na wydajność to (Dziekan i in. 2013, s. 1039-1047; Biały, Hąbek 2016; Gołda, Kampa 2018, s. 47-52; Gołda i in. 2018, s. 24-33; www.dsr.com.pl):

$$\text{wydajność} = (\text{liczba wykonanych elementów}) / (\text{liczba elementów uzyskana w warunkach idealnych}) \quad (3)$$

Jakość opisuje się stosunkiem liczby produktów dobrych do wszystkich produktów. W procesie produkcyjnym jest wiele czynników wpływających na jakość wytwarzanych elementów, m.in. błędy ludzkie (np. przy nastawie parametrów obróbczych, przeoczeniach, a także związane z nieprawidłową eksploatacją użytkowanych maszyn). Wzór na jakość w kontekście wskaźnika OEE przedstawia się następująco (Dziekan i in. 2013, s. 1039-1047; Biały, Hąbek 2016; Gołda, Kampa 2018, s. 47-52; Gołda i in. 2018, s. 24-33; www.dsr.com.pl):

$$\text{jakość} = (\text{liczba elementów dobrych}) / (\text{liczba wszystkich elementów}) \quad (4)$$

Wszystkie wyżej wymienione elementy składowe wskaźnika OEE, tj. jakość, dostępność i wydajność, przedstawia się w postaci procentowej, stąd podstawienie

ich do wzoru bezpośredniego na OEE daje również wynik w procentach. Za satysfakcjonujący wynik uznaje się wskaźnik OEE na poziomie powyżej 85%, jednakże bardzo ważne jest ciągłe doskonalenie procesu i dążenie do eliminacji przyczyn występowania strat. W rzeczywistości większość firm uzyskuje wyniki na poziomie około 60% (Dziekan i in. 2013, s. 1039-1047; Biały, Hąbek 2016; Gołda, Kampa 2018, s. 47-52; Gołda i in. 2018, s. 24-33; [www.dsr.com.pl](http://www.dsr.com.pl)).

Świadome korzystanie z narzędzia, jakim jest wskaźnik OEE, pozwala na dostrzeżenie odcinków produkcyjnych o dużym potencjale poprawy. Za jego pomocą możliwe jest uzyskanie informacji o stanie wykorzystania środków produkcji i poziomie jakości w analizowanym procesie, a także ogólną informację o sprawności danego odcinka bądź też procesu produkcyjnego (Dziekan i in. 2013, s. 1039-1047; Biały, Hąbek 2016; Gołda, Kampa 2018, s. 47-52; Gołda i in. 2018, s. 24-33; [www.dsr.com.pl](http://www.dsr.com.pl)).

FlexSim Simulation Software jest obecnie jednym z najbardziej powszechnych programów symulacyjnych. Służy on m.in. do wizualizowania, symulowania, modelowania oraz analizy procesów produkcyjnych. Oprogramowanie posiada prosty interfejs i nowoczesne animacje 3D umożliwiające zobrazowanie rzeczywistości produkcyjnej. Za pomocą FlexSim Simulation możliwe jest stworzenie modelu systemu produkcyjnego, analiza przebiegu produkcji w określonym czasie, zwizualizowanie i pokazanie, w jaki sposób pewne zaimplementowane zmiany wpłyną na dany system (Dziekan i in. 2013, s. 1039-1047; Biały, Hąbek 2016; Gołda, Kampa 2018, s. 47-52; Gołda i in. 2018, s. 24-33; [www.dsr.com.pl](http://www.dsr.com.pl)).

Wszystkie symulacje można wykonywać z określonym przyśpieszeniem, co daje możliwość zobaczenia wyników w większej skali czasowej. Użytkowanie programu symulacyjnego, jakim jest FlexSim, chroni przedsiębiorstwo produkcyjne przed wprowadzeniem zmian niewnoszących wartości dodanych, pozwala w łatwy sposób zlokalizować stratę i ją usunąć. Oprogramowanie daje również możliwość generowania wykresów z danymi, dzięki czemu można w łatwy sposób zobrazować niektóre problemy, np. występujące przy danej maszynie. Ponadto oprogramowanie jest zaopatrzone w narzędzie do analizy wygenerowanych danych. Wszystkie te cechy, które pomagają osobom odpowiedzialnym za dany odcinek technologiczny w jego optymalizacji, stawiają oprogramowanie FlexSim Simulation na bardzo wysokim poziomie w hierarchii programów symulacyjnych (Dziekan i in. 2013, s. 1039-1047; Biały, Hąbek 2016; Gołda, Kampa 2018, s. 47-52; Gołda i in. 2018, s. 24-33; [www.dsr.com.pl](http://www.dsr.com.pl)).

## Obliczenie wskaźnika OEE pod wpływem losowych czynników występujących w trakcie produkcji wałka

Podczas procesu produkcyjnego mogą wystąpić różnego rodzaju przestoje spowodowane przez wiele bodźców – od awarii maszyny do braku pracownika na przydzielonym stanowisku pracy. Aby określić, jak duży jest wpływ takich

czynników na płynność produkcji, konieczne jest obliczenie wskaźników OEE. Poniżej zostaną przedstawione modele wykonane w programie FlexSim, dzięki którym możliwa będzie analiza policzonego wskaźnika.

Proces produkcji wałka obejmuje takie operacje, jak: cięcie półfabrykatu, toczenie, frezowanie, szlifowanie i pakowanie. W trakcie jednej zmiany na hali produkcyjnej znajduje się pięciu pracowników:

- operator maszyny – 4,
- operator wózka widłowego – 1.

Operator maszyny jest odpowiedzialny za kontrolowanie parametrów procesu oraz transport wałka na kolejne stanowiska obróbki, natomiast zadaniem operatora wózka widłowego jest odbieranie palety z poprawnie wykonanymi produktami ze stanowiska pakowania i przetransportowanie jej do magazynu wyrobów gotowych. Między operacjami frezowania oraz szlifowania wykorzystywany jest robot, który pełni funkcję przenośnika. Zostaną przeprowadzone 3 próby porównania obliczonych wskaźników OEE: dla realnego procesu, dla procesu z uwzględnieniem awarii oraz dla procesu, w którym wystąpił brak pracownika na jednym ze stanowisk.

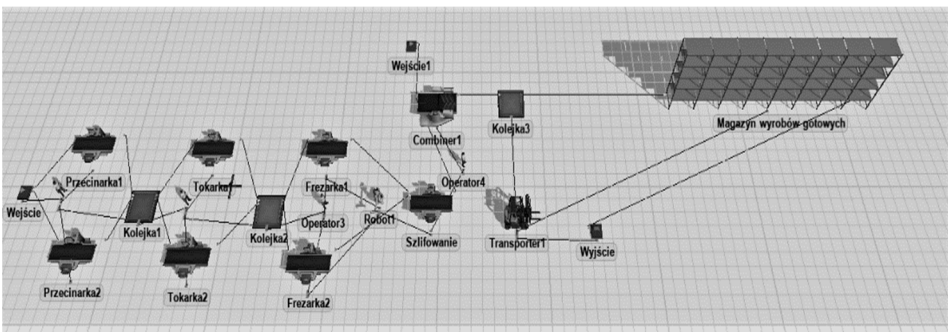
Czasy poszczególnych operacji przedstawiono w *tab. 22.1*.

**Tabela 22.1. Rozkład czasów operacji**

Lp.	Operacja	Czas procesu [s]	Czas przygotowawczy [s]
1	Cięcie	160	25
2	Toczenie		
3	Frezowanie		
4	Szlifowanie		

Źródło: Opracowanie własne

Efektywny czas pracy wynosi 7.5 h na 8 h pracy, co wynika z 30-minutowej przerwy w ciągu zmiany dla jednego pracownika. Cały proces, który podlega analizie, jest określany w skali 5 dni roboczych.



**Rysunek 22.1.** Model idealny procesu produkcji wałka wykonany w programie FlexSim

Źródło: Opracowanie własne

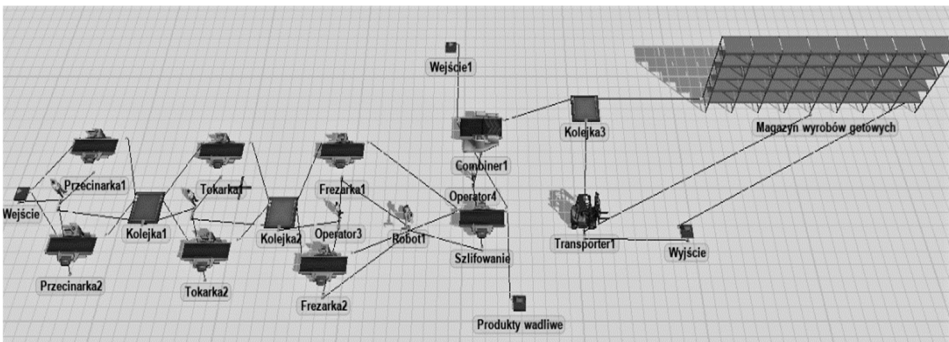
Cechą charakterystyczną modelu idealnego (rys. 22.1) jest brak przestrzeni na produkty wadliwe. Należy założyć, iż wszystkie wyroby są wykonane poprawnie.

Output	
Object	Throughput
Wejście	3797
Magazyn wyrobów gotowych	379

**Rysunek 22.2.** Wyniki dla idealnego modelu

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki przedstawione na rys. 22.2 pokazują liczbę półfabrykatów w postaci prętów poddanych obróbce w ciągu 5 dni roboczych, która wyniosła 3797 sztuk, natomiast w magazynie liczba gotowych elementów to 379 sztuk. Jest to spowodowane tym, iż paleta, na której pakowane są wałki, zmieści aż 10 detali, przez co za każdym razem, gdy należy policzyć liczbę gotowych wałków na magazynie, konieczne jest pomnożenie liczby przy magazynie gotowych wyrobów  $\times 10$ .



**Rysunek 22.3.** Model realny procesu produkcji wałka wykonany w programie FlexSim

Źródło: Opracowanie własne

Następny model to produkcja realna (rys. 22.3), czyli z uwzględnieniem produktów wadliwych, które – jak można zauważyć – są eliminowane z dalszych procesów po etapie szlifowania. Obliczenie wskaźnika OEE będzie się odnosić bezpośrednio do danych wygenerowanych przez program (rys. 22.4).

$$Q \text{ (Quality)} = \frac{3730}{3730+71} = 0,981$$

$$A \text{ (Availability)} = \frac{7,5}{8} = 0,9375$$

$$P (\text{Performance}) = \frac{160}{160+25} = 0,865$$

$$\text{OEE} = 0,981 \times 0,9375 \times 0,865 = 0,79$$

$$0,79 \times 100 = 79\%$$

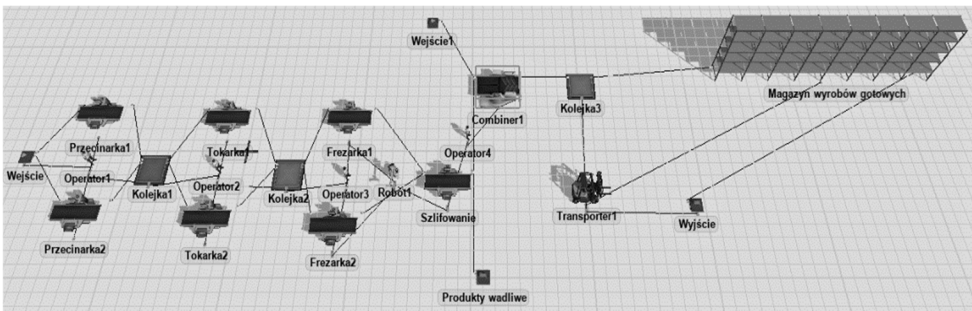
Output	
Object	Throughput
Wejście	3809
Magazyn wyrobów gotowych	373
Produkty wadliwe	71

Rysunek 22.4. Wyniki dla realnego modelu

Źródło: Opracowanie własne

Wskaźnik OEE przy produkcji realnej wynosi 79%, co świadczy o bardzo wysokiej wydajności przedsiębiorstwa.

W kolejnym przypadku (rys. 22.5) najistotniejszym punktem była awaria, która wystąpiła w trakcie realizacji całego procesu w losowym momencie oraz na losowej maszynie.



Rysunek 22.5. Model procesu produkcji wałka z uwzględnieniem awarii wykonany w programie FlexSim

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku naprawialnych obiektów, takich jak maszyny, wykorzystuje się parametry MTBF (ang. *Mean Time Between Failures*, tj. średni czas między awariami) oraz MTTR (ang. *Mean Time To Repair*, tj. średni czas naprawy). W modelu z uwzględnieniem awarii (rys. 22.5) wskaźniki te wynoszą kolejno:

$$\text{MTBF} = 100 \text{ [h]} = 360\,000 \text{ [s]}$$

$$\text{MTTR} = 4 \text{ [h]} = 14\,400 \text{ [s]}$$

Output	
Object	Throughput
Wejście	2616
Magazyn wyrobów gotowych	257
Produkty wadliwe	48

**Rysunek 22.6.** Wyniki końcowe produkcji z uwzględnieniem awarii maszyny produkcyjnej

Źródło: Opracowanie własne

Podczas obliczania wskaźnika OEE należy pamiętać, iż parametry MTBF oraz MTTR muszą zostać dołączone do obliczeń.

$$Q (\text{Quality}) = \frac{2570}{2570 + 48} = 0,981$$

$$A (\text{Availability}) = A_0 = \frac{7,5}{8} = 0,9375$$

$$A_1 = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} = \frac{100}{100 + 4} = 0,96$$

$$P (\text{Performance}) = \frac{160}{160 + 25} = 0,865$$

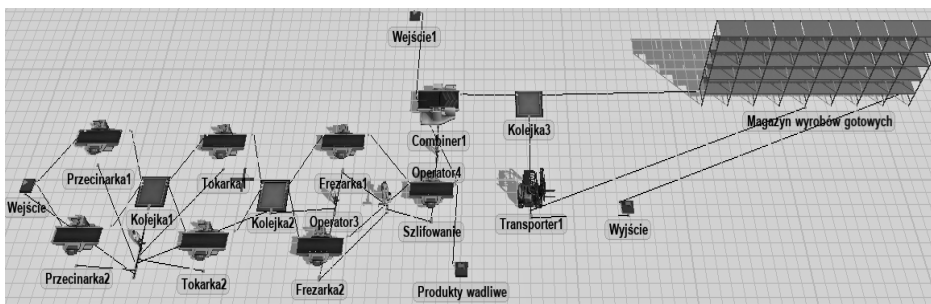
$$\text{OEE} = Q \times A_0 \times A_1 \times P$$

$$0,981 \times 0,9375 \times 0,96 \times 0,865 = 0,76$$

$$0,76 \times 100 = 76\%$$

Wskaźnik jest ewidentnie mniejszy niż w realnym procesie i wynosi 76%, niższa jest również liczba gotowych elementów.

Jako ostatni zostanie poddany analizie model, w którym przy wyznaczonej maszynie brakuje operatora (rys. 22.7).



**Rysunek 22.7.** Model procesu produkcji wałka z uwzględnieniem braku pracownika w programie FlexSim

Źródło: Opracowanie własne



Jak można zauważyć na powyższym schemacie (rys. 22.7), przy procesie cięcia występuje brak osoby zajmującej się tym etapem, przez co pracownik odpowiedzialny za tokarkę jest zobowiązany do wykonywania obowiązków osoby nieobecnej. W konsekwencji przekłada się to na zmianę czasu przygotowania w procesie cięcia z 25 na 50 [s]. Dzięki tej zmianie wyniki końcowe produkcji są następujące:

Output	
Object	Throughput
Wejście	3345
Magazyn wyrobów gotowych	328
Produkty wadliwe	65

**Rysunek 22.8.** Wyniki końcowe produkcji z uwzględnieniem braku pracownika na procesie cięcia

Źródło: Opracowanie własne

Podobnie jak w przypadku awarii, podczas obliczania jednego z parametrów należy uwzględnić zmianę czasów przebrojenia.

$$Q \text{ (Quality)} = \frac{3280}{3280 + 65} = 0,98$$

$$A \text{ (Availability)} = \frac{7,5}{8} = 0,9375$$

$$P \text{ (Performance)} = P_0 = \frac{160}{160 + 25} = 0,865$$

$$P_1 = \frac{160}{160 + 50} = 0,76$$

$$OEE = Q \times A \times P_0 \times P_1$$

$$0,98 \times 0,9375 \times 0,865 \times 0,76 = 0,60$$

$$0,60 \times 100 = 60\%$$

Wyniki są znacząco gorsze, ponieważ wskaźnik OEE wynosi zaledwie 60%. Wpływa na to nieobecność pracownika przez 5 dni roboczych.

## Podsumowanie

Wskaźnik OEE jest niezwykle istotnym narzędziem, które pozwala na pomiar efektywności procesów produkcyjnych. OEE obrazuje poprawność wykorzystania zasobów, w tym maszyn, personelu i materiałów, w celu osiągnięcia

maksymalnych wyników produkcyjnych. Wysoki wskaźnik OEE oznacza, że procesy produkcyjne są bardzo efektywne i wydajne, co przekłada się na zwiększenie zysków firmy oraz zadowolenie klientów. Z drugiej strony niski wskaźnik OEE wskazuje na problemy w procesie produkcyjnym, które należy dokładnie przeanalizować i usunąć, aby zwiększyć wydajność i efektywność produkcji.

Wyniki obliczeń wskaźnika OEE dla danej linii produkcyjnej wskazują, że jest on niski z powodu nieobecności pracownika. Można zatem wnioskować, że absencja pracownika miała istotny wpływ na wydajność i efektywność produkcji. W celu poprawy wskaźnika OEE konieczne będzie podjęcie działań mających na celu zmniejszenie wpływu nieobecności pracowników na proces produkcyjny. Można na przykład rozważyć zwiększenie liczby pracowników, którzy mogą zastąpić osoby nieobecne w danym dniu. Warto również zadbać o lepszą organizację pracy, tak aby praca była równomiernie rozłożona pomiędzy wszystkich pracowników i aby każdy miał jasno określone zadania i cele do osiągnięcia.

## Literatura

1. Bartecki K., Król D., Skowroński J. (2018), *Wyznaczanie kluczowych wskaźników wydajności procesu produkcyjnego – część I: badania teoretyczne*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 3, 22, s. 5-13.
2. Biały W., Hąbek P. (2016), *Zastosowanie wskaźnika OEE do oceny wykorzystania maszyn – studium przypadku*, „Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji”, 2(14), s. 55-65.
3. Dziekan J., Feluks K., Knapik M., Kramarz M. (2013), *Modelowanie i zarządzanie procesami przy wsparciu symulacji w programie FlexSim*, „TTS Technika Transportu Szynowego”, 10, 20, s. 1039-1047.
4. Gołda G., Kampa A. (2018), *Modelling and Simulation Method for Production Process Automation in Steel Casting Foundry*, „Archives of Foundry Engineering”, 1, 18, s. 47-52.
5. Gołda G., Kampa A., Paprocka I. (2018), *Analysis of Human Operators and Industrial Robots Performance and Reliability*, „Management and Production Engineering Review”, 1, 9, s. 24-33.
6. Mazurek W. (2013), *Wskaźnik OEE, czyli jak teorię przenieść na praktykę*, „Automatyka, Podzespoły Aplikacje”, 9, s. 114-120.
7. Misiurek B. (2012), *Strategia wdrażania systemu TPM*, „Inżynieria Maszyn”, 17, 3, s. 119-127.
8. Pawluk A. (2013), *Wskaźnik całkowitej efektywności wyposażenia (Overall Equipment Effectiveness) jako miara skuteczności i narzędzie doskonalenia organizacji*, „Studia i Prace Kolegium Zarządzania i Finansów / Szkoła Główna Handlowa”, 134, s. 9-27.
9. Purzycki G. (2003), *Wskaźnik OEE, czyli jak w ciągu kilku miesięcy znacząco zwiększyć efektywność produkcji*, „Biuletyn Automatyki”, 12, 5, s. 36-38.
10. [www.dsr.com.pl](http://www.dsr.com.pl) (dostęp: 27.03.2023).

## The Impact of Selected Factors on the Improvement of the OEE Indicator on a Selected Section of the Production Process

**Abstract:** The aim of the chapter was to determine the impact of random factors, such as the lack of an operator or a machine failure, on the OEE index and the analysis of the results obtained. A literature review in the field of modeling and

process management was carried out. Then, the OEE indicator and its components were characterized. The research part focused on calculating the index for various random factors in the production process. As a result, three process simulations were carried out, for which the results were presented.

**Keywords:** analysis, FlexSim, production process, computer simulation, OEE indicator

## Rozdział 23

# Produktywność procesu produkcyjnego w wybranym przedsiębiorstwie

Olga Sikora, Marzena Ogórek

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wyniki analizy zdolności produkcyjnej przedsiębiorstwa produkcyjnego. Wykonano analizę produktywności oraz zdolności produkcyjnej. Pierwsza część rozdziału zawiera charakterystykę produktywności oraz krótki opis analizowanego przedsiębiorstwa. W części badawczej obliczono zdolność produkcyjną.

**Słowa kluczowe:** produkcja, produktywność, zdolność produkcyjna

### Wprowadzenie

Na funkcjonowanie przedsiębiorstwa na rynku składa się wiele czynników o charakterze finansowym, jakościowym i czasowym, które mają wpływ na poziom jego konkurencyjności (Grzelak 2017). Aby przedsiębiorstwo funkcjonowało dobrze, powinno produkować wyroby o ściśle określonych parametrach użytkowych, przy niskich kosztach wytwarzania, biorąc pod uwagę możliwość produkcji i dostarczenia produktów do odbiorców w określonym, jak najkrótszym czasie. Powoduje to konieczność doskonalenia przedsięwzięć w każdym aspekcie działalności przedsiębiorstwa – od promocji i marketingu aż do działań w sferach produkcji i logistyki. Optymalizacja procesów w przedsiębiorstwie jest związana z osiąganiem wzajemnie sprzecznych celów – wyższa jakość produktów i krótszy czas realizacji zamówienia oznacza wyższe koszty wytwarzania (Brajer-Marczak 2017).

Proces produkcyjny w przedsiębiorstwach produkcyjnych jest najistotniejszym elementem ich funkcjonowania, dlatego ważne jest, aby był on jak najbardziej efektywny i ekonomiczny. Przedsiębiorstwa starają się zmaksymalizować produkcję, ponosząc przy tym jak najmniejsze nakłady. Aby to osiągnąć, muszą bardzo dokładnie analizować przebieg cyklu produkcyjnego, produktywność,

a także własną zdolność produkcyjną (Kosieradzka 2012). Ważnym aspektem funkcjonowania przedsiębiorstwa jest zdolność produkcyjna, czyli to, ile potrafi ono wyprodukować w określonym czasie. Przedsiębiorstwa produkcyjne dążą do tego, aby ta zdolność produkcyjna była na jak najwyższym poziomie. Niepełne wykorzystywanie potencjału produkcyjnego przyczynia się do wzrostu kosztu przeciętnego powyżej poziomu potrzebnego do wyprodukowania jednostki wyrobu, co prowadzi do osiągnięcia niższych wyników ekonomicznych (Pająk, Trojanowska 2012).

## Produktywność

Produktywność to stosunek wielkości produkcji wytworzonej i sprzedanej w danym okresie do ilości wykorzystanych/zużytych zasobów wejściowych. Można to zinterpretować jako efektywność zasobów wejściowych (energii, pracy ludzkiej, materiałów, kapitału, informacji, czasu itp.) w produkcji produktów oraz usług, które stanowią jego wyjście. Pomiary produktywności dążą do określenia relacji między wyjściem a wejściem systemu. Pomagają one podejmować decyzje, które powodują korzystniejsze zarządzanie przedsiębiorstwem przemysłowym. Produktywność jest częścią składową kontrolowania funkcjonowania systemu. Może ona mieć wpływ na wiele trudności w gospodarce krajowej, takich jak (Grudzewski 1992):

- inflacja,
- bezrobocie,
- międzynarodowa konkurencja.

Niski poziom produktywności może prowadzić do (Durlik 2004):

- obniżenia standardu życia i oddziaływania międzynarodowego w danym kraju;
- problemów w zapewnianiu wysokiego poziomu ochrony zdrowia, edukacji i realizacji celów socjalnych;
- wzrostu trudności sprzedaży produktu i zapotrzebowania na części zamienne oraz obniżenia się poziomu obsługi serwisowej na rynku krajowym i za granicą.

Wysoka produktywność powoduje minimalizowanie kosztów wytworzenia produktów, podwyższa efekty produkcyjne i zyski, co prowadzi do wzrostu indywidualnych wynagrodzeń, powoduje wysokie zapotrzebowanie na pracę i poprawia satysfakcję z pracy. Wysoki poziom produktywności pomaga w osiągnięciu sukcesów na polu nauki i kultury oraz bardziej konkurencyjnej pozycji na rynku międzynarodowym. Głównym celem projektowania systemów produkcyjnych i organizacji produkcji jest stworzenie takich warunków, aby ta produktywność wzrastała (Durlik 2004).

Produktywność całkowita (ogólna) – to stosunek całkowitej ilości produkcji do sumy ilości zasobów wykorzystanych do jej wytworzenia. Możemy ją zmierzyć (obliczyć) za pomocą wzoru (Chajtman 1992):

$$Pc = \frac{Y}{X} \quad (1)$$

gdzie:

$Pc$  – produktywność całkowita,

$Y$  – efekty,

$X$  – nakłady.

Produktywność cząstkowa – to stosunek produkcji całkowitej (lub liczby produktów poszczególnych rodzajów) do liczby poszczególnych rodzajów zasobów zużytych do jej wytworzenia, liczy się ją ze wzoru (Chajtman 1992):

$$Pcz = \frac{Y}{Xcz} \quad (2)$$

gdzie:

$Pcz$  – produktywność cząstkowa,

$Y$  – efekt,

$Xcz$  – cząstkowe nakłady stanowiące jeden lub kilka elementów wektora wejścia.

## Zdolność produkcyjna

Zdolność produkcyjna wyraża możliwość wyprodukowania w określonym czasie (najczęściej rok) w danym przedsiębiorstwie (lub na stanowisku robotniczym) maksymalnej liczby wyrobów odpowiadających ustalonym normom jakościowym. Metoda obliczania zdolności produkcyjnej zależy od rodzaju branży, którą reprezentuje przedsiębiorstwo. Głównym celem obliczania zdolności produkcyjnej jest określenie możliwości wytwórczych przedsiębiorstwa oraz ujawnienie rezerw i przyczyn niepełnego wykorzystania zdolności produkcyjnej. Do ustalenia zdolności produkcyjnej przedsiębiorstwa obowiązkowe są zasadnicze wielkości (Miszułowicz 1967):

- liczba posiadanych urządzeń, maszyn lub wielkość powierzchni produkcyjnej;
- czas pracy maszyn i jego wykorzystanie;
- wydajność pracy maszyn i urządzeń technicznych oraz normy pracochłonności produkcji.

Czas pracy maszyn i urządzeń obliczany jest w trzech kategoriach (Miszułowicz 1967):

- czas nominalny – kalendarzowy pomniejszony o nieprzepracowane dni (ustawowo wolne od pracy);
- czas efektywny – różnica między nominalnym funduszem czasu pracy a czasem przerw na remonty i inne postoje planowane;
- czas kalendarzowy.

Możemy rozróżnić dwa rodzaje wydajności maszyn: teoretyczną (potencjalną) oraz techniczną (praktyczną). Dla wielu urządzeń wydajność teoretyczna jest nie do osiągnięcia przez jakość przerabianego surowca lub zdolności i kwalifikacje obsługującego je pracownika. Miernikiem wykorzystania teoretycznej

wydajności maszyn jest współczynnik wydajności maszyn, który możemy obliczyć ze wzoru (Durlik 2004):

$$W_{wm} = \frac{W_{techn.}}{W_{teor.}} \quad (3)$$

gdzie:

$W_{techn.}$  – wydajność techniczna maszyny,

$W_{teor.}$  – wydajność teoretyczna maszyny.

Wielkość zdolności produkcyjnej przedsiębiorstwa można policzyć ze wzoru:

$$Zd = M \times Wz \times Te \times Nw \times W_{wm} \quad (4)$$

gdzie:

$Zd$  – zdolność produkcyjna,

$M$  – liczba jednorodnych maszyn,

$Wz$  – współczynnik zmianowości,

$Te$  – efektywny fundusz czasu pracy w godzinach,

$Nw$  – praktyczna norma wydajności pracy maszyn na jednostkę czasu,

$W_{wm}$  – wydajność maszyny.

Zdolność produkcyjną obliczymy również, gdy znamy efektywny fundusz czasu pracy oraz normę pracochłonności. Można wtedy skorzystać ze wzoru (Durlik 2004):

$$Zd = \frac{Te}{Nc} \quad (5)$$

gdzie:  $Nc$  – pracochłonność jednostki wyrobu (norma pracochłonności).

Rezerwa zdolności produkcyjnej to niewykorzystana część zdolności produkcyjnej, czyli różnica między posiadaną zdolnością produkcyjną a tą, która jest aktualnie osiągnięta w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Możemy ją ustalić za pomocą wzoru (Durlik 2004):

$$R = Z_d - P \quad (6)$$

gdzie:

$R$  – rezerwa zdolności produkcyjnej,

$Z_d$  – wielkość obliczonej zdolności produkcyjnej,

$P$  – planowana lub wykonana wielkość produkcji.

Rozróżniamy dwa rodzaje grup rezerwy produkcyjnej (Miszułowicz 1967):

- rezerwa ekstensywna – polegająca na możliwości wydłużenia czasu pracy maszyn oraz zwiększenia obciążenia powierzchni produkcyjnej;
- rezerwa intensywna – związana z podwyższeniem wydajności pracy maszyn i urządzeń.

Stopień wykorzystania zdolności produkcyjnej możemy policzyć poprzez porównanie produkcji planowanej lub osiągniętej w danym okresie czasu z wielkością ustalonej zdolności produkcyjnej (Chajtman 1992):

$$WWZD = \frac{P}{Zd} \times 100 \quad (7)$$

gdzie *WWZD* – współczynnik wykorzystania zdolności produkcyjnej.

## Charakterystyka przedsiębiorstwa produkcyjnego

Wybrane przedsiębiorstwo to innowacyjna huta stali z prawie 120-letnim doświadczeniem, zlokalizowana w województwie świętokrzyskim. Przedsiębiorstwo jest liderem na rynku krajowym i odnosi duże sukcesy na rynku zagranicznym. Firma posiada rozbudowaną sieć dystrybucji, oferuje również konkurencyjne ceny i zapewnia wysoki poziom obsługi klienta. Produkuje wyroby gorącowałcowane długie na bazie wsadu pochodzącego z własnej stalowni elektrycznej. Do produkcji stali wykorzystuje złom stalowy. Przedsiębiorstwo stosuje innowacyjne technologie w obszarze produkcji, ochrony środowiska oraz bezpieczeństwa i higieny pracy. Jego wyroby hutnicze o wysokiej jakości wykorzystywane są w przemyśle budowlanym, rolniczym, energetycznym oraz maszynowym, a także przy produkcji innych wyrobów. Wybrana huta zajmuje wysoką pozycję w strukturze produkcyjnej i finansowej, z bardzo dużymi możliwościami rozwoju. Posiada certyfikat zgodności z normą ISO 9001 Systemy zarządzania jakością, co pomaga jej tworzyć środowisko pracy, w którym promowane jest ciągle doskonalenie się we wszystkich obszarach działalności.

## Zdolność produkcyjna wybranego przedsiębiorstwa

Zdolność produkcyjna w analizowanym przedsiębiorstwie została obliczona na podstawie danych dostarczonych przez przedsiębiorstwo. Zdolność produkcyjną stanowią zasoby systemu produkcyjnego, które decydują o tym, czy wytworzenie produktów, których potrzebuje klient, jest możliwe i w jakim czasie.

**Tabela 23.1. Wykaz posiadanych grup maszyn w przedsiębiorstwie wraz z liczbą tych samych maszyn w grupie**

Grupa maszyn	Liczba maszyn w grupie
M1	1
M2	2
M3	21
M4	1
M5	1

Źródło: Opracowanie własne

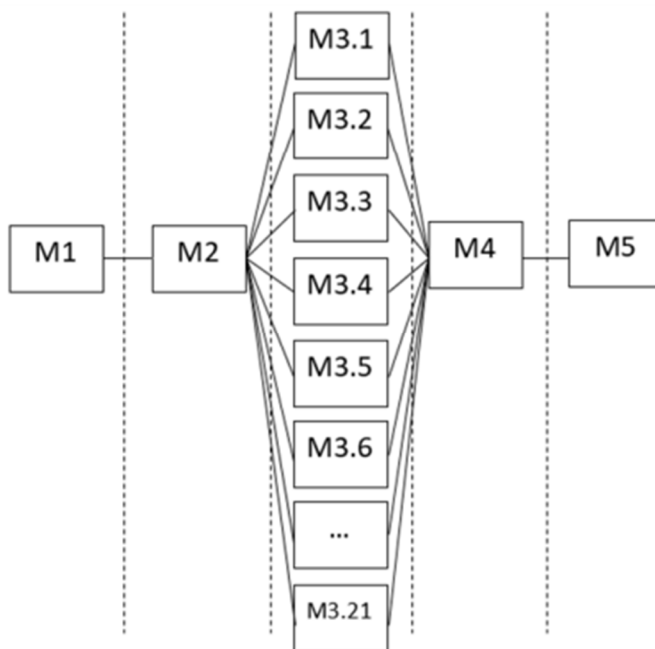


**Tabela 23.2. Parametryczny opis zasobów w danym horyzoncie planistycznym 30 dni roboczych**

Parametr	M1	M2	M3 (21 maszyn)				M4	M5
			M3.1	M3.2	...	M3.21		
Współczynnik korygujący ( $\eta$ )	0,91	0,93	1				0,95	0,98
Dysponowany fundusz czasu pracy ( $t_d$ )	3276	3348	3600				3420	3528
Zdolność produkcyjna ( $Z_p$ ) dla $\eta_d = 0,98$	3210	3281	3528				3352	3547

Źródło: Opracowanie własne

Współczynnik korygujący  $\eta$  uwzględnia korektę wynikającą z przewidywanych przestołów maszyn (remontów, awarii itp.).



**Rysunek 23.1.** Schemat marszrut technologicznej – skojarzenie operacji technologicznych z maszynami

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 23.3. Zlecenia produkcyjne**

Numer zlecenia	Wyrób	Liczba sztuk
1	I	150
2	II	150
3	III	150
4	IV	150

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 23.4. Wykaz operacji technologicznych dla poszczególnych zleceń uwzględniających wartości czasów jednostkowych w tj [min]**

		Zlecenia			
		1	2	3	4
Operacje	Op. 1	120	150	100	140
	Op. 2	0,5	1,5	0,67	0,91
	Op. 3	21	31,5	25,2	27,3
	Op. 4	0,08	0,15	0	0,17
	Op. 5	20	30	15	25

Źródło: Opracowanie własne

Struktura pracochłonności wykonywania zleceń na poszczególnych maszynach w [h] obliczana jest następująco:  $t_j$

$$\frac{\text{czas jednostkowy } t_j [\text{min}] \times \text{liczba sztuk}}{60} \quad (8)$$

**Tabela 23.5. Pracochłonność wykonywania zleceń na poszczególnych stanowiskach [h]**

		Zlecenia				SUMA
		1	2	3	4	
Maszyny	M1	300,00	375,00	250,00	350,00	1275,00
	M2	1,25	3,75	1,68	2,28	8,96
	M3	52,50	8,75	63,00	68,25	192,50
	M4	0,20	0,38	0,00	0,43	1,01
	M5	50,00	75,00	37,50	62,50	225,00

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 23.6. Wartości czasów przygotowawczo-zakończeniowych  $t_{pz}$  [h] dla poszczególnych maszyn związanych ze zleceniem**

		Zlecenia				SUMA
		1	2	3	4	
Maszyny	M1	0,08	0,03	0,16	0,08	0,345
	M2	0,42	0,08	0,67	0,25	1,420
	M3	0,83	0,33	0,00	0,16	1,320
	M4	0,16	0,50	0,25	0,00	0,910
	M5	0,67	0,25	0,83	0,08	1,830

Źródło: Opracowanie własne

Czas obciążenia stanowisk [h] (czas wykonania serii w zleceniu) oblicza się ze wzoru:

$$t_{serii} = t_{pz} + n \times t_j \quad (9)$$

gdzie:

$t_{pz}$  – czas przygotowawczo-zakończeniowy,

$n$  – liczba sztuk,

$t_j$  – czas jednostkowy.

**Tabela 23.7. Czas obciążenia stanowisk**

Grupa maszyn	$n \times t_j$	$t_{pz}$	$t_{serii}$
M1	1275	0,345	1275,345
M2	8,95	1,42	10,37
M3	262,5	1,32	263,82
M4	1	0,91	1,91
M5	225	1,83	226,83

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 23.8. Bilans zasobów – zestawienie**

Parametr	M1	M2	M3	M4	M5
Obciążenie stanowisk [h] ( $Z_e$ – zdolność efektywna)	1275,345	10,37	1,91	226,83	226,83
Zdolność produkcyjna [h] ( $Z_a$ – zdolność aktualna)	3 210	3281	3528	3352	3457

Źródło: Opracowanie własne

$$\text{stopień obciążenia stanowisk} = \frac{\text{obciążenie stanowisk (efektywne)}}{\text{zdolność produkcyjna aktualna}} \times 100\% \quad (10)$$

**Tabela 23.9. Stopień wykorzystania zdolności produkcyjnej**

M1	M2	M3	M4	M5
39,730%	0,316%	0,054%	6,767%	6,561%

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

Zdolność produkcyjna w przedstawionym przedsiębiorstwie jest na bardzo niskim poziomie. Przedsiębiorstwo powinno zainwestować w większą liczbę maszyn: M2, M3, M4 i M5, które zwiększyłyby zdolność produkcyjną, a tym samym pozwoliłyby na wzrost produkcji i poprawienie sytuacji finansowej firmy. Posiadane maszyny również nie są wystarczająco wykorzystywane, co powoduje niski stopień produktywności. Przedsiębiorstwo powinno dążyć do jak najwyższego poziomu zdolności produkcyjnej, zachowując wysoką jakość i sprawną realizację zamówień. Aby zachować wysoką pozycję wśród konkurentów i nie obniżać jakości produkcji, przedsiębiorstwo musi na bieżąco kontrolować i oceniać swoje wyniki. Zwiększając swoją zdolność produkcyjną, będzie mogło produkować więcej produktów, a dzięki temu realizować więcej zamówień od klientów.

## Literatura

1. Brajer-Marczak R. (2017), *Dobre praktyki w doskonaleniu procesów biznesowych*, „Studia Informatica Pomeriana”, 1, s. 15-25.
2. Chajtman S. (1992), *Produktywność, wydajność, efektywność – systematyka czynników*, „Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa”, 12.
3. Durlik I. (2004), *Produktywność w projektowaniu i eksploatacji systemu produkcyjnego*, „Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa”, 9, s. 8-10.
4. Grudzewski W. (1992), *Produktywność podstawowym kierunkiem doskonalenia polskiej gospodarki*, „Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa”, 11.
5. Grzelak M. (2017), *Analiza oraz metodyka modelowania systemu produkcyjnego w przedsiębiorstwie wytwórczym branży stolarskiej*, „Studia Ekonomiczne”, 337, s. 46-60.
6. Kosieradzka A. (2012), *Zarządzanie produktywnością w przedsiębiorstwie*, C.H. Beck, Warszawa.
7. Miszułowicz B. (1967), *Zdolność produkcyjna przedsiębiorstwa i zjednoczenia przemysłowego*, PWE, Warszawa.
8. Pająk E., Trojanowska J. (2012), *Planowanie i sterowanie produkcją wielosortymentową*, [w:] Knosala R. (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, s. 317-321, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole.

## Productivity of the Production Process in a Selected Enterprise

**Abstract:** The chapter presents the results of the capacity analysis of a manufacturing company. Productivity analysis and capacity analysis were performed. The first part of the chapter contains the characteristics of productivity and a brief description of the analyzed enterprise. In the research part, the production capacity was calculated.

**Keywords:** production, productivity, production capacity

## Rozdział 24

# Innowacyjna makieta logistyczna – magazyn z Lego

Anna Kapińska, Wiktoria Wojda, Bartosz Dawid Kramek

Wojskowa Akademia Techniczna  
Wydział Bezpieczeństwa, Logistyki i Zarządzania

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono znaczenie strefy kompletacji w procesie magazynowym oraz dokonano prezentacji dwóch autorskich strategii. Autorzy opracowali strategię symulacyjną oraz zbudowali model magazynu z wykorzystaniem klocków Lego Mindstorms, gdzie zostały odwzorowane wszystkie procesy magazynowe. Do wizualizacji przestrzennej wykorzystano oprogramowanie komputerowe FlexSim. Za pomocą programu stworzono magazyn oraz dokonano symulacji z wykorzystaniem zdefiniowanych parametrów umożliwiających dokonanie wyboru strategii kompletacji.

**Słowa kluczowe:** FlexSim, kompletacja, Lego, proces magazynowy, symulacja

## Wprowadzenie

Zauważalny w ostatnich latach trend, w którym rynek magazynowy stale się powiększa, stanowi dla przedsiębiorców impuls do rozważań, czy warto inwestować w nowoczesne magazyny. Zmiana trendów sektora e-commerce powoduje, że branża magazynowa ulega rozwojowi, modernizacji oraz unowocześnieniu, aby w jak największym stopniu sprostać oczekiwaniom użytkowników i ułatwić im pracę. W głównej mierze zmiany zauważalne są podczas dystrybucji towarów, produkcji oraz w zarządzaniu zaopatrzeniem. Z roku na rok do użytku oddaje się coraz więcej i coraz większych i bardziej zautomatyzowanych powierzchni magazynowych. Co zrobić, aby magazyn w jak najlepszym stopniu spełniał oczekiwania osób z niego korzystających?

Obecnie, aby magazyn został uznany za nowoczesny, powinien być wyposażony w najnowszą technologię, która wspiera procesy związane z kompletacją zamówień, zarządzaniem zapasami oraz transportem wewnątrzmagazynowym. Zatem czy każdy magazyn powinien być nowoczesny, aby był wydajny i funkcjonował sprawnie? Może wystarczy usprawnić niektóre procesy, aby funkcjonowanie magazynu było opłacalne, a wprowadzanie zmian nie generowało bardzo

dużych kosztów, na które małe i średnie magazyny nie zawsze mogą sobie pozwolić. Żeby podjąć właściwą decyzję dotyczącą modernizacji celem zwiększenia efektywności magazynu, należy ją poprzedzić analizą oraz opracowaniem modeli. Najczęściej stosowanym w dzisiejszych czasach narzędziem do modelowania jest przeznaczony do tego program informatyczny. Rozwiązanie takie pozwala znacznie zaoszczędzić czas oraz pieniądze. Kolejnym krokiem, jaki warto zrobić przed podjęciem decyzji o wprowadzeniu zmian, jest przeniesienie modeli symulacyjnych na rzeczywistą makietę logistyczną, w odpowiedniej skali. Do tego celu można zastosować dostępne na rynku klocki Lego Mindstorms.

## Procesy magazynowe

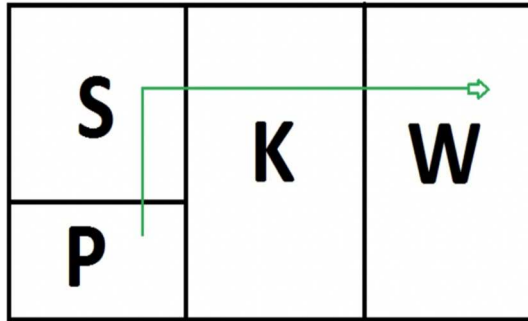
W ramach projektu pt. „Innowacyjna makieta logistyczna do wizualizacji i optymalizacji procesu magazynowego”, realizowanego przez Członków Koła Naukowego Logistyki Stosowanej Wojskowej Akademii Technicznej Wydziału Bezpieczeństwa, Logistyki i Zarządzania, wykonano modele symulacyjne w programie FlexSim oraz stworzono model magazynu, stosując do tego klocki Lego Mindstorms. Na potrzeby badań przyjęto, że optymalizacji zostanie poddana strefa kompletacji.

Kompletacja stanowi jedną z czterech głównych faz procesu magazynowania (przyjęcie, magazynowanie, kompletacja i wydanie). Kompletację można potraktować jako operację w procesie magazynowym polegającą na pobraniu zapasów ze stosów lub urządzeń do składowania w celu utworzenia zbioru zapasów zgodnie ze specyfikacją asortymentową i ilościową dla określonego odbiorcy. Proces kompletacji jest bardzo złożony i wymaga dobrej organizacji pracy w magazynie. Należy pamiętać, że efektywność, z jaką kompletacja jest wykonywana, bezpośrednio rzutuje na poziom obsługi klienta. Istotne jest, aby zamówiony towar był prawidłowo przygotowany pod względem asortymentowym oraz ilościowym oraz żeby do strefy wydań trafił w odpowiednim czasie. Od tego etapu często zależy zadowolenie ostatecznego odbiorcy. Proces kompletacji często jest uważany za kluczowy, gdyż jego koszty mogą stanowić nawet do 65% wszystkich kosztów eksploatacyjnych w magazynie. Do podstawowych zadań kompletacji zalicza się (Yoon, Sharp 1995; Yoon, Sharp 1996; van den Berg i in. 1996; Korzeń 1999; Lewczuk 2012; Dallari i in. 2008):

- przygotowanie jednostek ładunkowych do kompletacji,
- kompletowanie zamówień,
- kontrolę ilościową,
- pakowanie i formowanie jednostek transportowych,
- przemieszczanie do strefy wydań.

Zazwyczaj kompletacja w magazynie odbywa się z zastosowaniem dwóch podstawowych strategii: towar do człowieka, człowiek do towaru. Dla badanego przykładu przyjęto zastosowanie wózków transportowych, zatem towar zbierany z regałów będzie transportowany do pola odkładczego (miejsce, gdzie w badanym

przypadku towar będzie oczekiwał na kontrolę pod kątem kompletności zamówienia i wydanie do strefy wydań), oraz magazyn niskiego składowania o układzie kątowym (rys. 24.1) (Kijek i in. 2018).



**Rysunek 24.8.** Kątowy układ magazynu

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Głodowska, Świdorski 2019)

Układ kątowy posiada strefę przyjęć i strefę wydań w bliskim sąsiedztwie. Najczęściej jest on stosowany przy różnych, rozdzielnych formach dostawy i odbioru materiałów (konieczność rozdzielenia strumieni towaru przyjmowanego i wydawanego), do magazynów o zróżnicowanym obrocie asortymentowym, a także w miejscu, gdzie niemożliwe jest zastosowanie układu przelotowego (Dudziński, Kizyn 1978; Jacyna, Kłodawski 2009). Dla prowadzonych badań symulacyjnych przyjęto, że model magazynu będzie zawsze taki sam. Jego parametry niezależnie od zmiany wariantu kompletacji będą niezmiennie, zmieniać się będzie sposób wyznaczania trasy dla wózków transportowych. W wyniku wielu rozważań autorzy projektu zaproponowali cztery autorskie strategie kompletacji, z których dwie wybrano do badań. Są to strategie: „najkrótszy dystans” i „kto pierwszy”.

W strategii „najkrótszy dystans” środki transportu wewnętrznego otrzymują takie trasy do pokonania, które będą najkrótsze dla realizacji danego zlecenia kompletacyjnego. Przypisane środki transportu wewnętrznego dla zlecenia kompletacyjnego wykonują swoją pracę w takiej kolejności, aby drogi, jakie muszą pokonać w celu pobrania pozycji asortymentu, były dla nich maksymalnie krótkie.

Strategia „kto pierwszy” polega na wyszukaniu dla danego środka transportu wewnętrznego informacji, gdzie znajduje się pierwsza wolna paczka ze zlecenia kompletacyjnego, które wykonuje. Po odnalezieniu takiej pozycji środek transportu wewnętrznego zostaje natychmiast wysłany w celu pobrania odpowiedniej pozycji asortymentu. Każdy środek transportu wewnętrznego wykonuje wszystkie zlecenia kompletacyjne znajdujące się w danej chwili w magazynie i wydane do realizacji. W tej strategii takie parametry jak najkrótsza droga nie są brane pod uwagę.

## Symulacja komputerowa i budowanie makiety logistycznej

Do opracowania strategii symulacyjnych wykorzystujących wizualizację przestrzenną 3D zastosowano program komputerowy FlexSim. Główną funkcją aplikacji jest umożliwienie kształtowania, projektowania i organizowania procesów kompletacji dla różnych wariantów. W celu umożliwienia symulowania niezbędne jest stworzenie interfejsu w postaci Panelu Konfiguracyjnego wyposażonego w moduły wczytywania danych (rys. 24.2).



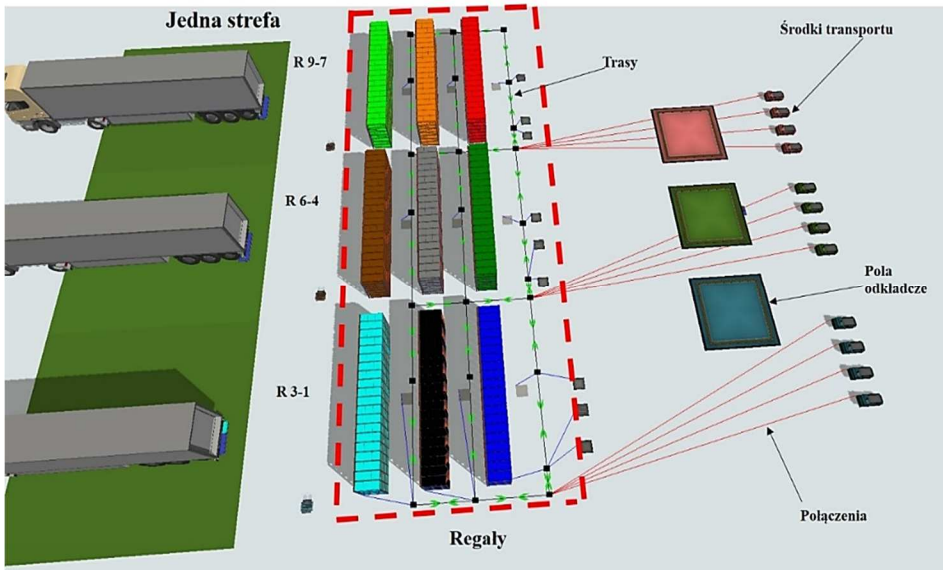
**Rysunek 24.9.** Panel Konfiguracyjny FlexSim

Źródło: Opracowanie własne

Zamodelowano schemat magazynu, wyznaczając na nim strefę składowania, z której będą zbierane towary zgodnie z wcześniej wpisaną do programu listą kompletacyjną. W modelu wskazano pola odkładcze, środki transportu wewnętrznego oraz trasy, po jakich będą się one poruszały. Wszystkie te elementy oznaczono na rys. 24.3. Zdefiniowano również wiele innych parametrów, takich jak: liczba asortymentu na regałach, prędkość poruszania się środków transportu



wewnętrznego, czas, jaki jest potrzebny na podjęcie asortymentu (jednolity dla każdej symulacji) oraz wiele innych, niezbędnych do rozpoczęcia symulacji w programie.



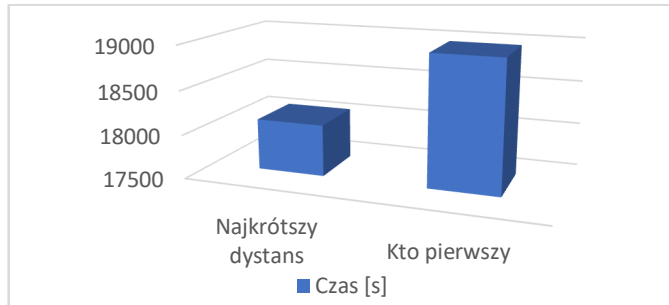
**Rysunek 24.10.** Schemat modelowanego magazynu

Źródło: Opracowanie własne

W wyniku prowadzonych badań autorzy zmagali się z wieloma problemami dotyczącymi projektowania magazynu. Zdobyta wiedza podczas konieczności podejmowania decyzji okazała się cenna, podobnie jak praca w grupie. Na czas przygotowywania danych do symulacji autorzy wcielili się w role konstruktorów i projektantów magazynu, ich decyzje miały mieć bezpośredni wpływ na sposób funkcjonowania magazynu. Praca z programem pozwoliła na zrozumienie funkcjonowania procesów magazynowych w sposób praktyczny oraz pozwoliła na uświadomienie, jak złożoną jednostką jest magazyn. Jednocześnie dużo elementów trzeba dobrze dobrać, aby nie tylko magazyn mógł funkcjonować poprawnie, ale również efektywnie i po jak najniższych kosztach. Każde działanie i każda decyzja ma tu znaczenie. W efekcie symulacji okazało się, że lepsza pod kątem czasu pracy była strategia „najkrótszy dystans”, co ukazano na *rys. 24.4*.

Symulacje były prowadzone wielokrotnie, natomiast w niniejszym rozdziale zostały zaprezentowane wybrane wyniki. Dla wskazanych założeń strategia „najkrótszego dystansu” otrzymała wynik 18 087 sekund, zaś „kto pierwszy” uzyskała wynik 18 976 sekund. Żeby dokładnie prześledzić proces budowy magazynu, odzwierciedlić wszystkie podejmowane przez autorów decyzje niezbędne do symulacji komputerowej, postanowiono zbudować makietę logistyczną, wykorzystując do tego klocki Lego Mindstroms. W pracowni laboratoryjnej Wydziału

Bezpieczeństwa, Logistyki i Zarządzania przez miesiące, krok po kroku, przy udziale studentów Koła Naukowego Logistyki Stosowanej, budowano i przebudowywano makiety logistyczne prezentując magazyn (rys. 24.5 i rys. 24.6).



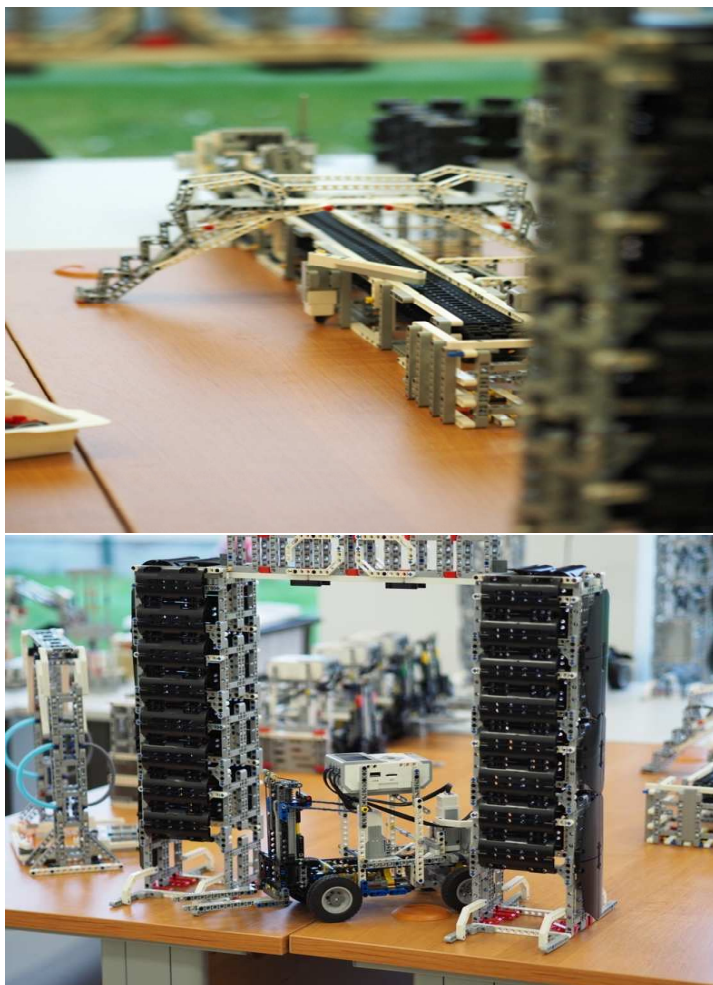
**Rysunek 24.11.** Wyniki symulacji komputerowej

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 24.12.** Budowa makiety cz. 1

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 24.13.** Budowa makiety cz. 2

Źródło: Opracowanie własne

Budowa makiety za pomocą klocków Lego okazała się nie lada wyzwaniem. Odzworowanie wszystkich procesów magazynowych, układu magazynu, zachowanie odpowiednich odległości, aby środki transportu mogły się poruszać, a następnie zaprogramowanie tego we właściwy sposób było zadaniem trudnym. W trakcie realizacji powstawało wiele wątpliwości, należało podejmować decyzje w wielu przypadkach trudne i wpływające na powodzenie projektu. Autorzy projektu poprzez możliwość budowania makiety logistycznej zdobyli bardzo praktyczną wiedzę z zakresu magazynowania. Budowa makiety, zakończona w 2022 roku, służy jako bardzo dobre narzędzie dydaktyczne dla wszystkich studentów Wydziału Bezpieczeństwa, Logistyki i Zarządzania na kierunku logistyka praktyczna.

## Podsumowanie

W dobie zwiększających się możliwości edukacji studentów rosną również ich oczekiwania co do sposobu uczenia. Autorzy projektu sami przyznają, że uczenie w sposób praktyczny jest idealnym pomysłem. Branża logistyczna obecnie bardzo szybko się rozwija, a zatem rynek będzie potrzebował nowych pracowników. Czas studiów to czas nauki w dużej mierze teoretycznej, ale obecnie również i praktycznej. Możliwość realizacji takich inicjatyw, jak projekt innowacyjnej makiety logistycznej służącej do optymalizacji procesów magazynowych daje możliwość poznania i nauczenia się w sposób praktyczny działu logistyki, jakim jest magazynowanie. Tak jak wspomiano we wstępie, magazyny są w dobie rozwoju i coraz częściej znacznej automatyzacji swoich procesów. Ważne jest, aby wszelkie zmiany były poprzedzone wnikliwą analizą, budową modeli i symulowaniem propozycji usprawnień, np. za pomocą programu komputerowego. Zastosowanie innowacyjnych metod kształcenia, takich jak klocki Lego Mindstorms, pozwalają na szersze i bardziej wnikliwe poznanie wielu procesów. Obecnie makieta wykorzystywana jest w procesie dydaktycznym dla studentów kierunku logistyka i cieszy się bardzo dużym zainteresowaniem. W trakcie realizacji projektu autorzy podjęli decyzję o skupieniu swojej uwagi w głównej mierze na procesie kompletacji jako jednego z czterech najważniejszych procesów. Natomiast uniwersalność zastosowania klocków Lego daje możliwość tworzenia z nich również innych modeli.

Przebudowywana, usprawniana oraz modernizowana stanowi bardzo dobre narzędzie edukacyjne z przedmiotów magazynowych. Jako studenci cieszymy się, że mogliśmy wziąć udział w tym projekcie, ponieważ poszerzył on nasze horyzonty i dał możliwość podejmowania ważnych decyzji już na etapie kształcenia, przygotowując w ten sposób do pracy zawodowej.

## Literatura

1. Dallari M., Marchet G., Melacini M. (2008), *Design of Order Picking System*, Springer Verlag, London.
2. Dudziński Z., Kizyn M. (1978), *Technologiczne procesy magazynowe*, PWE, Warszawa.
3. Głodowska K., Świdorski A. (2019), *Istotność doboru technologii transportowej w zastosowaniu do optymalizacji procesu transportu wewnętrznego w strefie kompletacji*, „Gospodarka Materiałowa i Logistyka”, 5, s. 8-14.
4. Jacyna M., Kłodawski M. (2009), *Pracochłonność procesu komisjonowania dla wariantowego rozmieszczenia asortymentu w strefie kompletacji*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport”, 70, s. 73-84.
5. Kijek M., Zelkowski J., Teklińska D., Zaborowicz-Malcherczyk O. (2018), *Modelowanie funkcjonowania gospodarki magazynowej w przedsiębiorstwie X*, „Gospodarka Materiałowa i Logistyka”, 5, s. 306-316.
6. Korzeń Z. (1999), *Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania. Tom II. Projektowanie, modelowanie, zarządzanie*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań.

7. Lewczuk K. (2012), *Zasady organizacji przepływów materiałowych w obszarach funkcjonalnych magazynów*, „Logistyka” 2, s. 865-877.
8. van den Berg J.P., Sharp G.P., Gademán A.J.R.M.N., Pochet Y. (1996), *Forward-Reserve Allocation in Warehouse with Unit-Load Replenishments*, „European Journal of Operational Research” 111, 1, s. 98-113.
9. Yoon C.S., Sharp G.P. (1996), *A Structured Procedure for Analysis and Design of Order Pick Systems*, „IIE Transactions”, 28, 5, s. 379-389.
10. Yoon C.S., Sharp G.P. (1995), *Example Application of the Cognitive Design Procedure for an Order Pick System: Case Study*, „European Journal of Operational Research”, 87, 2, s. 223-246.

### Innovative Logistics Mock-Up – a Lego Warehouse

**Abstract:** This chapter presents the importance of the picking zone in the warehouse process and presents two original strategies. The authors developed a simulation strategy and built a warehouse model using Lego Mindstorms, where all warehouse processes were mapped. FlexSim computer software was used for spatial visualisation. The programme was used to create the warehouse and simulate it, using predefined parameters to select a picking strategy.

**Keywords:** FlexSim, Lego, picking, simulation, warehousing process

## Rozdział 25

# Identyfikacja systemu logistycznego w firmie kurierskiej

Dominika Strycharska, Rafał Wyczółkowski, Przemysław Dylkowski

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** Celem rozdziału jest identyfikacja działalności wybranej firmy kurierskiej dla zobrazowania zakresu działań oraz dostosowania się do standardów panujących obecnie na rynku. Za pomocą schematów blokowych opisano system logistyczny poranny oraz popołudnio-wieczorny przesyłek ekspresowych oraz drobnicowych. Zakres opisanego systemu logistycznego skupia się na czterech punktach, jakimi są: transport, proces załadunku i rozładunku, segregacja przesyłek oraz analiza skanowania, doręczania i nadania przesyłek.

**Słowa kluczowe:** jakość, logistyka, transport, usługi kurierskie

## Wprowadzenie

Istota usługi kurierskiej pozostaje niezmienna, to: „odebranie przesyłki od nadawcy przez kuriera i dostarczenie jej bezpośrednio do odbiorcy”. Doręczenie przesyłki jest kompleksową usługą realizowaną zgodnie z zasadami logistyki, której priorytetem jest satysfakcja klienta (Łukasik i in. 2017, s. 158). W Polsce rynek usług KEP (przesyłki kurierskie, ekspresowe i paczkowe) został zapoczątkowany w latach 90. XX wieku i rozwija się w szybkim tempie do dnia dzisiejszego (Marczuk i in. 2015, s. 3075). Jest to możliwe również dzięki dynamicznemu rozwojowi systemów i technologii informatycznych (Kuśmińska-Fijałkowska, Łukasik 2011, s. 395). Firmy kurierskie konkurują ze sobą o potencjalnych klientów, co ma duży wpływ na ich rozwój: poprawiają jakość świadczonych usług, poszerzają swoją ofertę czy też wprowadzają nowoczesne technologie w procesach realizacji zamówień (Marczuk i in. 2015, s. 3075).

Dla przedsiębiorstw kurierskich, które liczą się z opinią konsumentów, dużym wyzwaniem jest tzw. „ostatnia mila”, czyli doręczanie przesyłek do klientów końcowych. Firmy te dostosowują swoje usługi, inwestując w najnowsze technologie oraz zwracając szczególną uwagę na jakość świadczonych usług. Współczesny rynek kurierski zarówno krajowy, jak i międzynarodowy oferuje klientom rozwiązania na miarę ich potrzeb i oczekiwań (Fajczak-Kowalska, Kowalska 2017, s. 42).



## Identyfikacja systemu logistycznego przedsiębiorstwa

System logistyczny badanego przedsiębiorstwa kurierskiego polega na zintegrowanym procesie transportu od nadawcy do odbiorcy. Istnienie tego systemu skupia się przede wszystkim na spójnej i efektywnej kooperacji głównych oddziałów, które są odpowiednio zlokalizowane: w Zabrzu, Tychach, Warszawie i Poznaniu. System logistyczny przedsiębiorstwa opiera się na prawidłowym działaniu modelu „hub and spoke”, w którym główny magazyn/sortownia (hub) i mniejsze magazyny/oddziały (spoke) mają zorganizowany ruch transportowy w taki sposób, aby jak najlepiej i najszybciej transportować przesyłki. Największymi zaletami tego systemu są:

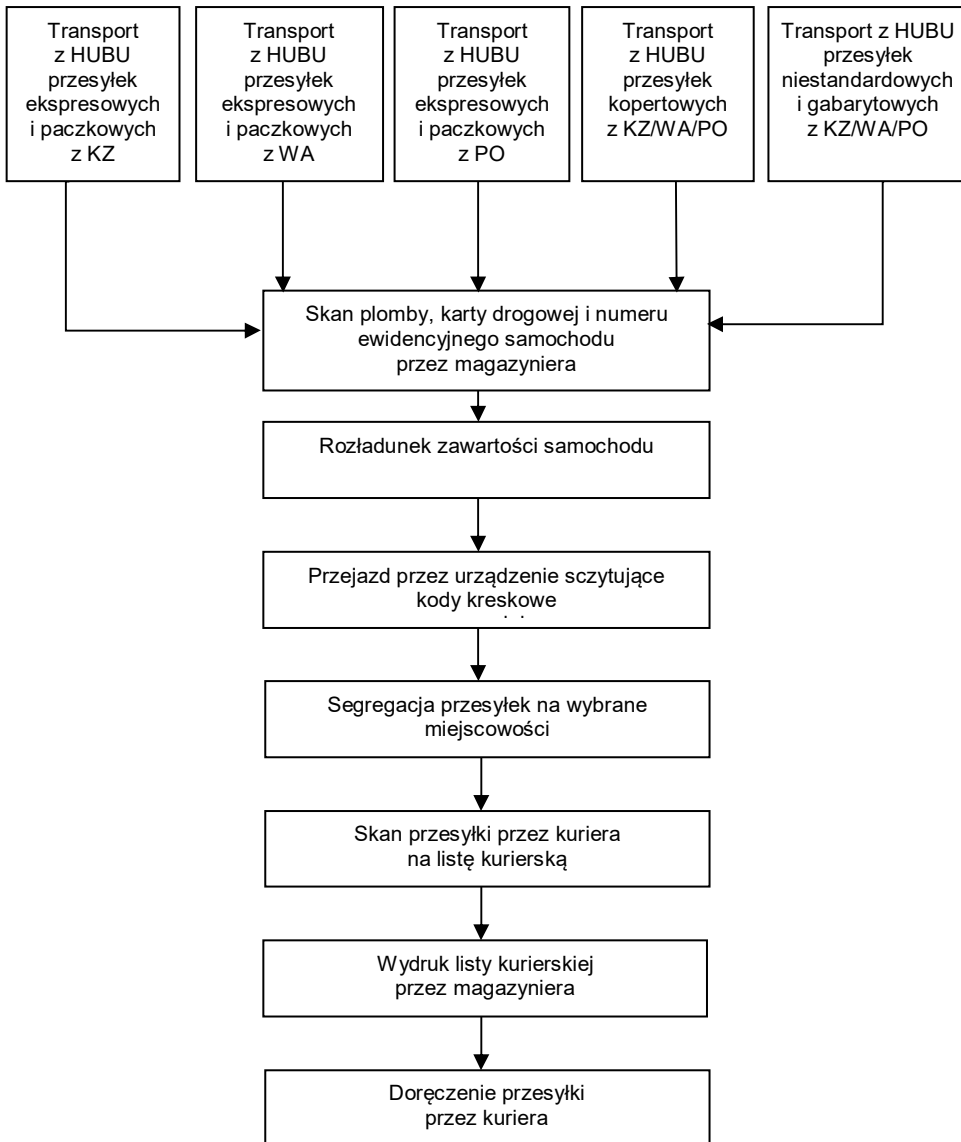
- krótszy czas transportu,
- mniejsze zużycie paliwa,
- obniżenie kosztów transportu,
- zmniejszenie liczby samochodów na drogach,
- zmniejszenie eksploatacji samochodów.

Głównymi hubami w wybranej firmie kurierskiej są magazyny/sortownie położone w: Zabrzu [KZ], Tychach [KD], Warszawie [WA-ekspresowe, WD-drobnicowe] i Poznaniu [PO-ekspresowe, PD-drobnicowe]. Magazyny/oddziały zwane „spoke”, które działają jako stacje rozładunkowo-załadunkowe oraz zajmują się doręczeniami przesyłek, mieszczą się w 34 miastach na terenie Polski, tj. w: Białymstoku [BK], Bielsko-Białej [BB], Bydgoszczy [BY], Ciechanowie [CI], Częstochowie [CZ], Ełku [EL], Gdańsku [GD], Gdańsku [GD2], Gorzowie Wielkopolskim [GW], Jeleniej Górze [JG], Kielcach [KI], Koninie [KN], Koszalinie [KO], Krakowie [KR], Legnicy [LG], Lublinie [LU], Łomży [LO], Łodzi [LD], Nowym Sączu [NS], Olsztynie [OL], Opolu [OP], Pile [PI], Piotrkowie Trybunalskim [PT], Radomiu [RA], Rzeszowie [RZ], Siedlcach [SE], Słupsku [SL], Szczecinie [SZ], Tarnobrzegu [TG], Tarnowie [TA], Wałbrzychu [WB], Warszawie [WA2], Warszawie [WA3], Włocławku [WL], Wrocławiu [WR] i Zielonej Górze [ZG].

System logistyczny poranny ekspresowy (*rys. 25.1*) i drobnicowy (*rys. 25.2*) rozpoczyna się od przyjazdu transportów liniowych z hubów dla przesyłek ekspresowych z Zabrza, Warszawy oraz Poznania, a dla przesyłek drobnicowych z Tych, Warszawy i Poznania. Magazynier skanuje wyspecjalizowanym skanerem plombę, kartę drogową i numer ewidencyjny samochodu liniowego.

Przesyłki ekspresowe są rozładowywane przez pracowników magazynowych, sortowników i kurierów. Następnie przejeżdżają przez urządzenie skanujące kody kreskowe, dzięki czemu wprowadzane są już do systemu, który poprzez skan wysyła do odbiorcy informację dotyczącą pojawienia się paczki w magazynie. Po przejeździe przez urządzenie następuje również segregacja na miejscowości, do których muszą one zostać doręczone, oraz skanowanie przesyłek przez kurierów na listę kurierską. Pojawienie się przesyłki na tej liście jest równoznaczne z wysłaniem wiadomości do odbiorcy o planowanym doręczeniu przesyłki.

Na kolejnym etapie magazynierzy drukują listę kurierską dla kurierów, a ci wyjeżdżają z magazynu i zaczynają proces doręczania przesyłek w wybranych miejscowościach.



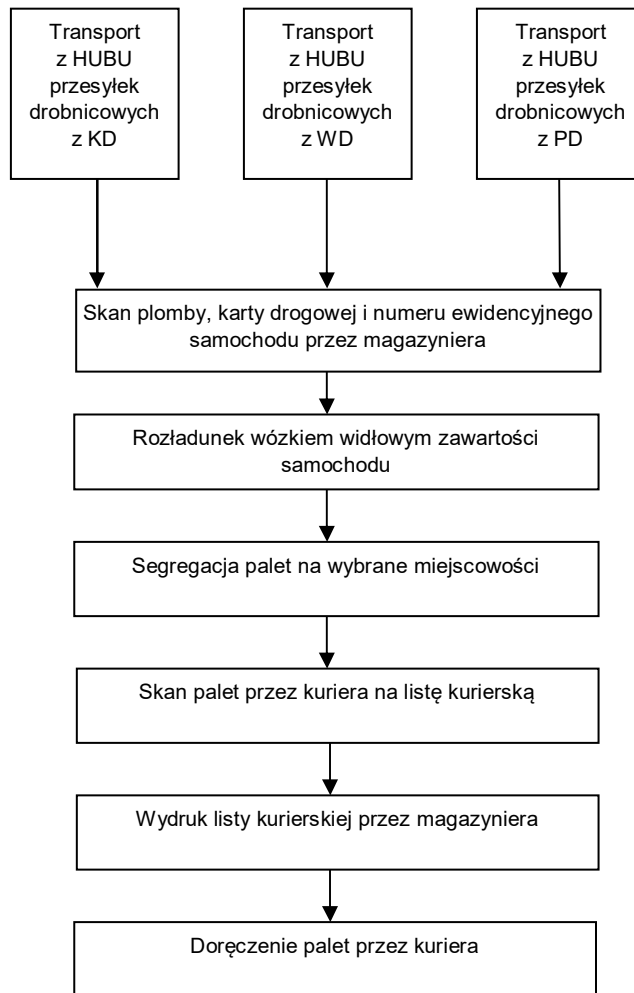
**Rysunek 25.1.** System logistyczny poranny przesyłek ekspresowych

Źródło: Opracowanie własne

Dla systemu logistycznego porannego drobnicowego przesyłki paletowe są wyciągane wózkiem widłowym z transportów liniowych do magazynu. Operator wózka widłowego rozpoczyna segregację palet na wybrane miejscowości. Po tym



procesie kurierzy zaczynają skanować przesyłki drobnicowe na listę kurierską. Kurier otrzymuje wydruk tej listy, a odbiorca otrzymuje informację o potencjalnym doręczeniu przesyłki paletowej. Następnie kurierzy wyjeżdżają z magazynu i rozpoczynają proces doręczania przesyłek.

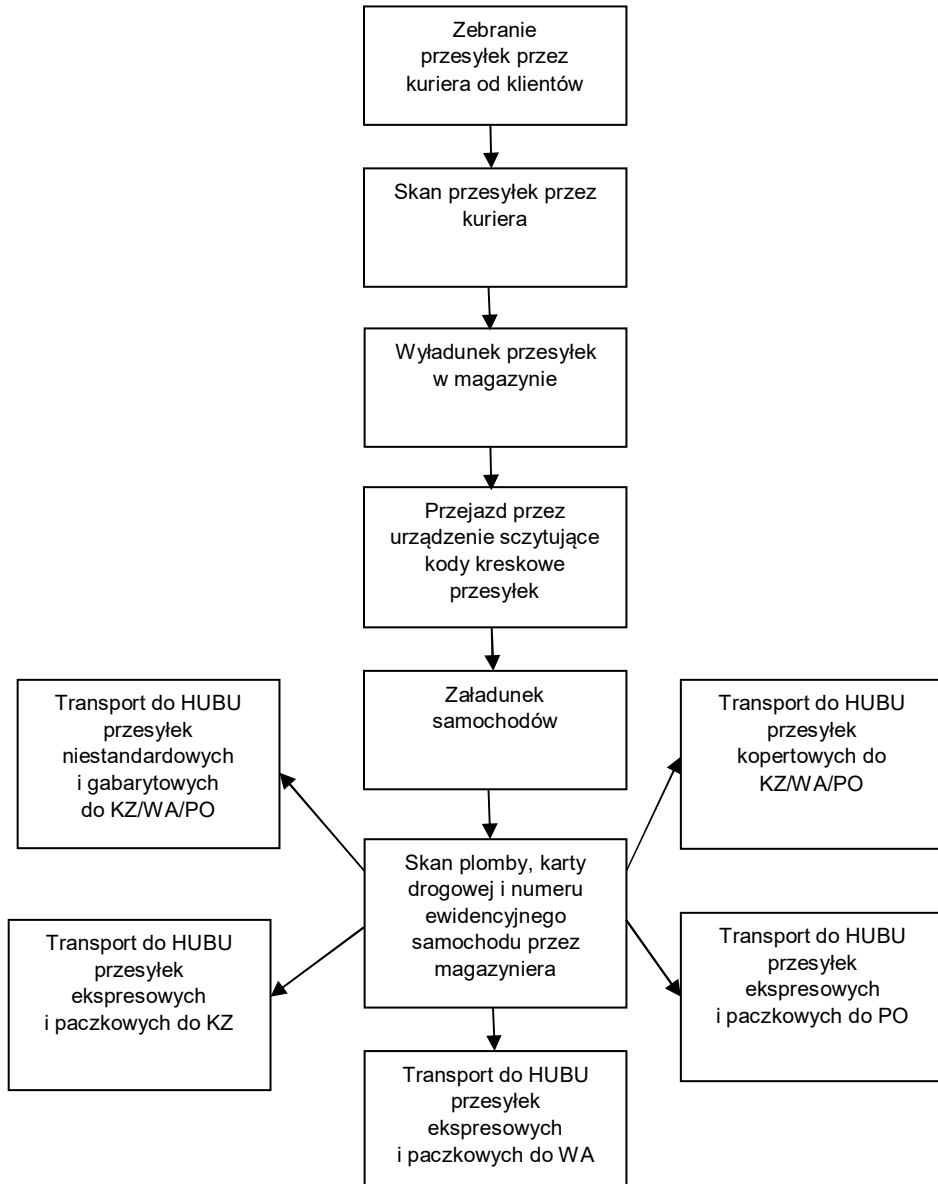


**Rysunek 25.2.** System logistyczny poranny przesyłek drobnicowych

Źródło: Opracowanie własne

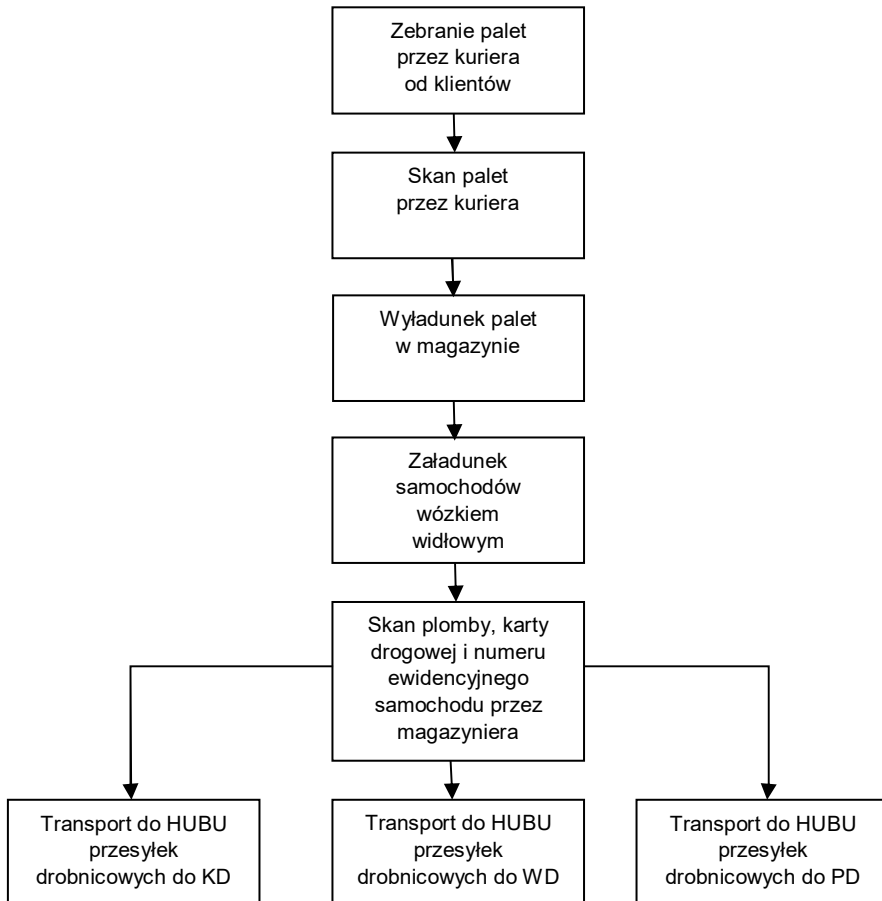
System logistyczny popołudniowo-wieczornych przesyłek ekspresowych (rys. 25.3) i drobnicowych (rys. 25.4) rozpoczyna się od zebrania nadeń przesyłek przez kurierów. Kurierzy skanują je, przywożą i wyładowują w magazynie. W przypadku przesyłek ekspresowych paczka zostaje zeskanowana przez urządzenie szczytujące kody kreskowe i dzięki temu klient dostaje informację

o pojawieniu się przesyłki w magazynie. Następnie przesyłki zostają załadowane do transportów liniowych, które zostają zaplombowane, a magazynier skanuje plombę, numer karty drogowej i numer ewidencyjny samochodu. Po tym procesie transporty liniowe wyruszają do Zabrza, Warszawy i Poznania.



**Rysunek 25.3.** System logistyczny popołudniowo-wieczorny przesyłek ekspresowych

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 25.4.** System logistyczny popołudniowo-wieczorny przesyłek drobnicowych

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku przesyłek paletowych kurier rozładowuje swoje przesyłki w magazynie, a operator wózka widłowego rozpoczyna proces załadunku do transportów liniowych do Tych, Warszawy i Poznania. Po procesie załadunku następuje zaplombowanie transportów liniowych. Magazynier także skanuje plombę, kartę drogową oraz numer ewidencyjny samochodu. Kierowcy tych samochodów wyruszają w drogę z magazynu do wybranych hubów.

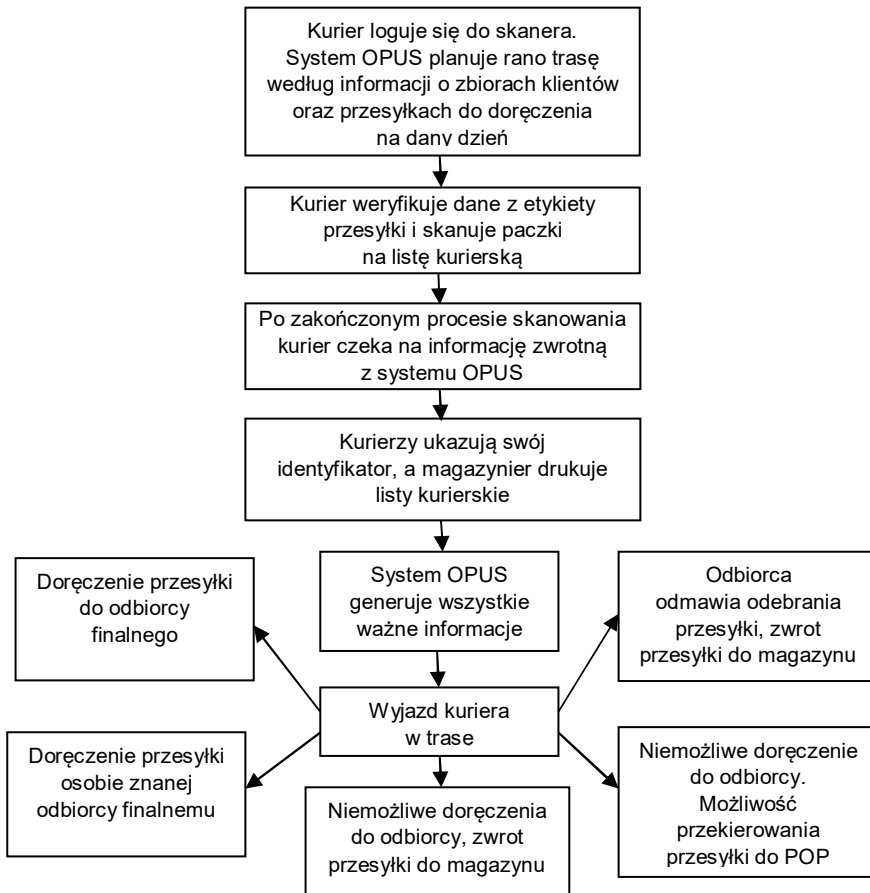
Pierwszą analizowaną częścią systemu logistycznego jest transport. Transporty z hubu do terminalu kurierskiego odbywają się codziennie w ściśle ustalonych godzinach. Wszystkie informacje dotyczące przyjazdów, odjazdów, roboczogodzin kierowców, tras oraz inne informacje niezbędne podczas procesu transportu można znaleźć w programie zarządzania krajową flotą transportu liniowego DLIT (*Domestic Linehaul Integrated Tool*).

Kolejnym analizowanym elementem systemu logistycznego jest załadunek i rozładunek. W procesie tym biorą udział sortownicy, magazynierzy oraz kurierzy. Pracownicy magazynowi oraz sortownicy podczas porannego ekspresowego rozładunku wyładują przesyłki ekspresowe, paczkowe, kopertowe oraz przesyłki niestandardowe na specjalne przenośniki, które są skierowane w kierunku urządzenia szczytującego kody kreskowe przesyłek. Następnie przesyłki przemieszczają się po taśmie, skąd zbierają je kurierzy. Podczas rozładunku bądź załadunku samochodów pracownicy magazynowi pracują w parach. Przesyłki niestandardowe oraz gabarytowe są przewożone pod skaner za pomocą wewnętrznych rollkontenerów. Służą one do bezpiecznego przewożenia przesyłek i zabezpieczają je przed uszkodzeniem. Przesyłki kopertowe podczas porannego procesu rozładunku przyjeżdżają w workach, następnie są rozładowywane na podnośniki, natomiast w procesie załadunku są segregowane na poszczególne huby [KZ/WA/PO] i ładowane do worków, które przyjechały podczas porannego rozładunku.

W procesie rozładunku i załadunku przesyłek drobnicowych osobą odpowiedzialną jest pracownik magazynowy z aktualnym zaświadczeniem kwalifikacyjnym wydanym przez Urząd Dozoru Technicznego. W procesie tym posługuje się on naczepami uniwersalnymi, czyli takimi, które pozwalają na załadunek oraz rozładunek tyłem, bokiem lub górą. Takimi rodzajami naczep przewozi się towar luzem, na paletach lub w big bagach (pojemniki). Przesyłki skanuje się manualnie skanerem, który w momencie skanu przesyła informacje do programu komputerowego. Wszystkie procesy rozładunku i załadunku kontroluje się za pomocą programu TLC (*Transport Logistick Check*). Program ten działa tylko wtedy, gdy przesyłki są przeskanowane przez skaner bądź ręcznie przez pracownika magazynowego.

Kolejnym analizowanym elementem systemu logistycznego jest segregacja przesyłek. Segregowane są one na tak zwane „trasy”. Liczba kurierów przypisana do danych tras jest uzależniona od rozległości terenu oraz liczebności mieszkańców. Średnia liczba kurierów, która przypada na trasę, to 11 osób.

Ostatnim elementem systemu logistycznego jest analiza skanowania i doręczenia oraz nadań przesyłek przez kuriera (rys. 25.5). Każdy kurier pracujący w firmie kurierskiej jest wyposażony w skaner, który ma wgrany wewnątrz system operacyjny firmy kurierskiej. System ten cechuje wysoka automatyzacja. Jest przejrzysty dla poruszającego się po nim. Wyznacza plan trasy, godzinę doręczenia oraz wszystkie niezbędne informacje w celu skontaktowania się z klientem. Ponadto wylicza stan faktyczny przesyłek znajdujących się w samochodzie kuriera oraz informuje, jeśli klient złożył dyspozycje dotyczące czasu i miejsca doręczenia. Posiada wbudowaną funkcję GPS, która bezproblemowo pomaga w znalezieniu odbiorcy przesyłki. System ten na bieżąco filtruje informacje na temat doręczeń oraz zleceń nadań przesyłek przez klientów, dzięki czemu kurier jest w stanie na bieżąco planować swój czas.



**Rysunek 25.5.** Proces przygotowania oraz doręczenia przesyłki przez kuriera

Źródło: Opracowanie własne

Proces skanowania przesyłek przez kuriera na listę kurierską rozpoczyna się od zalogowania do systemu. System aktualizuje przesyłki znajdujące się w magazynie oraz zlecenia nadań od klientów. Osoba odpowiedzialna za doręczenie przesyłek weryfikuje etykiety znajdujące się na przesyłkach. Następnie odbywa się ich skanowanie przez kuriera oraz odbiór listy kurierskiej, którą otrzymuje od magazyniera po okazaniu identyfikatora. System aktualizuje wszystkie możliwe doręczenia przesyłek oraz zlecenia nadań od klientów. Na kolejnym etapie kurier wyjeżdża z magazynu i rozpoczyna proces doręczania. Istnieje 5 form doręczeń lub niedoręczeń:

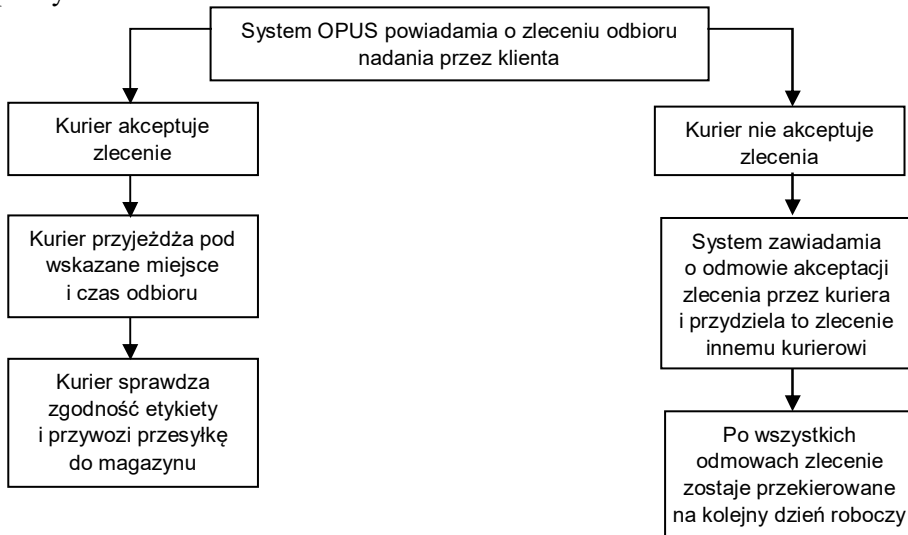
- doręczenie przesyłki do odbiorcy finalnego;
- doręczenie przesyłki osobie znanej odbiorcy finalnemu;
- niemożliwe doręczenie przesyłki (błędny adres, brak gotówki, brak jakiegokolwiek adresata), zwrot przesyłki do magazynu;

- odbiorca odmawia odebrania przesyłki, zwrot przesyłki do magazynu;
- niemożliwe doręczenie do odbiorcy, możliwość przekierowania do POP (punkt obsługi paczek).

Przesyłki, które doręczył kurier, zostają zaksięgowane, dzięki czemu system przesyła informację zwrotną do klienta. Przesyłki niemożliwe do doręczenia zostają przywiezione do magazynu. Kurier nadaje im odpowiednie oznaczenia w systemie i zostają one odebrane przez magazyniera. Zwrócone przesyłki mogą mieć następujące oznaczenia:

- AWIZO,
- odbiór własny,
- odmowa przyjęcia,
- adresat nieznany,
- brak gotówki,
- zwrot do magazynu (awaria samochodu kurierskiego, warunki atmosferyczne, brak czasu na doręczenie).

Proces zbioru nadań przesyłek od klientów przez kuriera rozpoczyna się od powiadomienia od systemu o złożonym zleceniu nadania przez klienta (rys. 25.6). Kurier w przypadku realizacji zlecenia nadania złożonego przez klienta przyjeżdża pod wskazany adres o określonej godzinie. Weryfikuje zgodność etykiety ze stanem faktycznym, odbiera przesyłkę, skanuje skanerem, potwierdzając odbiór nadania, i przywozi przesyłkę do magazynu. W przypadku odmowy akceptacji zlecenia nadania przez kuriera system powiadamia o tym i przydziela to zlecenie innemu kurierowi. Gdy następuje całkowita odmowa zlecenia, przesyłka zostaje u klienta, a zlecenie zostaje przekierowane na kolejny dzień roboczy jako priorytet.



**Rysunek 25.6.** Zbiór nadań przesyłek przez kuriera

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

System logistyczny analizowanego przedsiębiorstwa został tak zaprojektowany, aby jak najefektywniej przemieszczać przesyłki do innych magazynów na terenie kraju oraz jak najszybciej doręczać przesyłki do odbiorców finalnych. Nowoczesność magazynu, doświadczenie w branży oraz niezawodność systemu logistycznego to połączenie, które daje mu przewagę na rynku i pozwala na ciągły rozwój.

Czas pandemii był próbą dostosowania się do obecnych trendów panujących na rynku branży KEP. Działalność firmy kurierskiej została przystosowana w taki sposób, aby jak najlepiej sprostać oczekiwaniom swoich potencjalnych konsumentów. Dla firmy kurierskiej najważniejszy jest klient i jego zadowolenie, a celem – bycie liderem na rynku usług kurierskich. Dostosowanie ofert do potencjalnych konsumentów oraz inwestowanie w technologie dają jej możliwość przewagi konkurencyjnej na rynku (Szpilko, Bazydło, Bondar 2021, s. 20).

## Literatura

1. Dylkowski P. (2022), *Analiza systemu logistycznego w firmie kurierskiej*, praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Częstochowska.
2. Fajczak-Kowalska A., Kowalska M. (2017), *Jakość usług logistycznych – rozwiązania wykorzystywane w ostatniej mili przez firmy kurierskie*, „Logistyka”, 2, s. 42-45.
3. Kuśmińska-Fijałkowska A., Łukasik Z. (2011), *The Land TransShipping Terminal in Processes Flow Stream Individuals Intermodal Transportation*, „TransNav. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation”, 5, 3, s. 395-400.
4. Łukasik Z., Kuśmińska-Fijałkowska A., Kozyra J., Kołodziejczyk P. (2017), *Usługi logistyczne w przedsiębiorstwach kurierskich krajowych i międzynarodowych*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, 9, 18, s. 158-164.
5. Marczuk A., Caban J., Porębska E., Drożdziel P., Duda K., Mikulski M. (2015), *Rynek i logistyka usług kurierskich w Polsce*, „Logistyka”, 3, CD 1, s. 3075-3084.
6. Szpilko D., Bazydło D., Bondar E. (2021), *Wpływ pandemii COVID-19 na zakres i jakość usług kurierskich. Wyniki badań wstępnych*, „Marketing i Rynek”, 28, 5, s. 11-22.

### Analysis of the Logistics System in a Courier Company

**Abstract:** The aim of the chapter is to present the activities of a courier company to illustrate the scale of technological development and adaption to the standards currently prevailing on the market. Using block diagrams, the morning and afternoon-evening logistics system for express and groupage shipments is described. The scope of the described logistics system focuses on 4 point, which are: transport, the process of loading and unloading, segregation of shipments, analysis of scanning, delivery and dispatch of shipments.

**Keywords:** courier services, logistics, transport, quality

## Rozdział 26

# Ocena obciążenia statycznego na stanowisku spawacza

Magdalena Blacha, Mateusz Gancarz, Bartłomiej Figarski  
Anna Pecyna, Agnieszka Buczaj

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie  
Wydział Inżynierii Produkcji

**Streszczenie:** Celem rozdziału jest ocena obciążenia statycznego na stanowisku pracy spawacza zatrudnionego przy produkcji podzespołów do maszyn budowlanych. Zakres opracowania obejmuje omówienie podstawowych zagadnień dotyczących obciążenia pracą. Ponadto przedstawiono metody stosowane do oceny obciążenia mięśniowo-szkieletowego. Zaprezentowano opis zadań występujących na badanym stanowisku pracy podczas spawania ramy EEF 910 metodą MAG. Do przeprowadzonej oceny obciążenia statycznego, a co za tym idzie oceny ryzyka rozwoju dolegliwości ze strony układu mięśniowo-szkieletowego, zastosowano metodę OWAS, na potrzeby której wykonano chronometraż czynności roboczych na stanowisku pracy spawacza. Badania przeprowadzono w zakładzie pracy znajdującym się na terenie województwa lubelskiego. Na podstawie badań obciążenie statyczne pracownika zatrudnionego na stanowisku spawacza oceniono jako duże. Uzyskane wyniki pozwoliły na opracowanie środków profilaktycznych w celu zmniejszenia obciążenia statycznego.

**Słowa kluczowe:** metoda OWAS, obciążenie statyczne, spawacz

## Wprowadzenie

Czynność spawania polega na przyłączaniu elementów metali za pomocą ciepła. Rozwój spawalnictwa w Polsce przypada na koniec XIX wieku. Od tego czasu wykonywanie tej profesji stało się w naszym kraju bardzo popularne. Jednak atrakcyjne zarobki przysługują wielu potencjalnym pracownikom zagrożenia, z którymi wiąże się wykonywanie tej pracy. Można do nich zaliczyć m.in.: poparzenia, liczne choroby płuc (np. obrzęk płuc), uszkodzenie oczu poprzez bezpośredni kontakt z ciałem obcym czy naświetlenie oczu. Podczas łączenia ze sobą elementów spawacze często muszą pracować w różnych pozycjach: stojącej, pochylonej, klęczącej (Sygit 1989, s. 10-11). Przy wykonywaniu prac fizycznych na organizm ludzki wywierane jest obciążenie. Ze względu na rodzaj wykonywanej



pracy wyróżnia się następujące typy obciążeń: dynamiczne, statyczne i monotopowość ruchów (Wojsznis 2018, s. 33). Podczas spawania danego elementu spawacz musi dostosować pozycję swojego ciała do technologii spawania. Wiąże się to z długotrwałym skurczem mięśniowym. Ze względu na konieczność przebywania w jednej pozycji przed dłuższy czas praca ta nie jest efektywna w znaczeniu mechanicznym. Jednakże praca w pozycji wymuszonej, kosztem własnego komfortu, przyczynia się do odczuwania zmęczenia poprzez długotrwałe napięcie mięśni. Ze względu na wysiłek mięśniowy wykonywany w warunkach bezruchu praca spawacza wiąże się z obciążeniem statycznym mięśni. Tryb pracy, podczas której mięśnie przez długi czas znajdują się w fazie skurczu, może przyczynić się do chorób układu mięśniowo-szkieletowego (Wojsznis 2018, s. 40). Celem rozdziału jest ocena obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego u spawacza pracującego przy produkcji podzespołów do maszyn budowlanych.

## Materiał i metoda badawcza

### Opis badanego stanowiska

Pracownik, który został poddany badaniu, to mężczyzna w wieku 43 lat, posiadający 12-letni staż pracy w zawodzie spawacza. W czasie przeprowadzania badań był osobą zdrową, nieposiadającą żadnych chorób ani dolegliwości układu mięśniowo-szkieletowego. Zakład, w którym pracuje, zajmuje się usługami spawalniczo-ślusarskimi przy produkcji podzespołów do części maszyn budowlanych. Spawacz w swojej pracy wykorzystuje metody spawalnicze półautomatyczne MAG i TIG w osłonie gazowej acetylenowo-tlenowej. Do stosowanych urządzeń na badanym stanowisku pracy zalicza się spawarki elektryczne, przetwornice prądu, prostowniki i transformatory spawalnicze. Pracownik w swojej pracy często korzysta z urządzeń do cięcia i zgrzewania metali. Posługuje się również przyrządami kontrolno-pomiarowymi, takimi jak spoinomierze i suwmiarki. Osoby pracujące w zawodzie spawacza muszą posiadać odpowiednie warunki psychofizyczne, tj. pełną sprawność fizyczną i koordynację wzrokowo-ruchową. Wymagania te związane są z koniecznością wytrwania w niewygodnych pozycjach.

### Metoda badań

Do oceny obciążenia statycznego na stanowisku spawacza wykorzystana została metoda OWAS (*Ovako Working Posture Analysis System*). Pozwala ona określić ryzyko, na jakie narażony jest badany pracownik, na podstawie zebranych informacji o dokładnej pozycji ciała (ułożenie nóg, ramion, pleców) przyjmowanej przez niego podczas wykonywanej czynności. Aby zbadać obciążenie statyczne, należy również określić siłę zewnętrzną, jaka wywierana jest przez pracownika (Roman-Liu 2010, s. 29). Podczas wykonywania poszczególnych

czynności w ciągu dnia zmiany roboczej należało uwzględnić czas potrzebny do ich wykonania. Na podstawie obserwacji stanowiska pracy opracowano chronometraż dnia roboczego, przedstawiający wykaz czynności wykonywanych przez pracownika na badanym stanowisku pracy. Następnym etapem było określenie pozycji, jaką przyjmuje ciało pracownika podczas wykonywania roboczych czynności. W tym punkcie podano przyjmowaną pozycję w postaci 4-cyfrowego kodu (rys. 26.1). Oznaczenie poszczególnych części ciała jest następujące: tułów: wyprostowany (1), zgięty do przodu (2), skręcony (3), zgięty i skręcony (4); ramię: obydwie poniżej stawu ramiennego (1), jedno poniżej stawu ramiennego (2), obydwie powyżej stawu ramiennego (3); i nóg: pozycja siedząca (1), stojąca z wyprostowanymi nogami (2), stojąca z jedną nogą wyprostowaną (3), stojąca z nogami zgiętymi (4), stojąca z jedną nogą zgiętą (5), klęk na jednym lub obu kolana (6), chodzenie (7).



Rysunek 26.1. Kody położenia tułowia, ramion, nóg według metody OWAS

Źródło: (Roman-Liu, Kotarski 2010)

Czwartym oznaczeniem kodowym jest siła wywierana przez pracownika podczas wykonywania zadań. Wartość zależy od płci badanej osoby (tab. 26.1). W omawianym przypadku będzie to mężczyzna.

Tabela 26.1. Klasyfikacja siły zewnętrznej w metodzie OWAS

Kod siły zewnętrznej	Obciążenie zewnętrzne		
	Mężczyźni	Kobiety i młodociani	Młodociane dziewczęta
1	Poniżej 10 kg	Poniżej 5 kg	Poniżej 2 kg
2	Od 10 do 20 kg	Od 5 do 10 kg	Od 2 do 6 kg
3	Powyżej 20 kg	Powyżej 10 kg	Powyżej 6 kg

Źródło: Opracowanie na podstawie (CIOP-PIB)

Kod zostanie ustalony za pomocą *tab. 26.2*. Posłuży ona także do wyznaczenia obciążenia statycznego dla danej pozycji do odpowiedniej kategorii. Charakterystyka poszczególnych kategorii znajduje się w *tab. 26.3*.

**Tabela 26.2. Kategoria oceny obciążenia statycznego w metodzie OWAS**

Nogi		1			2			3			4			5			6			7		
Siła zewnętrzna		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
tułów	ramiona	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1	1
2	1	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3
	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	2	3
	3	3	3	4	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	3	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1
	3	2	2	3	1	1	1	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1
4	1	2	3	3	2	2	3	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3
	2	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3
	3	4	4	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3

Źródło: Opracowanie na podstawie (CIOP-PIB)

**Tabela 26.3. Opis kategorii obciążenia w metodzie OWAS**

Nr kategorii	Opis poszczególnych kategorii
1	Pozycja lub pozycje przyjmowane podczas pracy są naturalne. Obciążenie jest optymalne lub akceptowalne, nie występuje szkodliwe działanie na układ mięśniowo-szkieletowy pracownika. Nie występuje potrzeba wprowadzania zmian na stanowisku pracy.
2	Pozycja lub pozycje przyjmowane podczas pracy mogą mieć negatywny wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy pracownika. Obciążenie statyczne jest praktycznie akceptowalne. Nie występuje potrzeba wprowadzania natychmiastowych zmian na stanowisku pracy, ale warto wziąć taką konieczność pod uwagę w najbliższej przyszłości.
3	Pozycja lub pozycje przyjmowane podczas pracy mają negatywny wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy. Obciążenie statyczne jest duże. Zmiany na stanowisku pracy powinny zostać przeprowadzone jak najszybciej.
4	Pozycja lub pozycje przyjmowane podczas pracy mają bardzo negatywny wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy. Obciążenie statyczne jest bardzo duże. Zmiany ergonomiczne muszą być przeprowadzone natychmiast.

Źródło: Opracowanie na podstawie (Wojsznis 2018)

Na podstawie kategorii obciążenia ocenia się ryzyko dla danej kategorii w skali 3-stopniowej jako: małe, średnie lub duże (*tab. 26.4*). Korzystając z *tab. 26.2* odczytywana jest kategoria oceny obciążenia dla dominującej pozycji na podstawie stworzonego wcześniej 4-cyfrowego kodu pozycji. Następnie należy określić, czy pozycja ciała w trakcie wykonywanej czynności jest wymuszona, czy nie. Warunkiem zaliczenia do pozycji wymuszonej jest brak możliwości ułożenia ciała w sposób komfortowy dla pracownika. Pozycja ta jest narzucona organizacją stanowiska pracy oraz konstrukcją urządzenia. Pozycja niewymuszona z kolei nie jest narzucona i pracownik może modyfikować swoje ruchy według osobistych preferencji.

**Tabela 26.4. Ocena ryzyka w metodzie OWAS**

Kategoria obciążenia	Pozycja ciała	Czas pracy [%]	Ryzyko
1	Niewymuszona	< 70	Małe
		> 70	Średnie
	Wymuszona	< 50	Małe
		50-70	Średnie
		> 70	Duże
2	Niewymuszona	< 50	Małe
		50-70	Średnie
		> 70	Duże
	Wymuszona	< 30	Małe
		30-50	Średnie
		> 50	Duże
3 lub 4	Wymuszona	< 30	Średnie
		> 30	Duże

Źródło: (CIOP-PIB)

## Wyniki badań

Na podstawie informacji uzyskanych od badanego spawacza i stworzonego chronometrażu została przeprowadzona ocena obciążenia statycznego. W badaniu przedstawiono wszelkie czynności, które wykonuje pracownik podczas spawania ramy EEF 910 metodą MAG.

Osobą biorącą udział w badaniu jest mężczyzna pracujący na hali. W *tab. 26.5* przedstawiono chronometraż dnia roboczego spawacza. Wyodrębniono w nim czynności wykonywane przez pracownika oraz czas potrzebny na ich wykonanie. Polityka firmy zakłada, że pracownik w ciągu swojej zmiany roboczej powinien spełnić normę w postaci zespawania 3 ram EEF 910. Z tego powodu niektóre czynności, takie jak złożenie elementów oraz usuwanie uchybień po zastosowaniu spawania, zostały pomnożone razy 3. W tabeli zawarto również informacje o pracy w pozycji wymuszonej. W zakładzie pracy, w którym pracuje badany

spawacz, obowiązuje 3-zmianowy tryb pracy. W chwili przeprowadzanego badania spawacz odbywał zmianę nocną w godzinach 23:00-07:00. Czas przeznaczony na pracę to 7 godzin i 20 minut, zaś 40 min to łączny czas na przerwę (krótką 10-minutową oraz dłuższą półgodzinną – obiadową).

**Tabela 26.5. Chronometraż dnia roboczego**

L.p.	Rodzaj wykonywanych czynności	Czas jednostkowy	Liczba powtórzeń	Czas całkowity	Rodzaj pozycji (wymuszona/niewymuszona)	OWAS (kod + kategoria)	Czas pracy
		[min]		[min]			[%]
1.	Przygotowanie stanowiska pracy (PM)	5	1	5	Niewymuszona	1171 Kat. 1	1,2
2.	Składanie elementów do spawania	15	3	45	Wymuszona	2123 Kat. 3	10,2
3.	Zakładanie magnesywych chwytaków na złożone elementy	1	3	3	Wymuszona	2141 Kat. 3	0,6
4.	Przełożenie konstrukcji na obrotnik za pomocą suwnicy	5	3	15	Wymuszona	1171 Kat. 1	3,4
5.	Przykręcenie konstrukcji na obrotnik	2	3	6	Wymuszona	2241 Kat. 3	1,5
6.	Spryskanie płynem antyodbrzygowym	1	3	3	Niewymuszona	2171 Kat. 2	0,6
7.	Spawanie i manipulacja obrotnikiem	80	3	240	Wymuszona	2222 Kat. 2	54,7
8.	Czyszczenie za pomocą czyszczarni oscylacyjnej i szpachelki	25	3	75	Wymuszona	4121 Kat. 2	17
9.	Pomiary prostopadłości wyrobu po spawaniu	1	3	3	Niewymuszona	2131 Kat. 2	0,6
10.	Odkręcanie przyrządu	5	3	15	Wymuszona	2141 Kat. 3	3,4
11.	Składowanie za pomocą suwnicy na paletę	5	3	15	Wymuszona	1171 Kat. 1	3,4
12.	Sprzątanie	10	1	10	Niewymuszona	1171 Kat. 1	2,3

Źródło: Opracowanie własne

Spawacz rozpoczyna swój dzień pracy od dokładnego przygotowania swojego stanowiska, tj. sprawdzenia sprawności narzędzi oraz zapoznania się z planem rysunku technicznego i kartą spawacza. Po obchodzie pracownik zostaje przekierowany do miejsca składania elementów do spawania w pozycji stojącej z lekko pochylonym do przodu tułowiem. Podczas wykonywania tej czynności siła

zewnętrzna, jaką wywiera pracownik, wynosi około 22 kilogramów. Złożona konstrukcja przenoszona jest za pomocą suwnicy na obrotnik w pozycji chodzącej z jedną ręką wysuniętą do przodu trzymającą pilot oraz drugą trzymającą łańcuch. Pozycja ta jest wymuszona ze względu na konieczność pilnowania odstępu w taki sposób, aby przenoszony element nie zmiażdżył stopy pracownika w przypadku odzepienia się magnesowych chwytaków, mimo to kategoria obciążenia wynosi 1 ze względu na małą siłę zewnętrzną.

Osoba pracująca na stanowisku spawacza w czasie zmiany roboczej najwięcej czasu spędza na spawaniu spoin w złożonym elemencie. W zależności od pozycji spawania (podolna, pułapowa) oraz jej kierunku spawacz często musi pracować przez dłuższy czas w pozycji stojącej z pochylonym do przodu tułowiem. Spawanie jest czynnością, na którą pracownik przeznacza 240 minut, co stanowi 54,7% czasu pracy. Działanie to przekracza 50% czasu pracy, dlatego ryzyko obciążenia zostanie oszacowane na podstawie tej czynności (*tab. 26.2*). Spawane oznaczone jest kodem 2222, zaś kategoria obciążenia to 2. Oznacza to, że obciążenie jest akceptowalne, jednakże przyjmowana pozycja może w przyszłości spowodować dolegliwości układu mięśniowo-szkieletowego, takie jak bóle pleców oraz choroby kręgosłupa.

Ważną czynnością w pracy spawacza jest również oczyszczanie spawanego elementu szpachelką oraz czyszczarką. Obie te czynności są wykonywane w pozycji wymuszonej przez to, że nie można ich zmodyfikować według własnych potrzeb. Składa się na to m.in. praca za pomocą narzędzi (szpachelka, czyszczarka, przewody oraz wąż spawalniczy).

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że obciążenie statyczne na stanowisku spawacza kształtuje się na poziomie dużym. Zakład pracy powinien w przyszłości podjąć kroki, aby zmniejszyć ryzyko obciążenia w zakładzie na średnie.

## Podsumowanie

Praca spawacza biorącego udział w badaniu obarczona jest dużym obciążeniem statycznym, a co za tym idzie wysokim ryzykiem rozwoju dolegliwości ze strony układu mięśniowo-szkieletowego. Zakład pracy powinien zastosować profilaktykę mającą na celu zmniejszenia ryzyka na średnie, m.in. poprzez wydłużenie przerw dla pracowników na odpoczynek. W celu zmniejszenia uciążliwości pracy związanej z obciążeniem statycznym można wprowadzić rotację stanowisk oraz skrócić czas wykonywania najbardziej obciążających czynności. Należy również pamiętać o promocji zdrowego stylu życia wśród pracowników oraz prowadzić szkolenia dotyczące przyjmowania prawidłowych pozycji podczas pracy, co pomoże zmniejszyć ryzyko powstawania dolegliwości mięśniowo-szkieletowych.

## Literatura

1. CIOP-PIB, *Metoda OWAS*, [https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?\\_nfb=true&\\_pageLabel=P620059861340178661073&html\\_tresc\\_root\\_id=300012898&html\\_tresc\\_id=300012981&html\\_klucz=32274&html\\_klucz\\_spis=&gclid=Cj0KCQjwr82iBhCuARIsAO0EAZw1x5V2c9MePSZ3HY6mKCb4e42x0S0RGmW1IKGKvEQINheD-JtApu3UaAitxEALw\\_wcB](https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfb=true&_pageLabel=P620059861340178661073&html_tresc_root_id=300012898&html_tresc_id=300012981&html_klucz=32274&html_klucz_spis=&gclid=Cj0KCQjwr82iBhCuARIsAO0EAZw1x5V2c9MePSZ3HY6mKCb4e42x0S0RGmW1IKGKvEQINheD-JtApu3UaAitxEALw_wcB) (dostęp: 08.04.2023).
2. Roman-Liu D., Tokarski T. (2010), *Ocena obciążenia statycznego z zastosowaniem metody OWAS*, Roman-Liu.pdf (dostęp: 23.03.2023).
3. Sygit M. (1989), *Spawacz: środowisko pracy, zdrowie i jego ochrona*, Instytut Związków Zawodowych, Warszawa.
4. Wojewódzki Urząd Pracy w Szczecinie, *Spawacz*, ulotka, [https://www.wup.pl/images/uploads/IV.DLA\\_BEZROBOTNEGO/a.CLIPKZ\\_poradnictwo\\_zawodowe/V.do\\_pobrania/2.ulotki\\_do\\_zawodow/ulotki\\_2017/Spawacz.pdf](https://www.wup.pl/images/uploads/IV.DLA_BEZROBOTNEGO/a.CLIPKZ_poradnictwo_zawodowe/V.do_pobrania/2.ulotki_do_zawodow/ulotki_2017/Spawacz.pdf) (dostęp: 02.05.2023).
5. Wojsznis M. (2018), *Ergonomia – ocena stanowisk pracy*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.

### Evaluation of Static Load at the Welding Station

**Abstract:** The aim of the chapter is to assess the static load at the workstation of a welder employed in the production of components for construction machinery. The scope of work includes a discussion of basic issues related to workload. In addition, methods used to assess musculoskeletal load are presented. A description of tasks occurring at the tested workstation during welding of the EEF 910 frame by MAG method was presented. The OWAS method was used to assess the static load and, consequently, to assess the risk of developing musculoskeletal disorders. The research was carried out in a workplace located in the Lublin Voivodeship. On the basis of the tests carried out, the static load of the worker employed as a welder was assessed as high. The obtained results allowed the development of prophylactic measures to reduce the static load.

**Keywords:** OWAS method, static load, welder

## Rozdział 27

# Ocena obciążenia fizycznego na stanowisku górnika

Bartłomiej Figarski, Magdalena Blacha, Mateusz Gancarz  
Anna Pecyna, Agnieszka Buczaj

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie  
Wydział Inżynierii Produkcji

**Streszczenie:** Celem rozdziału jest przeprowadzenie oceny wysiłku fizycznego na stanowisku górnika zatrudnionego w wybranej kopalni na terenie Śląska. Do przeprowadzenia badań wykorzystano metodę chronometrażowo-tabelaryczną Lehmana. Na podstawie opracowanego chronometrażu pracy na stanowisku górnika oszacowano wydatek energetyczny, który posłużył do oceny wysiłku fizycznego. Wysiłek fizyczny pracownika zatrudnionego na stanowisku sztygar w kopalni oceniono jako bardzo duży. Uzyskane wyniki pozwoliły na opracowanie środków profilaktycznych w celu zmniejszenia obciążenia pracą.

**Słowa kluczowe:** górnik, kopalnia, metoda Lehmana, obciążenie pracą, wysiłek fizyczny

## Wprowadzenie

W dzisiejszym czasach ciężko sobie wyobrazić świat bez węgla kamiennego, rud żelaza i innych surowców mineralnych. Zawodem, który zajmuje się wydobywaniem węgla kamiennego, jest górnik. Podstawowe stanowiska pracy w górnictwie to: górnik, górnik ładowacz, górnik murarz – betoniarz, mierniczy górniczy, ślusarz maszynowy (Zarządzenie Nr 17...). Sektor górniczy pozostaje od lat jednym z najbardziej niebezpiecznych i wypadkogennych sektorów gospodarki. Zagrożenia w pracy górnika mogą wynikać zarówno z zagrożeń naturalnych (tąpnięcia, osuwiska, metanowe wyrzuty gazów i skał, wybuchy pyłu węglowego), jak i technicznych (m.in. pyłowe, pożarowe, porażenia prądem elektrycznym, pochwycenie przez wirujące i ruchome elementy, upadek z wysokości). Głównym niebezpiecznym czynnikiem środowiskowym, mogącym spowodować uraz, a nawet śmierć, jest tąpnięcie. Zjawisko to polega na pękaniu skał i ich obrywaniu się podczas silnych wstrząsów. Ryzyko powstania takiej sytuacji jest bardzo duże, przez co dodatkowo osoba pracująca w tym zawodzie musi cechować się mocną psychiką. W kopalni istnieje także spore ryzyko wystąpienia wybuchu, który



może wywołać metan wytwarzający się podczas wydobywania. Innymi zagrożeniami związanymi z pracą pod ziemią są pylice płuc wywołane nadmierną ekspozycją na pyły krzemionki oraz węgla.

Każda praca powoduje biologiczne obciążenie organizmu ludzkiego, co wiąże się z angażowaniem i zmianami czynnościowymi określonych układów. W zależności od czynnika wywołującego ogólne obciążenie pracownika, można je podzielić na obciążenie fizyczne oraz psychoneurwowe. Obciążenie fizyczne jest efektem pracy mięśniowej i wynika z aktywności ruchowej. Na podstawie specyfiki skurczów mięśniowych dokonuje się podziału wysiłków na statyczne i dynamiczne. W pracy dynamicznej miejsca przyczepów mięśniowych się przybliżają, a następnie oddalają, w wyniku czego powstaje skurcz i rozkurcz. Natomiast podczas pracy statycznej, która wykonywana jest w warunkach bezruchu, długo trwające napięcie mięśniowe przez ucisk na naczynia krwionośne ogranicza swobodny przepływ krwi, co przyspiesza zmęczenie i poczucie dyskomfortu. Wyróżnia się trzy główne składniki wysiłku fizycznego: wydatek energetyczny, obciążenie statyczne oraz monotypowość wykonywanych ruchów. Ze względu na wydatek poniesiony podczas pracy klasyfikuje się je na pięciu poziomach ciężkości (tab. 27.1).

**Tabela 27.1. Klasyfikacja ciężkości pracy na podstawie efektywnego wydatku energetycznego w ciągu zmiany roboczej**

Stopień ciężkości pracy	Wydatek energetyczny podczas dnia pracy			
	Mężczyźni		Kobiety	
	[kcal]	[kJ]	[kcal]	[kJ]
Bardzo lekka	< 300	< 1256	< 200	< 837
Lekka	300-800	1256-3350	200-700	837-2930
Umiarkowana	800-1500	3350-6280	700-1000	2930-4187
Ciężka	1500-2000	6280-8374	1000-1200	4187-5024
Bardzo ciężka	> 2000	> 8374	> 1200	> 5024

Źródło: Opracowanie na podstawie (CIOP)

Do oceny obciążenia pracą, w przypadku braku możliwości zastosowania metod pomiarowych, wykorzystywane są między innymi metody szacunkowe. Najczęściej stosowana jest chronometrażowo-tabelaryczna metoda Lehmana (Jędruszczak 2011, s. 141-143).

## Materiał i metody

### Opis stanowiska pracy

Badania obciążenia fizycznego przeprowadzono na stanowisku sztygara. Badany pracownik, zatrudniony w jednej z myśłowickich kopalni na Śląsku, jest

w wieku 55 lat i posiada 24-letni staż pracy. Sztygar to stanowisko kierownicze, na którym pracownik zajmuje się dozorem technicznym oraz administracją pracy górników. Dozór polega na obchodzie, podczas którego sprawdzane są prace na każdym stanowisku robotniczym. Sztygar jest pracownikiem, który „zjeżdża na dół” na głębokość około 700 metrów, czyli jest pracownikiem dołowym. Jego głównymi czynnościami jest nadzór techniczny oraz kontrolowanie prac w kopalni.

## Metodyka

Oszacowanie poziomu obciążenia fizycznego na stanowisku sztygara rozpoczęto stworzeniem chronometrażu pracy. Najpierw przygotowano fotografię dnia, czyli spis wszystkich czynności wykonywanych przez pracownika w ciągu dnia roboczego. Następnie określono czas wykonywania tych czynności, tworząc chronometraż pracy. Zadania o podobnym charakterze zostały pogrupowane, a czas ich wykonywania zsumowany. Do każdej wykonywanej czynności zawodowej przyporządkowana została pozycja ciała, w której ta czynność była wykonywana lub która podczas tej pracy dominuje.

W pracy została wykorzystana metoda szacunkowa Lehmana, za pomocą której oceniono wysiłek fizyczny na stanowisku sztygara. W tym celu dokonano oceny dla takich elementów, jak: wydatek energetyczny związany w wykonywanymi czynnościami, obciążenie statyczne oraz monotypia.

Pierwszym etapem w przeprowadzeniu badań obciążenia fizycznego metodą szacunkową jest określenie poziomu wydatku energetycznego. W metodzie Lehmana jednostkowy wydatek energetyczny dla poszczególnych czynności ustala się dwuetapowo (Krauze, Profaska 2012, s. 109). Na pierwszym etapie dokonuje się oceny pozycji ciała podczas pracy i – na podstawie wartości tabelarycznych – określa się wydatek energetyczny wynikający z utrzymania określonej pozycji ( $WE_a$ ) (tab. 27.2). Natomiast na drugim etapie – na podstawie analizy czynności roboczych – ocenia się główne grupy mięśni zaangażowanych w ich wykonywanie oraz intensywność wysiłku. Wartości wydatku energetycznego związanego z angażowaną grupą mięśniową określa się jako  $WE_b$  i wyraża w kcal/min (tab. 27.3) (Grzywiński i in. 2014, s. 417).

**Tabela 27.2. Wydatek energetyczny  $WE_a$  z uwagi na pozycję ciała**

Pozycja ciała	$WE_a$ [kcal/min]
Siedząca	0,3
Kłęcząca	0,5
Stojąca	0,6
Stojąca pochylona	0,8
Chodzenie	1,7-3,5
Chodzenie bez obciążenia po pochyłości ok. 10°	0,75 na 1 m wzniesienia

Źródło: Opracowanie na podstawie (CIOP)

**Tabela 27.3. Wydatek energetyczny  $WE_b$  z uwagi na pracę kończyn oraz mięśni zaangażowanych w pracę**

Rodzaj pracy	$WE_b$ [kcal/min]	
	Praca palców dłoni i przedramienia	Lekka
Średnia		0,6-0,9
Ciężka		0,9-1,2
Prace jednego ramienia	Lekka	0,7-1,2
	Średnia	1,2-1,7
	Ciężka	1,7-2,2
Praca obu ramion	Lekka	1,5-2,0
	Średnia	2,0-2,5
	Ciężka	2,5-3,0
Praca całego ciała	Lekka	2,5-4,0
	Średnia	4,0-6,0
	Ciężka	6,0-8,5
	Bardzo ciężka	8,5-11,5

Źródło: Opracowanie na podstawie (CIOP)

Po określeniu wartości  $WE_a$  oraz  $WE_b$  zsumowano je, aby obliczyć wartość wydatku energetycznego charakterystycznego dla danej czynności roboczej wykonywanej przez pracownika  $WE_c$ . Do obliczenia wydatku energetycznego zastosowano wzór (1):

$$WE_c = (WE_a + WE_b) \times T \quad (1)$$

gdzie:

$WE_c$  – wydatek energetyczny związany z daną czynnością, wyrażany w [kcal] lub [kJ],

$WE_a$  – wydatek energetyczny związany z zajmowaną pozycją ciała podczas wykonywania czynności, wyrażany w [kcal/min],

$WE_b$  – wydatek energetyczny związany z grupą mięśni zaangażowanych w wykonanie pracy, wyrażany w [kcal/min],

$T$  – czas trwania danej czynności [min].

Wydatek energetyczny został przyporządkowany do odpowiednich poziomów obciążenia fizycznego według skali przyjętej w tej metodzie badawczej (tab. 27.4).

**Tabela 27.4. Punktowa i słowna ocena całkowitego wydatku energetycznego**

Wydatek energetyczny netto w czasie 8 h pracy [kcal]	Ocena wysiłku	
	Słowna	Punktowa
poniżej 300	Bardzo mały	0
300-800	Mały	1-25
800-1500	Średni	25-50
1500-2000	Duży	51-75
Powyżej 2000	Bardzo duży	76-100

Źródło: Opracowanie na podstawie (CIOP)

Na podstawie uzyskanego wyniku z wydatku energetycznego należy ocenić wysiłek słownie oraz w skali punktowej.

Kolejnym składnikiem obciążenia fizycznego pracą jest obciążenie statyczne. Jest ono charakterystyczne dla czynności, w których ciało pozostaje w określonych pozycjach przez dłuższy czas i obciąża daną partię kręgosłupa lub kończyny. W celu dokonania oceny obciążenia statycznego określa się dominującą pozycję, czyli takie położenie ciała, w którym pracownik pozostaje dłużej niż 3 godziny pracy. Następnie korzystając z *tab. 27.5* dokonano oceny słownej i punktowej obciążenia statycznego.

**Tabela 27.5. Stopień obciążeń statycznych dla różnych pozycji ciała na przykładzie stanowisk**

Ocena stopnia obciążenia statycznego		Pozycja ciała przy pracy
Punktowa	Słowna	
1-10	Mały 1-30	Siedząca niewymuszona
11-20		Stojąca niewymuszona z okresową zmianą na siedzącą
21-30		Siedząca lub stojąca na przemian z chodzeniem
31-40	Średni 31-40	Siedząca wymuszona lub nieznacznie pochylona
41-50		Stojąca niewymuszona
51-60		Stojąca wymuszona z możliwością chodzenia
61-70	Duży 61-90	Stojąca wymuszona bardzo pochylona
71-80		Stojąca wymuszona, niewymuszona bez możliwości okresowej zmiany na siedzącą
81-90		Stojąca wymuszona, pochylona
91-100	Bardzo duży 91-100	Kłęcząca w przysiadzie, inne nienaturalne pozycje ciała

Źródło: Opracowanie na podstawie (CIOP)

Kolejnym etapem jest ocena monotypowości ruchów stereotypowych na badanym stanowisku podczas 8-godzinnego dnia pracy. Na podstawie *tab. 27.6* dokonano oceny stopnia uciążliwości pracy (Prędecka 2016, s. 149-150).

**Tabela 27.6. Ocena monotypii**

Liczba powtórzeń ruchów w czasie 8 h pracy		Ocena stopnia uciążliwości	
Siła powyżej 100 N	Siła do 100 N	Punktowa	Słowna
Poniżej 300	Poniżej 800	1-30	Mały
300-800	800-1600	31-60	Średni
Powyżej 800	Powyżej 1600	61-100	Duży

Źródło: Opracowanie na podstawie (CIOP)

Ostatnim etapem było zsumowanie punktów uzyskanych z oceny poszczególnych składników: wydatku energetycznego, obciążenia statycznego oraz monotypowości. Na tej podstawie dokonano określenia wysiłku fizycznego, korzystając z *tab. 27.7*.

**Tabela 27.7. Ocena wysiłku fizycznego**

Ocena wysiłku fizycznego	
Słowna	Punktowa
Bardzo lekki	1-30
Lekki	31-70
Średni	71-120
Ciężki	121-190
Bardzo ciężki	191-300

Źródło: Opracowanie na podstawie (CIOP)

## Wyniki

Na podstawie obserwacji pracy na stanowisku sztygara został sporządzony chronometraż dnia roboczego. W *tab. 27.8* zostały zebrane czynności wykonywane w czasie 8-godzinnej zmiany roboczej. Praca jest wykonywana w trybie 3-zmianowym w godzinach 6:00-14:00, 14:00-22:00, 22:00-6:00. W czasie zmiany roboczej przysługują trzy przerwy 15-minutowe.

Sztygar zaczyna dzień roboczy od odbicia dokumentów oraz przebrania się w strój roboczy. Następnie pobiera sprzęt roboczy w postaci maski, lampy i aparatu ucieczkowego oraz odbywa konsultacje z sztygarem z poprzedniej zmiany w celu zdobycia aktualnych informacji o stanie szybu kopalni. Poświęca na to 19 minut przy małym wydatku energetycznym. Po konsultacjach sztygar udaje się do windy oraz oczekuje na jej przyjazd – ta czynność wraz ze zjazdem zajmuje 18 minut. Po zjeździe na dół sztygar przydziela zadania pracownikom oraz udaje się do miejsca swojej pracy. Po dotarciu do celu sztygar zaczyna wiercenie trwające 150 minut. Czynność tę wykonuje w pozycji stojącej z wykorzystaniem obu ramion.

W dniu prowadzenia badań sztygar w czasie wiercenia został poproszony o pomoc przez nowego pracownika przy kotwieniu. Podczas wykonywania tej czynności sztygar spędził 60 min w pozycji stojącej z wykorzystaniem pracy obu ramion. Następnie przez 10 minut sztygar przesunął urobek. Po przesunięciu urobku do odpowiedniego miejsca udał się z powrotem do miejsca wiercenia i zmiany tarczy na maszynie. Następnie przeprowadził kontrolę taśmociągu, oceniając, czy tarcza została prawidłowo założona na maszynie. Gdy upewnił się, że działa prawidłowo, przesunął wagonik z urobkiem do odpowiedniego miejsca składowania. Podczas dostarczania urobku nowy pracownik poprosił sztygara o naprawę maszyny. Zajęło mu to 45 minut. Po skończonej zmianie roboczej, na dole kopalni przed wjazdem windą, sztygar policzył pracowników oraz wezwał windę na dół. Po wjeździe zdał sprzęt do magazynu i udał się do łaźni. Zajęło mu

to 35 minut. Przed wyjściem z terenu zakładu odbił dokumenty. Należy zaznaczyć, że osoba biorąca udział w badaniu zajmuje się naprawą urządzeń tylko w przypadku awarii. Z kolei wykonywanie w tym samym dniu czynności takich jak kotwiczenie lub wiercenie następuje tylko wtedy, gdy sztygar musi przeszkolić nowego pracownika.

**Tabela 27.8. Chronometraż oraz oszacowany wydatek podczas poszczególnych czynności na stanowisku sztygara**

Stanowisko pracy: Sztygar					
Płeć: męczyzna		T [min]	WE <sub>a</sub> [kcal/min]	WE <sub>b</sub> [kcal/min]	WE <sub>c</sub> = (WE <sub>a</sub> + WE <sub>b</sub> ) × T [kcal]
Lp.	Wykonywane czynności				
1.	Odbicie przyjazdu	2	1,7	0,4	4,2
2.	Zmiana ubioru na roboczy	5	0,6	3,0	18
3.	Pobór i przygotowanie sprzętu (maski, lamy, aparatu ucieczkowego)	10	2,0	2,0	40
4.	Rozmowa ze sztygarem z poprzedniej zmiany roboczej	2	0,6	1,1	3,4
5.	Czekanie na windę w celu zjazdu	8	0,6	0	4,8
6.	Zjazd w szyb kopalni	10	0,6	0	6
7.	Przydzielanie robót pracownikom	5	0,6	0	3
8.	Podróż do wybranego punktu pracy	10	2,2	0	22
9.	Wiercenie	150	0,6	8,2	1320
10.	Kotwiczenie	60	0,6	3,0	216
11.	Przesunięcie urobku	10	2,5	8,0	105
12.	Zmiana tarczy na maszynie	35	0,8	2,6	119
13.	Kontrola taśmociągu	10	1,8	2,5	43
14.	Pchanie urobku za pomocą wagonika	30	3,0	9,2	366
15.	Naprawa maszyny	45	0,8	10	486
16.	Kontrola pracowników	20	1,7	2,5	84
17.	Policzenie pracowników	5	0,6	0	3
18.	Wyjazd na powierzchnię	10	0,6	0	6
19.	Zdanie sprzętu	5	2,0	3,0	25
20.	Łaźnia	15	0,3	2,0	34,5
21.	Odbicie dokumentu	2	1,7	0,4	4,2
Suma					2913,1

Źródło: Opracowanie własne

W *tab. 27.8* przedstawiono także oszacowane wartości wydatku energetycznego dla poszczególnych czynności. Całkowity wydatek energetyczny na badanym stanowisku wyniósł 2913,1 kcal, co klasyfikuje go na poziomie bardzo dużym. Najbardziej energochłonne czynności podczas pracy sztygara to: wiercenie, naprawa maszyny, pchane urobku i kotwienie.

Kolejny oceniony element wysiłku fizycznego to obciążenie statyczne. Wiercenie to czynność, która zajmuje największą ilość czasu (150 minut), dlatego pozycja ciała podczas tej czynności została uznana za dominującą. Sztygar wierci w pozycji stojącej pochylonej, wymagającej jednocześnie operowania narzędziem wiertniczym. W skali punktowej obciążenie statyczne określono na 81 punktów, a słownie jako duże.

Następnym etapem oceny było oszacowanie monotypii. Ze względu na dużą powtarzalność czynności (ok. 800-850) i niską siłę (nieprzekraczającą 10 kg) monotypię oceniono na poziomie średnim.

Aby uzyskać końcową ocenę wysiłku fizycznego, zsumowano liczbę punktów uzyskaną z oceny wydatku energetycznego, monotypowości oraz obciążenia statycznego (*tab. 27.9*). Obciążenie fizyczne na stanowisku sztygara zostało ocenione na poziomie bardzo dużym.

**Tabela 27.9. Łączna ocena obciążenia fizycznego metodą Lehmana**

Składniki wysiłku fizycznego	Ocena	
	Punktowa	Słowna
Wydatek energetyczny	100	Bardzo duży
Obciążenie statyczne	81	Duży
Monotypia	45	Średni
	Suma: 226	Wysiłek fizyczny: bardzo duży

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

Po przeprowadzeniu oceny obciążenia fizycznego na stanowisku sztygara za pomocą metody Lehmana wysiłek fizyczny oszacowano na poziomie bardzo dużym. Największy wpływ na ocenę miał wydatek energetyczny, a do najbardziej energochłonnych czynności w ciągu dnia roboczego należało wiercenie oraz kotwienie.

W celu zmniejszenia uciążliwości pracy związanej z obciążeniem fizycznym na stanowisku sztygara należy umożliwić wykonywanie czynności roboczych wymagających dużego wysiłku fizycznego za pomocą urządzeń mechanicznych ułatwiających pracę lub zastosować maszyny zastępujące człowieka. Innym przykładem działań optymalizujących obciążenie wysiłkiem fizycznym na stanowisku pracy może być wprowadzenie rotacji stanowisk oraz skrócenie czasu wykonywania najcięższych czynności. Ponadto do zmniejszenia uciążliwości pracą

fizyczną mogą się przyczynić częstsze i/lub dłuższe przerwy na odpoczynek po każdej bardziej obciążającej czynności. Nie należy też zapominać o promocji zdrowego stylu życia wśród pracowników (aktywność fizyczna rekreacyjna dla podniesienia poziomu wydolności fizycznej, odpowiednia dieta, w tym ilość wypijanych płynów, zwłaszcza podczas wysiłku i po jego zakończeniu) czy promocji badań profilaktycznych.

## Literatura

1. CIOP, [www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop.pl](http://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop.pl) (dostęp: 08.04.2023).
2. Grzywiński W., Mederski P., Bembenek M. (2014), *Porównanie metod określania wydatku energetycznego na przykładzie leśnictwa*, „Leśne Prace Badawcze”, 75, 4, s. 417-421.
3. Jędruszczak J. (2011), *Ocena uciążliwości wysiłku fizycznego na stanowisku kelnera metodą chronometryczno-tabelaryczną Lehmana oraz metodą OWAS*, „Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach”, 1, 7, s. 135-157.
4. Krause M., Profaska M. (2012), *Aktualne wytyczne oceny ryzyka zawodowego dla obciążenia pracą fizyczną*, „Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji”, 2, 2, s. 101-111.
5. Prędecka A., Węgrzyn M., Sowa M., Sulak E. (2016), *Ocena wydatku energetycznego na stanowisku pracy piekarza metodą chronometryczno-tabelaryczną wg Lehmana*, „Zeszyty Naukowe SGSP / Szkoła Główna Służby Pożarniczej”, 59, 3, s. 137-155.
6. Zarządzenie Nr 17 Ministra Górnictwa i Energetyki z dnia 12 sierpnia 1983 r. w sprawie określenia stanowisk pracy w resorcie górnictwa i energetyki, na których są wykonywane prace w szczególnych warunkach (Dz.Urz.WUG.1983.8.12).

## Assessment of Physical Load on the Miner's Station

**Abstract:** The aim of the chapter is to assess the physical effort of a miner employed in a selected mine in Silesia. Lehmann's chronometric and tabular method was used to conduct the research. On the basis of the developed timetable of work at the miner's position, energy expenditure was estimated, which was used to assess physical effort. The physical effort of an employee employed as a mine foreman was assessed as very high. The results obtained led to the development of preventive measures to reduce the workload.

**Keywords:** miner, mine, Lehmann's method, physical effort workload



## Rozdział 28

# Obowiązek wykorzystania osiągnięć nauki i techniki do zapewnienia bezpiecznych i higienicznych warunków pracy

Joanna Fik<sup>1</sup>, Piotr Fik<sup>2</sup>

Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy im. Jana Długosza w Częstochowie

<sup>1</sup>Wydział Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Technicznych

<sup>2</sup>Wydział Prawa i Ekonomii

**Streszczenie:** W rozdziale poruszono zagadnienia związane z zakresem obowiązku pracodawcy wynikającym z art. 207 § 2 *Kodeksu pracy*, czyli koniecznością wykorzystywania odpowiednich osiągnięć nauki i techniki w celu ochrony zdrowia i życia pracowników. Na podstawie analizy źródeł prawa, orzecznictwa oraz aktualnej literatury autorzy udzielają odpowiedzi na następujące pytania badawcze: 1) Jak definiować odpowiedni poziom wykorzystania osiągnięć nauki i techniki w praktyce bhp, kiedy aktywizuje się obowiązek pracodawcy do poszukiwania nowych rozwiązań minimalizujących zagrożenie? 2) Czy pracodawca ma obowiązek wykorzystać wszystkie dostępne środki profilaktyczne? Nadto wskazano przegląd wybranych rozwiązań współczesnej nauki i techniki, które mogą być implementowane w celu spełnienia omawianej dyrektywy, ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań obejmujących automatyzację i robotyzację procesów.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo i higiena pracy, prawo pracy, osiągnięcia nauki i techniki

## Wprowadzenie

Ustawodawca przepisem art. 207 § 2 *Kodeksu pracy* (Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. *Kodeks pracy* – dalej k.p.) nałożył na pracodawców i przedsiębiorców niebędących pracodawcami oraz prowadzących działalność gospodarczą obowiązek ochrony zdrowia i życia zarówno pracowników, jak i osób fizycznych wykonujących pracę na innej podstawie niż stosunek pracy – poprzez zapewnienie bezpiecznych i higienicznych warunków pracy, z uwzględnieniem możliwości zastosowania osiągnięć nauki i techniki. Przywołana regulacja jest spójna z przepisami art. 15 k.p., które wskazują, że pracodawca jest obowiązany zapewnić pracownikom bezpieczne i higieniczne warunki pracy. Nadto zasadę tę konkretyzują przepisy działu 10 *Kodeksu* i wydane na ich podstawie akty

wykonawcze. Pewne wątpliwości nasuwają się przy interpretacji użytego przez ustawodawcę w art. 207 § 2 sformułowania: „(...) *przy odpowiednim wykorzystaniu osiągnięć nauki i techniki*”. Powstaje bowiem pytanie natury prawnej i technicznej, kiedy rozwiązanie można uznać za odpowiednie. Zagadnienie to ma istotne znaczenie w praktyce funkcjonowania przedsiębiorstw, szczególnie w sprawach dotyczących wypadków przy pracy. Kluczową kwestią w takich sytuacjach jest ustalenie, czy pracodawca – w określonych warunkach – zapewnił bezpieczne i higieniczne warunki pracy w sposób właściwy. Jak wskazuje T. Wyka (2002), ma to decydujący wpływ na ustalenie odpowiedzialności deliktowej pracodawcy<sup>2</sup>.

### Art. 207 § 2 k.p. – dyrektywa prawna i techniczna

Norma prawna określona art. 207 § 2 k.p. jest jednocześnie ogólną dyrektywą techniczną, wskazującą na to, że w celu zapewnienia bezpiecznych i higienicznych warunków pracy niezbędne jest stosowanie odpowiednich środków technicznych oraz sposobów wykonywania określonych czynności. Ustawodawca w przywołanym przepisie określił, że wdrożone osiągnięcia nauki i techniki powinny być „odpowiednie”. *Wielki słownik języka polskiego* wskazuje, że termin „odpowiedni” należy traktować jako „taki, jaki powinien być w danej sytuacji”, natomiast *Słownik języka polskiego PWN* jako „spełniający wymagane warunki”. Szukając szczegółowego wyjaśnienia tego sformułowania, należy odwołać się do szeregu unormowań prawnych, wiedzy technicznej oraz zasad doświadczenia życiowego. Tak szeroki i skomplikowany zakres materii sprawia, że pracodawcy mają niejednokrotnie trudność w zrozumieniu i spełnieniu tych wymagań.

Jak wynika z treści orzeczeń wydawanych przez sądy, wielokrotnie zagadnienie odpowiedniego zastosowania środków profilaktyki zagrożeń znajduje się w centrum ich zainteresowania. Z dorobku judykatury wynika, że zastosowanie środków profilaktycznych rozpatrywane powinno być nie przez aspekt ekonomiczny, ale głównie przez rodzaj i stopień zagrożenia. WSA w Bydgoszczy (2019) w sprawie o sygn. akt II SA/Bd 667/18 podkreślił, że wysoki koszt dostępnych rozwiązań technicznych nie jest podstawą do zaniechania działań na rzecz ochrony zdrowia i życia pracowników przez pracodawcę. Podkreślił również, że obowiązek dostosowania rozwiązań technicznych musi być realizowany pomimo konieczności poniesienia przez pracodawcę znacznych nakładów finansowych. W pewnych stanach pracodawca jest zobowiązany do wdrożenia wszystkich dostępnych środków organizacyjnych i technicznych w celu ochrony pracowników. Należy jednak zaznaczyć, że taki pogląd jest prawidłowy jedynie

---

<sup>2</sup> Przepis art. 283 k.p. sankcjonuje nieprzestrzeganie przepisów i zasad bhp, a regulacje art. 220 *Kodeksu karnego* (dalej k.k.) penalizują czyn sprowadzający się do narażania pracownika na bezpośrednie niebezpieczeństwo utraty życia lub ciężkiego uszczerbku na zdrowiu wskutek niedopełnienia obowiązków z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy.

w konkretnych przypadkach, ponieważ kluczowa jest nie ilość, a adekwatność podjętych działań profilaktycznych.

### Adekwatność środków ochronnych

Według E. Maniewskiej (2022) jako „odpowiednie” wykorzystanie osiągnięć nauki i techniki należy rozumieć zastosowanie najnowszych rozwiązań naukowych i technicznych w takim stopniu, na jaki pozwalają warunki (w tym także ekonomiczne), w których działa pracodawca. Z takim stanowiskiem można zgodzić się jedynie w pewnym zakresie, bowiem wymaga ono doprecyzowania. O tym, czy warunki funkcjonowania pracodawcy – ekonomiczne – mogą wpływać na zastosowane działania profilaktyczne, decyduje głównie rodzaj i natężenie zagrożenia. Prowadząc przedsiębiorstwo, należy koniecznie zapewnić w budżecie środki finansowe, które umożliwią funkcjonowanie w sposób bezpieczny dla pracowników i zgodny z przepisami prawa (WSA w Poznaniu sygn. akt II SA/Po 33/19). Jednak w przypadku pewnych zagrożeń pracodawca może stosować rozwiązania tańsze i nie musi stosować wszystkich dostępnych środków. Słusznie wskazuje E. Tkaczyk (2019), że pracodawca nie zawsze musi korzystać z najnowszych rozwiązań technicznych, choć autorka podaje, że „(...) pracodawca powinien jednak śledzić i stosować zdobycze postępu technicznego”. O tym, czy zastosowane działania profilaktyczne są odpowiednie – w rozumieniu normy art. 207 k.p. – decydować powinien poziom ryzyka związanego z zagrożeniem po wdrożeniu tych działań, czyli ocena, na ile dane środki są efektywne. Można postawić następujący wniosek, że nie ma konieczności każdorazowego stosowania w praktyce wszystkich dostępnych rozwiązań nauki i techniki bądź rozwiązań najnowszych, jeśli zastosowane środki w sposób wystarczająco efektywny minimalizują zagrożenie (Wyrok SN sygn. akt III PK 146/15). Prawdopodobieństwo pojawienia się po stronie pracownika szkody powinno intensyfikować starania zatrudniającego w sferze bhp. Jedynie dane realia mogą aktywizować nieograniczony obowiązek pracodawcy do stosowania wszelkiej zdobyczy naukowej, każdego postępu technicznego i doświadczenia życiowego dla wzmocnienia ochrony zdrowia i życia pracowników oraz innych osób wykonujących pracę w danym zakładzie pracy bez względu na koszty tych działań.

### Aktywizacja obowiązku poszukiwania i wdrażania osiągnięć nauki i techniki

Kluczowe dla określenia, czy istnieje nieograniczona konieczność poszukiwania i wdrażania dostępnych osiągnięć nauki i techniki w celu ograniczenia zagrożenia, jest określenie, czy zagrożenie w konkretnym stanie faktycznym jest podwyższone. W przypadku ustalenia, że natężenie czynnika jest podwyższone, dynamizowany staje się obowiązek pracodawcy w zakresie rozwiązań

chroniących pracowników i uzasadnione jest podwyższenie staranności w sytuacji zwiększonego ryzyka (SA w Katowicach, sygn. akt III APa 72/18). Konieczne jest zwrócenie uwagi, że identyfikując zagrożenia, należy analizować zagrożenia typowe na danym stanowisku pracy, a w każdym razie możliwe do przewidzenia, a nie zagrożenia szczególne, wyjątkowe, mogące wystąpić w sytuacjach nietypowych (SA w Warszawie, sygn. akt III APa 34/13). W wyroku SA w Lublinie (sygn. akt III APa 4/20) sąd wskazał, że pomimo braku na rynku dostępności urządzeń, które gwarantowałyby realizację procesu technologicznego w sposób niezakłócony, to na pracodawcy jako profesjonalście ciążył obowiązek eliminacji nieprawidłowości, nawet jeśli dokumentacja techniczna urządzenia nie przewidywała zsuwania się tusz z „nary” i nie wskazywała sposobu postępowania w takim przypadku (Wyrok SA w Lublinie z 8.04.2020 r., sygn. akt III APa 4/20). W analizowanym stanie istniało zwiększone zagrożenie, którego obecność dynamizowała obowiązek działania ochronnego pracodawcy, toteż powinien on poszukać odpowiednich rozwiązań technicznych, które zminimalizowałyby prawdopodobieństwo wypadku. Natomiast W. Ostaszewski (2020) wskazuje, że w sytuacji identyfikacji zagrożenia i odkrycia przełomowych możliwości zapobiegania mu, pracodawcy, nie czekając na regulacje prawne, mają obowiązek wdrożyć dostępne rozwiązania do praktyki przedsiębiorstwa. Jak słusznie podkreśla T. Wyka, treść art. 207 § 2 k.p. nie wskazuje granic obowiązku pracodawcy, bo te wyznaczane są przez osiągnięcia nauki i techniki, które w sytuacji nadmiernego zagrożenia należy wdrażać. Trzeba mieć na uwadze, że korzystanie z osiągnięć nauki i techniki nie jest celem samym w sobie, ale powinno być realizowane poprzez racjonalny wybór między osiągnięciami adekwatnymi do zagrożenia (Wyka 2002). Zalecane jest, aby pracodawca „wyprzedzał” ustawodawcę w działaniach na rzecz ochrony zdrowia i życia zatrudnionych, jeśli zidentyfikuje zwiększone zagrożenie (Wyka 2020).

Szukając odpowiedzi na pytanie, czy jeśli zagrożenie aktualnie jest na akceptowalnym poziomie, ale istnieją rozwiązania techniczne, których wdrożenie obniżyłoby poziom zagrożenia, pracodawca ma obowiązek podjąć takie działania – należy wskazać, że pracodawca nie zawsze musi wprowadzać wszystkie z możliwych rozwiązań technicznych i organizacyjnych. Stopień aktywności pracodawcy zależy m.in. od zagadnień technicznych, organizacji pracy, jej warunków i stosunków społecznych (Wyrok SN z 13.04.2000 r., sygn. akt I PKN 584/99). Gdyby uznać inaczej, czyli że nieustannie pracodawca musi wdrażać rozwiązania, które będą obniżały wszystkie zagrożenia, doszlibyśmy do kuriozalnych wniosków, np. że konieczne jest stosowanie autonomicznych robotów wszędzie tam, gdzie pracownik narażony jest (nawet przez krótki czas) na pracę w wymuszonej pozycji ciała lub monotypową – a takich wymagań nie ma. Dodatkowo, wracając do przypadku rabunku (sygn. akt I PKN 584/99), gdzie Sąd Najwyższy wskazał, że optowanie za stanowiskiem, iż pracodawca ma obowiązek zastosować wszystkie możliwe środki zabezpieczające, prowadziłoby do uznania, że w każdym sklepie sprzedawca powinien wykonywać pracę za szybą oddzielającą go od klienta,

a dodatkowo być chroniony przez wyspecjalizowaną firmę ochroniarską, co z oczywistych względów nie jest możliwe (Wyrok SN z 13.09.2016 r., sygn. akt III PK 146/15). Takie stanowisko staje się zrozumiałe, jeśli weźmie się pod uwagę, że zakres powinności pracodawcy w zakresie bhp relatywizowany jest przez prawdopodobieństwo wystąpienia czynnika powodującego szkodę, czyli przez ryzyko. Przykładowo praca w zakładzie opieki zdrowotnej w środowisku stale grążącym zarażeniem się wirusową chorobą zakaźną w postaci wirusowego zapalenia wątroby typu B zobowiązuje pracodawcę do zastosowania wszelkich dostępnych środków organizacyjnych i technicznych w celu ochrony zdrowia pracowników (personelu medycznego) przed zakażeniem. W większości wypadków wystarczające są rozwiązania efektywne, choćby możliwe było wprowadzenie innych zabezpieczeń, których skuteczność jest podobna (Wyrok SN z 13.09.2016 r., sygn. akt III PK 146/15). Centralny Instytut Ochrony Pracy (CIOP) wskazuje, że to, czy dany pracodawca w określonych warunkach wykorzystał w sposób odpowiedni osiągnięcia nauki, podlega indywidualnej ocenie właściwych organów nadzoru, np. Państwowej Inspekcji Pracy i Państwowej Inspekcji Sanitarnej lub sądu w toku postępowania sądowego (CIOP-PIB).

## Osiągnięcia nauki i techniki kształtujące bhp

Osiągnięcia wielu dyscyplin nauki mogą być z powodzeniem stosowane w celu poprawy stanu bezpieczeństwa i higieny pracy m.in. medycyny, inżynierii mechanicznej, inżynierii materiałowej i informatyki. Skutecznie funkcjonujące rozwiązania techniczne, które posiadają wysoki potencjał implementacji do sfery bezpieczeństwa i higieny pracy, to m.in. protezy sprzężone z układem nerwowym, sztuczny wzrok, elektroniczne implanty, neuroczipy, roboty, systemy sztucznej inteligencji, Internet rzeczy czy bezprzewodowe sieci sensorowe. W praktyce niewiele innowacyjnych rozwiązań technologicznych powstaje stricte w celu podniesienia poziomu bezpieczeństwa w przedsiębiorstwach. Inwestycje w bezpieczeństwo nadal są postrzegane jako zbyt mało atrakcyjne (McKinsey Global Institute 2020).

Jak wynika z analizy literatury, współczesne trendy gospodarki ukierunkowują na rozwój przedsiębiorstw oparty na procesach cyfryzacji, które wykorzystują na szeroką skalę automatyzację oraz robotyzację. Innowacje w zakresie automatyki oraz robotyki stają się powszechne i niosą ze sobą wiele korzyści nie tylko w zakresie organizacji produkcji i usług, ale również w aspekcie bezpieczeństwa pracy.

## Wpływ automatyzacji i robotyzacji na stan bezpieczeństwa

Koncentrując się na wpływie automatyzacji i robotyzacji na stan bezpieczeństwa, należy podkreślić, że innowacje w tym zakresie wskazane są do stosowania

wszędzie tam, gdzie warunki pracy są zbyt uciążliwe i niebezpieczne dla człowieka (np. pył, hałas, wysoka/niska temperatura, prace monotypowe). Z powodzeniem roboty znajdują już dziś zastosowanie w pracach monotonnych, niebezpiecznych, w trudnych warunkach, przestrzeni kosmicznej (np. tzw. łaziki marsjańskie), w sektorze obronności czy przemyśle jądrowym. Widoczne jest zapotrzebowanie na profilaktykę wypadków poprzez zastosowanie automatyzacji procesów pracy bądź ich robotyzację w sektorach takich jak budownictwo, rolnictwo, transport czy pożarnictwo. W praktyce już dziś na świecie szeroko stosowane są roboty klatkowe do obsługi ładunków, roboty współpracujące z ludźmi, roboty w pełni zintegrowane ze stołami roboczymi. Autonomiczne roboty stanowią jeden z najbardziej interesujących przykładów rozwiązań współczesnej nauki, który z powodzeniem można zastosować w celu poprawy bezpieczeństwa i higieny pracy. Dzięki imponującemu postępowi techniki w ciągu ostatnich lat dzisiejsze roboty są w stanie nie tylko wykonywać zadania, które dotąd były zasadniczo i wyłącznie wykonywane przez ludzi, ale także wchodzić w interakcje z otoczeniem. Główne cechy inteligentnych robotów to: zdobywanie autonomii za pomocą czujników lub wymiany danych z otoczeniem (wzajemne połączenia) oraz wymiany i analizy tych danych; zdolność samokształcenia na podstawie zdobytego doświadczenia i interakcji z otoczeniem (kryterium fakultatywne); przynajmniej minimalna forma fizyczna; dostosowywanie swoich zachowań i działań do otoczenia; brak funkcji życiowych w sensie biologicznym (Parlament Europejski 2017).

W literaturze naukowej szeroko porusza się kwestie robotów antropomorficznych i wpływu ich kształtu na zaufanie w ich użytkowaniu. Ucieleśnienie robota, czyli jego cechy projektowe, takie jak oczy lub mimika, mogą sprzyjać naturalnej interakcji, akceptacji i sympatii, zwłaszcza w robotyce społecznej (Fink 2012). Jednak mogą wystąpić negatywne konsekwencje projektowania antropomorficznego, ponieważ te cechy konstrukcyjne wywołują u ludzi oczekiwania dotyczące możliwości zachowania robotów (Złotowski i in. 2015). Jeśli system ma funkcje takie jak oczy, oczekujemy, że robot będzie w stanie przetwarzać wskazówki wizualne. Projekt antropomorficzny może również odnosić się do ruchów robotów lub strategii komunikacyjnych. Niedopasowanie może spowodować irytację lub znacznie odczuwalne obniżenie niezawodności w warunkach przemysłowych (Roesler i in. 2020). Zasadniczo, jeśli antropomorficzna cecha konstrukcyjna nie służy celom funkcjonalnym, nie powinna być uwzględniona.

Jednym ze standardów, który został opracowany, aby systemy interaktywne miały bardziej przyjazne i dostępne interfejsy użytkownika, jest EN ISO 9241-110. Zalecenia normy są przydatne do projektowania interakcji systemów w kontekście Przemysłu 4.0 (Fischer i in. 2017) i okazały się odpowiednim narzędziem do oceny systemów robotycznych przez użytkowników (Rosen i in. 2018). Na rys. 28.1 zaprezentowano czynniki wpływające korzystnie na stan bezpieczeństwa poprzez wdrażanie robotyzacji i automatyzacji procesów.



**Rysunek 28.1.** Przegląd potencjalnych i zamierzonych korzyści w sferze bhp wynikających z automatyzacji i robotyzacji procesów

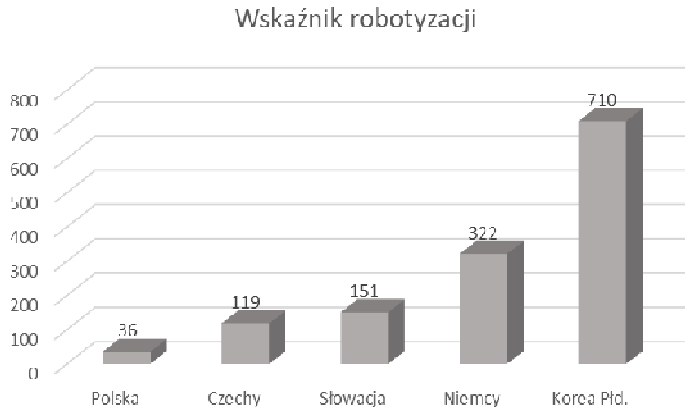
Źródło: Opracowanie własne

Należy mieć na uwadze, że postęp techniczny dotyczący autonomii robotów wyprzedził kwestie regulacji prawnych, które wymagają doprecyzowania. Aktualnie brak jest norm, instrukcji, zaleceń bezpieczeństwa dla nowych rozwiązań technologicznych, np. w zakresie współpracy człowieka z robotem, w tym ergonomii robotyki, oceny ryzyka zawodowego, psychologicznych aspektów współpracy z robotami antropomorficznymi czy technik oceny dopuszczalności, kontroli oraz eliminacji zagrożeń związanych z robotyką. Brak przetestowanych narzędzi oceny ryzyka związanego ze stosowaniem zaawansowanej robotyki, cobotów czy systemów opartych na sztucznej inteligencji do zadań automatyzacji sprawia, że będzie to kierunek rozwoju badań w najbliższej przyszłości.

## Wskaźnik robotyzacji w Polsce

Obecna tendencja do projektowania inteligentnych i autonomicznych maszyn, które można szkolić i które potrafią samodzielnie podejmować decyzje, niesie ze sobą nie tylko obietnicę korzyści gospodarczych, lecz także wiele obaw dotyczących ich bezpośredniego i pośredniego wpływu na całe społeczeństwo.

Raport opublikowany przez Międzynarodową Federację Robotyki (IFR) z 2018 roku wskazuje, że polski przemysł jest daleko za innymi państwami w aspekcie robotyzacji i odbywa się niemal bez wykorzystania robotów. Wskaźnik stosowany do określenia robotyzacji w poszczególnych krajach określony jest stosunkiem liczby robotów przypadających na 10 000 pracowników. Porównanie wskaźnika robotyzacji Polski, Niemiec, Czech, Słowacji oraz Korei Płd. zaprezentowano na rys. 28.2.



**Rysunek 28.2.** Porównanie wskaźnika robotyzacji Polski, Czech, Słowacji, Niemiec oraz Korei Płd.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych IFR

Analitycy IFR przewidują, że wraz ze wzrostem gospodarczym będzie postępował wzrost instalacji robotów na poziomie ok. 20%. Prognoza IFR pokazuje, że w 2021 roku roczna liczba robotów dostarczanych do fabryk na całym świecie osiągnie około 630 000 sztuk.

## Automatyzacja i robotyzacja jako źródło szans i zagrożeń w sferze bhp

Robotyzacja procesów pracy w aspekcie bezpieczeństwa i higieny pracy postrzegana jest jako źródło szans, ale i nowych zagrożeń dla pracowników. W wielu aspektach jest to materia nieznaną, brak jednoznacznych badań dotyczących konsekwencji współpracy człowieka z maszyną sprawia, że aktualnie znajdujemy się na etapie rewizji i konieczności przygotowania gruntu pod przyszłe zmiany. Obecnie brakuje opracowań dotyczących unormowań prawnych, wymogów, zaleceń, instrukcji, identyfikacji zagrożeń, a najszerzej ujmując, konsekwencji automatyzacji i robotyzacji na funkcjonowanie człowieka, rynku pracy i gospodarki (Rojszczak 2019, s. 5-14). Na rys. 28.3 przedstawiono przegląd możliwych zagrożeń, które mogą wynikać z wdrażania osiągnięć nauki i techniki w postaci automatyzacji i robotyzacji.

Główne zagrożenia dla pracowników można upatrywać w rosnącej złożoności procesów obsługi. Wpływ współpracy człowieka z maszynami i robotami na czynniki psychospołeczne nie jest jeszcze zidentyfikowany. Najnowsze rozwiązania często oparte są na wirtualnych systemach sterujących maszynami czy ciągami technologicznymi, co sprawia, że są one podatne na ataki cyberprzestępców. Odpowiednie zabezpieczenie systemów będzie w przyszłości kluczowym elementem zapewniającym bezpieczną pracę, ponieważ niekontrolowane ataki cyberprzestępców mogą skutkować zagrożeniami życia i zdrowia pracowników.





**Rysunek 28. 3.** Przegląd czynników zagrożenia związanych z robotyzacją i automatyzacją procesów

Źródło: Opracowanie własne

Potencjalnymi minusami tej sfery innowacyjności są zagrożenia w zakresie ochrony prywatności i danych osobowych pracowników, przesadne oczekiwania oraz rosnąca złożoność technologiczna stosowanych rozwiązań. Wraz z rozwojem robotyzacji i automatyzacji będzie następowała ewolucja rynku pracy. W sferze społecznej istnieje możliwość wykluczenia pracowników z rynku pracy i wzrostu bezrobocia. Zastosowanie robotów na szeroką skalę nie musi automatycznie spowodować wykluczenia ludzi przez roboty na stanowiskach pracy, jednak w pracach wymagających niższych kwalifikacji i dużego nakładu siły roboczej prawdopodobnie taka sytuacja będzie widoczna w większym stopniu (Pol, Reveley 2017, s. 178). Żmudne i niebezpieczne zadania zostaną zautomatyzowane, a jak przewiduje OECD w raporcie *The future of work* (2019), w wyniku automatyzacji w ciągu następnych 15-20 lat prawdopodobnie 14% istniejących miejsc pracy zniknie, a następne 32% zmieni się radykalnie, ponieważ poszczególne zadania zostaną zautomatyzowane.

## Podsumowanie

Nowoczesne technologie już dziś kształtują rynek jutra i będą miały wpływ również na stan warunków bhp. Należy doceniać inicjatywę przedsiębiorców, którzy promują kulturę bezpieczeństwa poprzez zastosowanie innowacyjnych rozwiązań nauki i techniki. W przyszłości nowe technologie mogą przyczynić się do powstania lepszych miejsc pracy pod względem komfortu, wydajności oraz bezpieczeństwa.

Należy mieć na uwadze, że osiągnięcia wielu dyscyplin nauki mogą być z powodzeniem stosowane w celu poprawy stanu bezpieczeństwa i higieny pracy

m.in. medycyny, inżynierii mechanicznej, inżynierii materiałowej czy informatyki. Wysoki potencjał implementacji do sfery bezpieczeństwa i higieny pracy mają m.in. protezy sprzężone z układem nerwowym, sztuczny wzrok, elektroniczne implanty, neuroczipy, roboty, systemy sztucznej inteligencji, Internet rzeczy czy bezprzewodowe sieci sensorowe. W praktyce niewiele innowacyjnych rozwiązań technologicznych powstaje stricte w celu podnoszenia poziomu bezpieczeństwa w przedsiębiorstwach, co powoduje, że pracodawcy mogą mieć trudności z znalezieniem odpowiednich dla nich rozwiązań technicznych (McKinsey Global Institute 2022). Pomimo tych trudności w pewnych sytuacjach, gdy zidentyfikowane jest zagrożenie na takim poziomie, że aktywizuje się konieczność minimalizacji ryzyka zawodowego, brak jest możliwości powoływania się przez pracodawcę na niezajomość współczesnych rozwiązań technicznych czy brak środków finansowych. W takich przypadkach pracodawca musi poszukiwać dostępnych rozwiązań lub nawet samodzielnie je opracować. Pracodawcy powinni z należytą starannością dobierać i stosować nowe osiągnięcia nauki i techniki, mając w szczególności na uwadze ich istotny wpływ na ograniczenie do minimum ryzyka utraty życia lub uszczerbku na zdrowiu pracowników. Kluczowe dla ustalenia, czy pracodawca podjął działania w celu należytej ochrony zdrowia i życia pracownika zatrudnionego, jest ustalenie, czy zastosowane środki profilaktyczne są adekwatne do zagrożenia w konkretnej sytuacji, a następnie ocena, czy w danym przypadku spełniono wymogi wynikające z obowiązujących norm prawnych.

## Literatura

1. CIOP-PIB, *Obowiązki pracodawcy*, [https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl/?nfb=true&\\_pageLabel=P9200371691341233784448&html\\_tresc\\_root\\_id=23223&html\\_tresc\\_id=23225&html\\_klucz=23223&html\\_klucz\\_spis=](https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl/?nfb=true&_pageLabel=P9200371691341233784448&html_tresc_root_id=23223&html_tresc_id=23225&html_klucz=23223&html_klucz_spis=) (dostęp: 06.07.2022).
2. European Agency for Safety and Health at Work (2022), *Advanced robotics and automation: Implications for occupational safety and health*, <https://osha.europa.eu/pl/publications/summary-advanced-robotics-and-automation-implications-occupational-safety-and-health> (dostęp: 03.02.2023).
3. Parlament Europejski (2017), *Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 16 lutego 2017 r. zawierające zalecenia dla Komisji w sprawie przepisów prawa cywilnego dotyczących robotyki*, [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0051\\_PL.html?redirect](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0051_PL.html?redirect) (dostęp: 04.04.2021).
4. Fink J. (2012), *Anthropomorphism and human likeness in the design of robots and human-robot interaction*, [w:] Ge S.S., Khatib O., Cabibihan J.J., Simmons R., Williams M.A. (red.), *Social Robotics*, s. 199-208, Springer.
5. Fischer H., Engler M., Sauer S. (2017), *A human-centered perspective on software quality: Acceptance criteria for work 4.0*, [w:] Marcus A., Wang W. (red.), *Design, User Experience, and Usability. Understanding Users and Contexts*, s. 570-583, Springer.
6. Maniewska E. (2022), [w:] Jaśkowski K., Maniewska E., *Komentarz aktualizowany do Kodeksu pracy*, wydanie elektroniczne LEX/el. 2022, art. 207.
7. McKinsey Global Institute, *A future that works: automation, employment, and productivity*, <http://cli.re/gnBvY5> (dostęp: 07.05.2022).

8. OECD (2019), *The future of work 2019*, <http://www.oecd.org/future-of-work/reports-and-data/more-resources.htm> (dostęp: 21.05.2020).
9. Ostaszewski W. (2020), *Bezpieczeństwo i higiena pracy w czasie pandemii*, „Praca i Zabezpieczenie Społeczne”, 5, s. 51-55.
10. Postanowienie WSA w Bydgoszczy z 23.07.2018 r., II SA/Bd 667/18, LEX nr 2529036.
11. Roesler E., Onnasch L., Majer J.I. (2020), *The effect of anthropomorphism and failure comprehensibility on human – robot trust*, „Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting”, 64, 1, s. 107-111.
12. Rojszczak M. (2019), *Wpływ robotyzacji na rynek pracy i sektor ubezpieczeń społecznych*, „Praca i Zabezpieczenie Społeczne”, 7, s. 5-14.
13. Tkaczyk E. (2019), *Bezpieczne i higieniczne warunki pracy jako prawo każdego człowieka służące ochronie życia i zdrowia ludzkiego przed szkodliwym oddziaływaniem czynników pracy*, *Studia Prawnicze i Administracyjne*”, 2, s. 39-48.
14. Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. *Kodeks pracy* (t.j. Dz.U. 2022 poz. 1510 z późn. zm.).
15. Ustawa z dnia 6 czerwca 1997 r. *Kodeks karny* (t.j. Dz. U. 2022 poz. 1138 z późn. zm.).
16. Wyka T. (2002), *Generalny obowiązek pracodawcy ochrony życia i zdrowia pracowników*, „Praca i Zabezpieczenie Społeczne”, 4, s. 21.
17. Wyka T. (2020), *Komentarz do art. 207 k.p.*, [w:] Baran K.W. (red.), *Kodeks pracy. Komentarz*, t. 2, 584 pkt 6.
18. Wyrok SA w Katowicach z 14.03.2019 r., III APa 72/18, LEX nr 2682509.
19. Wyrok SA w Warszawie z 18.02.2014 r., III APa 34/13, LEX nr 1499054.
20. Wyrok SA w Lublinie z 8.04.2020 r., III APa 4/20, LEX nr 2978529.
21. Wyrok SN z 13.09.2016 r., III PK 146/15, LEX nr 2112315.
22. Wyrok SN z 13.04.2000 r., I PKN 584/99, OSNP 2001, nr 21, poz. 636.
23. Wyrok SN z 27.01.2011 r., II PK 175/10, OSNP 2012, nr 7-8, poz. 88.
24. Wyrok WSA w Poznaniu z 15.05.2019 r., II SA/Po 33/19, LEX nr 2679087.
25. Złotowski J., Proudfoot D., Yogeewaran K., Bartneck C. (2015), *Anthropomorphism: Opportunities and challenges in human – robot interaction*, „International Journal of Social Robotics”, 7(3), s. 347-360.

## Obligation to Use Science and Technology Achievements to Ensure Safe and Hygienic Working Conditions

**Abstract:** The chapter deals with issues related to the scope of the employer’s obligation resulting from Article 207 § 2 of the Labor Code, i.e. the need to use appropriate achievements of science and technology in order to protect the health and life of employees. Based on the analysis of the sources of law, jurisprudence and current literature, considerations were made that concern the practice of all enterprises and aim to answer the following questions: how to define the appropriate level of use of science and technology in OHS practice and when the employer's obligation to seek solutions to minimize the risk is activated. In addition, an overview of selected solutions of modern science and technology that can be adapted to improve the level of security in enterprises has been indicated, with particular emphasis on solutions related to the automation and robotization of processes, their impact on occupational health and safety, both in terms of benefits and risks resulting from their application.

**Keywords:** occupational health and safety, labor law, science and technology

## Rozdział 29

# Activation of People with Disabilities with the Use of Modern IT Tools

Aleksander Szarek

III Liceum Ogólnokształcące im. dr. Wł. Biegańskiego w Częstochowie  
kierunek informatyka

**Summary:** Many people don't think about blind people's life. Often this is a topic that is not talked about in public, and visually impaired people are invisible to the public. The game was created to increase awareness and understanding of the difficulties faced by blind people. The author of the game decided to use the senses of hearing and spatial orientation to allow players to experience life without sight. The game is aimed mainly at sighted people and aims to stimulate empathy and awareness of the differences between the everyday life of blind people and our own. Using the advanced level editor, players can create their own levels, which develops their manual skills and allows them to better understand disability. The game uses the Unity 2D engine, and the C# programming language, and the proprietary scripts have been optimized to ensure smooth gameplay. Through this game, the author hopes that players will change their perception of blind people and become more sensitive to their challenges.

**Keywords:** disability, activation programming, sensory rehabilitation

## Introduction

Based on the author's idea, a game was developed where the player must move using senses such as hearing (when colliding with objects, noise is being emitted directly to the player's headphones) and orientation in space. In the event of a collision with the ground or obstacles from the headphones emitted sound. The game by pointing to other objects allows players to imagine how hard the life of a person with visual dysfunction is, because the level, which is actually very simple, becomes extremely difficult to pass without using the sense of sight. This is a reflection on people who see absolutely nothing and shows to what extent the lives of these people differ from our everyday life. The game has been additionally equipped with an advanced level editor. It allows players to build their own levels using the tools available in the game, where the biggest limitation is the player's

imagination (fig. 29.1). The game uses the Unity 2D engine (Ross, Ross 2018; Geig 2019), and the C# programming language (Chan 2015; Buonanno 2019), and the proprietary scripts have been optimized to ensure smooth gameplay. The game was created to increase awareness and understanding of the difficulties faced by blind people. Many people don't think about blind people's life. Often this is a topic that is not talked about in public, and visually impaired people are invisible to the public (Dyrektywa... 2019).

```
private void OnCollisionEnter2D(Collision2D collision)
{
    if (collision.gameObject.tag == "Ground")
        isTouchingGround = true;
    if (collision.relativeVelocity.magnitude > forceThreshold)
    {
        shake.enabled = true;
        shake.Play("");
        BounceAudio.Play();
    }
}

private void OnCollisionExit2D(Collision2D collision)
{
    if (collision.gameObject.tag == "Ground")
    {
        StartCoroutine(CheckGroundedDelay());
    }
}

IEnumerator CheckGroundedDelay()
{
    yield return new WaitForSeconds(0.5f);
    if (!Physics2D.Raycast(transform.position, Vector2.down, 0.1f))
    {
        isTouchingGround = false;
    }
}
```

**Figure 29.1.** Collision response script

Source: Own elaboration

## How the game was created

The Unity 2D engine was used to create the game, which allows its users to program the entire game in C#. The development of the game is divided into stages. The first step was to create a scene where the entire gameplay takes place.

In this scene, a player was created, given the necessary components and assigned the necessary motor skills with a simple movement script. In order to precisely move around the board, the character was given the ability to overwork and smoothly pass obstacles, and all collisions were assigned a sound signal. In order to prevent an error during the transition from block to block, Coroutine “Check-GroundedDelay” was used, where the game simultaneously set the value to True due to a collision with a new block and to False due to the exit from a collision with the previous one. The developed, original game is a multithreaded set of scripts, during the creation of which the main goal was their optimization and compatibility, designed to increase the speed and smoothness of the application. For this purpose, each of the author’s scripts has been properly configured and tested (*fig. 29.2*).



**Figure 29.2.** Game scripts

Source: Own elaboration

## Level editor

The game contains a very extensive level editor, thanks to which the player will be able to delve into newer and more complicated areas, improving his manual skills and deepening knowledge about the functioning of people with disabilities in the everyday world (*fig. 29.3*).



**Figure 29.3.** Level editor – visualization

Source: Own elaboration

## Saving level

Serialization of several lists and variables to a file is the safest method of writing, which is able to prevent deserialization of the file by people who do not know the order and security variables. A security variable is a string that contains the name of a level. This name is compared to the file name during reading, and if an error occurs, the generator will not generate a single block. This protection consists in checking the “secretKey” saved together with other lists and variables. The “secretKey” is a float variable whose value comes from many complex calculations (*fig. 29.4*).

```
int b2;
if (blocks % 2 == 0)
    b2 = blocks / 2;
else
    b2 = blocks - 5;
float secretKey = (Mathf.Sqrt(blocks * blocktype[b2-1]) - x[b2+3])/2;
string levelName = PlayerPrefs.GetString("levelName", "Unnamed");
string filePath = Application.dataPath + "/Levels/level_" + levelName + ".dat";
FileStream fileStream = new FileStream(filePath, FileMode.Create);
BinaryFormatter formatter = new BinaryFormatter();
//Zapis ustawien
formatter.Serialize(fileStream, id);
formatter.Serialize(fileStream, PlayerPrefs.GetString("levelName", "Unnamed"));
formatter.Serialize(fileStream, PlayerPrefs.GetFloat("default_bgcolor_r", 0));
formatter.Serialize(fileStream, PlayerPrefs.GetFloat("default_bgcolor_g", 0));
formatter.Serialize(fileStream, PlayerPrefs.GetFloat("default_bgcolor_b", 0));
//Zapis obiektow
formatter.Serialize(fileStream, "Official Level");
formatter.Serialize(fileStream, blocktype);
formatter.Serialize(fileStream, x);
formatter.Serialize(fileStream, y);
formatter.Serialize(fileStream, rotation);
formatter.Serialize(fileStream, secretKey);
formatter.Serialize(fileStream, colortrigger_r);
formatter.Serialize(fileStream, colortrigger_g);
formatter.Serialize(fileStream, colortrigger_b);
formatter.Serialize(fileStream, colortrigger_type);
formatter.Serialize(fileStream, colortrigger_fadetime);

fileStream.Close();
```

Figure 29.4. Level notation script

Source: Own elaboration

## Deleting objects

Deleting items required deleting items from multiple lists at once. An option has been developed to create a queue of items to delete, which runs each time blocks are added. This concept arose because in the no-queue version, the game couldn't keep up, and sometimes, when you removed blocks quickly, the game was able to loop and remove all items with an id higher than or equal to the id of



the last deleted block. This is because when you remove element 2 from a 5-element array, element 3 becomes element 2 and the array becomes 4 element. Each block has been equipped with a system of adding itself to the queue. When hovering the mouse cursor over such a block, only if the block removal tool has been selected and the right mouse button has been pressed, the element will be added to the list of items to be deleted to the “toDelete” lists in the cursor object, which is the “brain” of the entire level editor (fig. 29.5).

```
transform.localScale = new Vector3(0, 0, 0);
List<int> indicesToRemove = new List<int>();

foreach (GameObject delete in toDelete)
{
    int blockID = delete.GetComponent<Block>().BlockID;
    indicesToRemove.Add(blockID);

    blocks--;
    blocksUsedText.text = blocks + "/20000";
}
foreach (int index in indicesToRemove)
{
    blocktype[index] = -1;
}
foreach (GameObject block in toDelete)
    Destroy(block);
toDelete.Clear();
```

Figure 29.5. Deleting queue script

Source: Own elaboration

During the creation of the program, the necessary tests were performed, thanks to which the program runs smoothly and does not perform unnecessary operations. When writing the code, the principle of code optimization **Don't Repeat Yourself** in short **DRY** was used. This helped reduce the necessary lines of code and make the code clearer. In addition, all user interfaces have been optimized and properly described to personalize the game platform for each user.

## Summary

This original game contains more than 560 code lines and more than 100 unique objects (not including level objects – these are generated by generator script) which gives us a good place to help learn about blind people problems. After starting the game, the player gets information about game goal. Also, after



completing it, the goal is being displayed. I think that when the game will be released, many people will get important knowledge about problems with blindness.

## Literature

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/882 z dnia 17 kwietnia 2019 r. w sprawie wymogów dostępności produktów i usług (Dz.U. UE. L. 2019 Nr 151 poz. 70).
2. Ross E., Ross J. (2018), *Unity I C#. Podstawy programowania gier*, Wydawnictwo Helion, Gliwice.
3. Geig M. (2019), *Unity. Przewodnik projektanta gier*, Wydawnictwo Helion, Gliwice.
4. Chan J. (2015), *Learn C# in One Day and Learn It Well: C# for Beginners with Hands-On Project*, CreateSpace Independent Publishing Platform, US.
5. Buonanno E. (2019), *Programowanie funkcyjne w języku C#*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

## Aktywacja osób niepełnosprawnych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi informatycznych

**Streszczenie:** Wielu ludzi nie zastanawia się nad życiem osób niewidomych czy niedowidzących. Często jest to temat, o którym nie mówi się publicznie, a ludzie z dysfunkcją wzroku są „niewidoczni” dla społeczeństwa. Aby zwiększyć świadomość i zrozumienie trudności, z jakimi borykają się osoby niewidome, stworzono grę umożliwiającą graczom doświadczenie życia bez wzroku. Gra skierowana jest głównie do osób widzących i ma na celu pobudzenie empatii oraz uświadomienie różnic między codziennym życiem osób niewidomych, a naszym własnym. W grze zastosowano wykorzystanie zmysłów słuchu i orientacji przestrzennej, a za pomocą zaawansowanego edytora poziomów gracze mogą tworzyć własne poziomy, co rozwija ich umiejętności manualne i pozwala lepiej zrozumieć niepełnosprawność. Gra wykorzystuje silnik Unity 2D i język programowania C#, a autorskie skrypty zostały zoptymalizowane, aby zapewnić płynną rozgrywkę. Autor ma nadzieję, że poprzez tę grę gracze zmienią swoje postrzeganie osób niewidomych i nabiorą większej wrażliwości na ich potrzeby.

**Słowa kluczowe:** niepełnosprawność, programowanie aktywizacyjne, rehabilitacja sensoryczna

## Rozdział 30

# Liderem się jest, a nie bywa, czyli jakie oczekiwania wobec liderów mają osoby pracujące

Ada Żurawik, Miłosz Parczewski

Politechnika Poznańska  
Wydział Inżynierii Zarządzania

**Streszczenie:** Rozumienie pojęcia „lider” na przestrzeni lat stopniowo ulegało zmianie. Wynikało to z wielu składowych społecznych, a także uwarunkowań historycznych. Autorzy publikacji skupili się na – ich zdaniem – jednym z najważniejszych aspektów, którym jest różnica między pokoleniami. Analizując źródła wiedzy oraz przeprowadzając ankietę wśród osób aktywnych zawodowo, zdefiniowano różnice w postrzeganiu lidera przez pokolenia X, Y i Z. W celu zweryfikowania owych różnic za pomocą ankiety przebadano 115 respondentów pracujących w różnych sektorach gospodarki. Na podstawie tych badań wyznaczono cztery cechy lidera, dzięki którym można rozpoznać podejście pracowników w różnym wieku. Cechami tymi okazały się: stanowczość, umiejętność motywowania członków zespołu i pracy w zespole oraz poczucie odpowiedzialności.

**Słowa kluczowe:** lider, pokolenie X, pokolenie Y, pokolenie Z

## Wprowadzenie

„Każde pokolenie ma własny głos” (Kombii 2005). Zdanie to można odnieść do przeróżnych kwestii dotyczących życia codziennego. Jednym z wielu takich aspektów jest praca. W ciągu ostatnich 100 lat postrzeganie i formy pracy zmieniły się diametralnie. Część zawodów jest już dzisiaj uważana za wymarłą, a w ich miejsce pojawiły się nowe profesje, których powstanie wymusił dynamiczny rozwój technologii na świecie. Mimo to nie można zapominać o istotnej roli umiejętności miękkich i czynnika ludzkiego w świecie przepelnionym technologią. Są to składowe, które w sposób znaczący wpływają na optymalizację i rozwój technologii. Dlaczego? Ponieważ zazwyczaj ludzie pracują w zespołach projektowych, które wymagają od nich ciągłego kontaktu, zrozumienia, a czasem nawet wypracowania kompromisu w kontekście dalszych poczynań. W tym procesie osobą najważniejszą jest lider. W zależności od roku urodzenia człowiek inaczej postrzega świat i ma inną perspektywę na sytuację, dlatego też podczas zmian pokoleniowych w środowisku pracy może pojawić się trochę kontrowersji

i sporów. Jest to spowodowane zróżnicowaniem stylu pracy, ale także oczekiwań pracowników wobec pracodawców i przełożonych. Jednak czy pokolenie, do którego należy pracownik, ma wpływ na postrzeganie lidera i stawiane mu wymagania?

## Jak interpretować pojęcie „lidera”?

Lider to ważna osoba w zespole. Zdaniem A. Marciszewskiej (2013) jest on utożsamiany z kierownikiem projektu, co oznacza to, że w swoim zespole obejmuje stanowiska menedżerskie bądź kierownicze<sup>3</sup>. Taką samą opinię wyraża P. Kopacka (2015), która dodatkowo bardzo szczegółowo i trafnie opisuje, jaki powinien być lider. Zwraca uwagę na „wysyłanie pozytywnej energii pracownikom”, m.in. poprzez optymizm w rozpoczynaniu działań czy nagradzanie za cele już osiągnięte. Inne podejście reprezentują studenci Politechniki Poznańskiej, autorzy artykułu pt. *Postrzeganie pojęcia lidera na przykładzie wybranej grupy uczniów i studentów*. Według nich lider nie musi obejmować stanowisk kierowniczych, ponieważ jest osobą, która naturalnie wyróżnia się z całego zespołu i motywuje resztę współpracowników do aktywnego działania prowadzącego do osiągnięcia sukcesu (Żurawik i in. 2022). Na zróżnicowanie w definiowaniu słowa „lider” zwracają uwagę K. Dziekoński i A. Jurczyk (2013), którzy twierdzą, że jest to dowodem na istotność zagadnienia. Z czego mogą wynikać te różnice? Przyczyn może być wiele, np. branża, w jakiej dane osoby pracują, a nawet rozbieżności pomiędzy różnymi działami w tej samej firmie. Inne postrzeganie będą mieli pracownicy działu Human Resources, a inne osoby z działu zajmującego się twardą produkcją. Należy jednak zwrócić uwagę na jeszcze jeden bardzo ważny aspekt, który może tłumaczyć mnogość rozbieżnych definicji. Jest nim aspekt pokoleniowy. Postrzeganie świata, a zatem również roli lidera w zespole, może być zgoła odmienne w zależności od roku urodzenia i wychowania w danej grupie pokoleniowej. Ważne jest więc, by osoba zarządzająca zwróciła uwagę na różnice wiekowe grupy pracowników i potrafiła dostosować swój sposób zarządzania tak, by każdy czuł się swobodnie, ale przede wszystkim zrozumiał oczekiwania przełożonego. Dzięki komunikacji dostosowanej do potrzeb drugiego człowieka praca będzie przebiegała płynniej, a także nie będzie sytuacji konfliktowych wynikających z niedopowiedzeń czy też nieporozumień.

## Charakterystyka analizowanych grup pokoleniowych

Aktualnie na rynku pracy możemy wyróżnić 4 pokolenia, urodzone w różnych okresach: pokolenie Baby Boomers, pokolenie X, pokolenie Y i pokolenie Z.

---

<sup>3</sup> Kierownik to osoba kierująca działaniami innych ludzi w ramach ustalonej struktury danej organizacji. Natomiast menedżer to osoba zatrudniona na stanowisku kierowniczym, posiadająca szeroką wiedzę i umiejętności z zakresu kierowania ludźmi oraz zarządzania organizacjami w warunkach niepewnych, przy stałej zmienności otoczenia, w którym te organizacje działają (Penc 1997).

Ekspertki wskazują wprowadzić na kolejną grupę wiekową, tzw. pokolenie Alpha, jednak nie jest to jeszcze grupa aktywna zawodowo<sup>4</sup>. Jak tłumaczy M. Gruchola (2014), są to dzieci urodzone po 2010 roku, które określa się również mianem Google Kids. W związku z tym, że są to dzieci i nie dysponują jeszcze doświadczeniem zawodowym, nie są uwzględnione w rozważaniach na temat postrzegania lidera. Ze względu na małą liczebność grupy badawczej osób z pokolenia Baby Boomers<sup>5</sup> (2 osoby), również one nie były brane pod uwagę w dalszej części rozdziału. Należy przy tym zaznaczyć, że przedziały czasowe rodzenia się analizowanych pokoleń zostały zaczerpnięte z artykułu M. Rojewskiej (2023).

**Tabela 30.1. Zestawienie pokoleń aktywnych na rynku pracy**

Pokolenie	Charakterystyka
Pokolenie X (1965-1979)	Wysokie predyspozycje do uczenia się Umiejętność dostosowania się do pracy (wykonywanie pracy bez względu na to, czy odpowiada ona oczekiwaniom i doświadczeniu)
Pokolenie Y (1980-1994)	Wysoki poziom oczekiwań względem pracodawców w kontekście płac i rozwoju Życie prywatne jest dla nich ważniejsze niż sukces zawodowy
Pokolenie Z (1995-2010)	Trudności w porozumiewaniu się z osobami ze starszych pokoleń Istotna jest niezależność finansowa, więc praca jest postrzegana przez pryzmat pieniędzy

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Gruchola 2014; Baran, Kłos 2014; Kroenke 2015; Waško 2016; Rojewska 2023)

Celem autorów była weryfikacja, czy teoretyczne założenia pokrywają się także z wynikami przeprowadzonych przez nich badań.

## Założenia badawcze

Celem przeprowadzonej ankiety było zbadanie, jakie oczekiwania wobec lidera mają przedstawiciele pokoleń X, Y, Z. Analizie poddano 115 osób – 28 osób z pokolenia X, 48 reprezentantów pokolenia Y i 39 przedstawicieli najmłodszego pokolenia Z. Respondentów poproszono o określenie za pomocą skali od 1 do 6, jak ważna jest dla nich konkretna cecha u lidera. Wśród cech znalazły się m.in. poczucie odpowiedzialności, stanowczość, wyrozumiałość i umiejętność pracy w zespole. Autorzy publikacji przyjęli założenie, że istnieje zależność statystyczna między pokoleniem, w którym urodziła się osoba badana, a określeniem ważności cechy u lidera.

<sup>4</sup> Aktywna zawodowo jest każda osoba zarówno pracująca, jak i bezrobotna poszukująca pracy lub zainteresowana jej podjęciem.

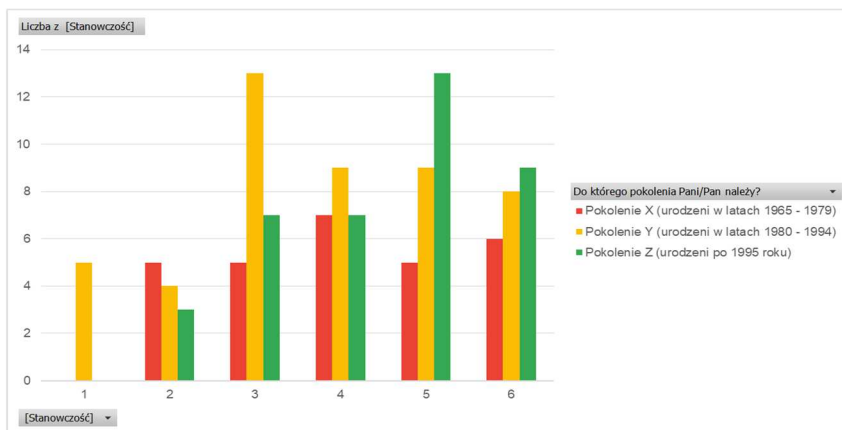
<sup>5</sup> Pokolenie ludzi urodzonych w latach 1946-1964, stopniowo odchodzących z rynku pracy (Rojewska 2023).

## Analiza wyników badań

Za pomocą ankiety internetowej autorzy przeprowadzili badanie wśród osób aktywnych zawodowo z pokoleń X, Y i Z. Zgodnie z odpowiedziami respondentów zostały wybrane cztery kluczowe cechy przedstawione w poniższej analizie.

### Stanowczość

Czym jest „stanowczość”? W *Słowniku języka polskiego PWN* znajduje się stwierdzenie, że osoba stanowcza to taka, która potrafi powziąć kategorię decyzyjną. Jest to jednak dość wąska definicja, którą zdaniem autorów warto rozszerzyć o dodatkowy aspekt, jakim jest konsekwencja w podejmowaniu decyzji i podporządkowywanie się własnym wymaganiom. Biorąc pod uwagę całokształt pojęcia, można przyjąć, że z całą pewnością jest to cecha, która jest ważna u liderów. Jednak czy jest ona kluczowa? Takie pytanie zostało postawione przez autorów grupie osób aktywnych zawodowo z różnych pokoleń. Ich odpowiedzi zostały przedstawione na rys. 30.1.



**Rysunek 30.1.** Zależność między pokoleniem, do którego przynależy pracownik, a postrzeganiem stanowczości u lidera

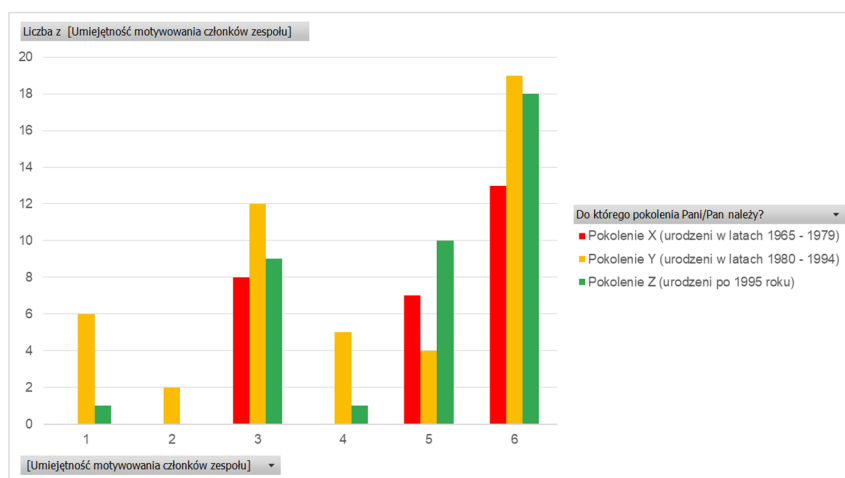
Źródło: Opracowanie własne

Przedstawiciele pokoleń, odpowiadając na pytanie, jak ważna jest stanowczość u lidera, wybierali bardzo różne odpowiedzi. Można jednak zauważyć, że pokolenie Z w większości zaznaczyło wagę 5 i 6. Średnia zaznaczanych przez nich odpowiedzi jest dość wysoka, wynosi 4,47. Co ciekawe, pokolenie Y miało średnią aż o 0,7 niższą, wynoszącą 3,77. Pokolenie X znalazło się pośrodku obu pokoleń. Jest to także zauważalne na wykresie, ponieważ liczba zaznaczeń w sali jest dość równa. Odpowiedzi od 2 do 6 zaznaczyło od 5 do 7 osób. Co ciekawe, nikt z pokolenia X ani z pokolenia Z nie zaznaczył odpowiedzi 1. Tę odpowiedź zaznaczyło 5 badanych z pokolenia Y.

Wyniki mogą być dość zaskakujące, ponieważ najmłodsze pokolenie (Z) oczekuje największej stanowczości od lidera. Patrząc z perspektywy opinii publicznej oraz ekspertów, pokolenie Z zna swoją wartość i – mimo niewielkiego doświadczenia – stawia potencjalnym pracodawcom warunki. Tym bardziej zaskakujące są ich odpowiedzi w ankiecie. Wyniki badania nie odbiegają od normy w odpowiedziach pokolenia Y. Pokolenie Y stawia na życie i praca jest dla nich tylko elementem umożliwiającym korzystanie z życia pełnymi garściami, dlatego też wyniki badań zgadzałyby się z ogólną wiedzą na ich temat. Nie potrzebują aż takiej stanowczości od lidera, ponieważ praca nie jest dla nich najważniejsza. Jest tylko narzędziem do spełniania marzeń, więc wykonują minimum, które jest niezbędne. Jeśli zaś chodzi o najstarsze pokolenie z badania, to jego przedstawiciele cenią sobie stabilizację, a stanowczość, definiowana również jako konsekwencja, może być jej częścią.

## Umiejętność motywowania członków zespołu

Kolejną cechą analizowaną przez autorów publikacji była umiejętność motywowania członków zespołu. Lider jest „silnikiem” całego zespołu, co oznacza, że jeśli on sam nie rozpocznie prac projektowych i nie nada im odpowiedniego tempa, to reszta zespołu również nie będzie sprawnie pracować. Motywowanie można zdefiniować jako skłanianie i zachęcanie kogoś do określonych działań. Narzędzi motywacji jest wiele i każdy człowiek reaguje na inne bodźce, które napędzają go do pracy. Często też motywacja uwarunkowana jest wiekiem człowieka oraz jego sytuacją ekonomiczną w danym momencie. Autorzy koncentrują się jednak na czynnikach motywujących charakterystycznych dla określonego pokolenia pracowników.



**Rysunek 30.2.** Zależność między pokoleniem, do którego przynależy pracownik, a postrzeganiem wyrozumiałości u lidera

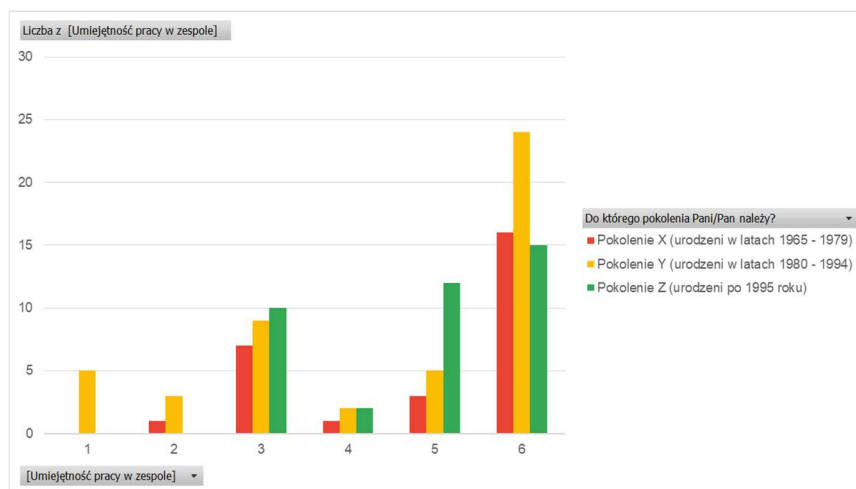
Źródło: Opracowanie własne

Wyniki zaprezentowane na *rys. 30.2* obrazują, jak ważną cechą zdaniem respondentów jest wyrozumiałość. Z całą pewnością pierwszym elementem, który zwraca uwagę, jest liczba odpowiedzi „6” świadcząca o bardzo dużej istotności tej cechy zdaniem respondentów. Interesujące wydaje się to, że na drugiej pozycji pod względem liczby zaznaczonych odpowiedzi jest „3”, świadcząca o mniejszej ważności tej cechy u liderów. Analizując średnie odpowiedzi pokoleń X i Z, można zauważyć, że wynosiły one odpowiednio 4,14 i 4,46, podczas gdy dla pokolenia Y średnia wynosiła zaledwie 3,94. Najmłodszy respondenci, jako najmniej doświadczeni, oczekują od lidera największej wyrozumiałości. Warto zwrócić także uwagę, że przedstawiciele pokolenia Y zaznaczyli wszystkie odpowiedzi, pokolenie Z wszystkie poza „2”, a badani z najstarszego (branego pod uwagę w publikacji) pokolenia X wybierali zaledwie trzy odpowiedzi: „3”, „5” i „6”.

Czym mogą być spowodowane takie rozbieżności? Na to pytanie nie można znaleźć jednoznacznej odpowiedzi. Zdaniem autorów publikacji kluczową rolę może odgrywać obejmowane stanowisko lub sektor, w którym pracują respondenci. Trudno sobie wyobrazić, żeby dużą wyrozumiałością kierował się lider ratowników medycznych, od których pracy niejednokrotnie zależy ludzkie życie. Są jednak takie branże, gdzie kilkudniowe opóźnienie i dopracowanie projektu jest dużo bardziej optymalne i korzystne aniżeli oddawanie niekompletnej realizacji, która może zaburzyć pozytywny obraz firmy. Dodatkowo warto zwrócić uwagę także na średnie dla pokolenia X i Z. To pierwsze ma największe doświadczenie w pracy, jest więc świadome, że nie zawsze można wszystko zrealizować zgodnie z planem. Prawdopodobnie z tego wynika średnia 4,16. Natomiast większa potrzeba wyrozumiałości u przedstawicieli pokolenia Z może wynikać z ich braku doświadczenia w pracy i niepewności w stosunku do własnych umiejętności.

## Umiejętność pracy w zespole

Umiejętność pracy w zespole to uniwersalna cecha przydatna nie tylko podczas wykonywania obowiązków zawodowych, ale również w życiu codziennym. Kluczowym słowem jest tutaj „zespół”, którego nie można stosować zamiennie z terminem „grupa”. Grupa to pewna zbiorowość ludzi, którzy znajdują się w jednym miejscu lub wykonują w danym momencie tę samą czynność. Czym się różni od zespołu? Według definicji K. Kmiołek zespół to „zbiór osób, które posiadają wspólny, konkretny cel działania i wzajemnie uzupełniające się umiejętności” (Kmiołek, Piecuch 2012). Z definicji tej można wnioskować, że umiejętność pracy w zespole jest niezbędną cechą prawdziwego lidera. Niezależnie od zespołu i charakteru osoba ta jest wręcz zmuszona wyrobić w sobie tę umiejętność, aby działać efektywnie we współpracy z innymi pracownikami.



**Rysunek 30.3.** Zależność między pokoleniem, do którego przynależy pracownik, a postrzeganiem umiejętności pracy w zespole u lidera

Źródło: Opracowanie własne

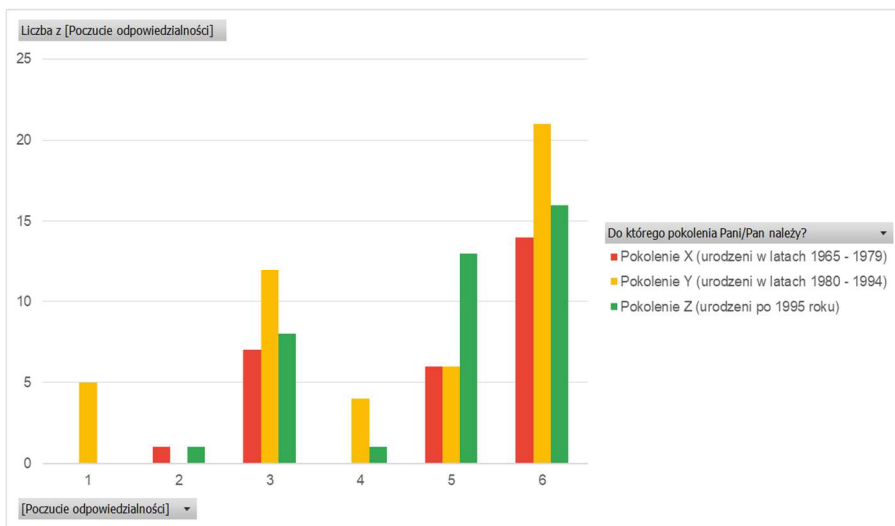
Odnosząc się do postrzegania umiejętności pracy w zespole, od samego początku zauważalna jest przewaga liczby zaznaczonych odpowiedzi 6. Taką odpowiedź zaznaczyło niemal 48% badanych. Dodatkowym aspektem, który warto podkreślić, jest fakt, że jedynie przedstawiciele pokolenia Y zaznaczyli ważność umiejętności pracy w zespole na 1, co spowodowało, że średnia ich odpowiedzi wynosi niecałe 4,5, podczas gdy odpowiedzi pokolenia X i Z oscylowały w granicach 4,8 i 4,9. Odpowiedzi respondentów zaznaczających ważność pracy zespołowej na 1 lub 2 są bardzo zaskakujące. Jak lider może prowadzić zespół bez umiejętności pracy w zespole? Zdaniem autorów rozdziału kompetencja ta jest niezbędna, by prowadzić zespół w sposób odpowiedzialny i umiętny. Dodatkowo warto zwrócić uwagę na to, że w przedsiębiorstwach pracują osoby w różnym wieku i istotne jest, by wszyscy członkowie byli zaangażowani, a jednocześnie czuli się dobrze w swoim towarzystwie. W związku z tym bardzo ważne jest zaplanowanie pracy w taki sposób, by przedstawiciele różnych pokoleń mogli ze sobą współpracować i wzajemnie się uzupełniać. Dzięki temu w zespole nastąpi naturalny przepływ wiedzy między współpracownikami, a dodatkowo grupa jako jednostka będzie miała szerszą perspektywę. Każde pokolenie zwróci uwagę na inne aspekty, co będzie pozwalało na całościowy ogląd sytuacji i kompleksową pracę nad wszystkimi zagadnieniami niezbędnymi do realizacji zadania.

## Poczucie odpowiedzialności

Poczucie odpowiedzialności to ostatnia cecha rozpatrywana przez autorów tego rozdziału. Fraza ta również składa się z dwóch elementów, które należy najpierw zrozumieć osobno, aby pojąć dokładny sens całości. Termin „poczucie”



to zdawanie sobie sprawy z pewnych faktów i zjawisk zachodzących w otaczającym świecie. Jest to również stan człowieka, który wyraźnie uświadamia sobie jakieś własne doznania, fakty dotyczące świata zewnętrznego lub zasady, zgodnie z którymi się zachowują. Rozpatrując termin „odpowiedzialność”, autorzy brali pod uwagę dwie definicje. Jedna dotyczyła prawnego postrzegania tego aspektu, zaś druga opisywała odpowiedzialność jako cechę charakteru. Pierwsza z definicji mówi, że odpowiedzialność to obowiązek moralny lub prawny odpowiadania za swoje lub czyjeś czyny. Inna definicja odpowiedzialności zwraca uwagę na to, że osoba, posiadająca dobrze rozwiniętą tę cechę, jest obowiązkowa i zdolna do ponoszenia konsekwencji za swoje postępowanie, co idealnie pasuje do obrazu lidera, jaki przedstawili autorzy w teoretycznej części pracy.



**Rysunek 30.4.** Zależność między pokoleniem, do którego przynależy pracownik, a postrzeganiem poczucia odpowiedzialności u lidera

Źródło: Opracowanie własne

Graficzna analiza danych przedstawiona na *rys. 30.4* pozwala zauważyć przewagę odpowiedzi 5 oraz 6. Zdaniem 66% ankietowanych poczucie odpowiedzialności jest bardzo ważną cechą u lidera. Największe różnice zauważono w odpowiedziach pokolenia Y, w którym 5 przedstawicieli zaznaczyło, że poczucie odpowiedzialności jest nieistotne, wybierając opcję 1. Interesujące jest to, że średnia odpowiedzi w pokoleniu Y wynosiła 4,47, podczas gdy pozostałe pokolenia miały bardzo zbliżone średnie wynoszące 4,89 (pokolenie X) i 4,90 (pokolenie Z).

Można się zastanawiać, dlaczego ponownie pokolenie Y odpowiadało w tak zróżnicowany sposób. Być może jest to spowodowane niezbyt wysokim poczuciem odpowiedzialności u jego przedstawicieli. Jeśli nie będą czuli się zmotywowani, są zdolni z dnia na dzień rzucić pracę, nie czując odpowiedzialności,

a skupiając się wyłącznie na własnych potrzebach. Jeśli chodzi o pozostałe dwa pokolenia, to najstarsze z nich jest zdecydowanie najbardziej doświadczone. Często sami stają się liderami, zakładając własne firmy lub zajmując stanowiska kierownicze, i wspierają najmłodsze pokolenie Z. To pokolenie jest dopiero na początku swojej kariery, więc potrzebuje, by liderzy wspierali ich w wykonywaniu zadań. W związku z tym, że ich doświadczenie jest jeszcze dość ubogie, z całą pewnością będą czuły się pewniej, gdy to przełożony będzie miał na sobie większą odpowiedzialność, co też może tłumaczyć wyniki ankiety.

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy można zauważyć, że pokoleniowość ma wpływ na oczekiwania wobec lidera, nie jest to jednak kluczowa kwestia. Każde z pokoleń odpowiadało zgodnie z własnymi potrzebami, bazując na różnych doświadczeniach. W związku z tym zauważalne są dość znaczące rozbieżności. Podsumowując jednak wyniki wszystkich przeprowadzonych analiz, można zauważyć, że największe oczekiwania są stawiane liderowi w kwestii umiejętności pracy w zespole i poczuciu odpowiedzialności. Najmniej ważną cechą zdaniem respondentów okazała się wyrozumiałość. Dodatkowo warto wspomnieć, że największe rozbieżności w udzielanych odpowiedziach zanotowano w pokoleniu Y.

## Podsumowanie

Dzięki przeprowadzonemu badaniu możliwa była analiza postrzegania lidera przez reprezentantów trzech pokoleń X, Y i Z. Przyglądając się zarówno teorii, jak i części praktycznej opartej na przeprowadzonym badaniu na 115-osobowej grupie, można zauważyć, że nie wszystkie wybory respondentów są wytłumaczalne naukowo. Jest to oczywiste, gdyż mimo pewnych ram i badań każdy człowiek inaczej postrzega świat, bazując na własnych doświadczeniach i wartościach. Warto także pamiętać, że każdy z respondentów może w inny sposób rozumieć pojęcie „lidera”, ponieważ może on pełnić różne role w zespole, np. sam może być kierownikiem projektu. Innym razem mianem „lidera” określa się osobę, która wyłania się w sposób naturalny – swoim nastawieniem i charyzmą powoduje, że zespół automatycznie traktuje go jako przywódcę.

Biorąc zatem pod uwagę całość badań, można jednoznacznie potwierdzić, że nie wszyscy pracownicy postrzegają lidera w jednakowy sposób. Różnice w oczekiwaniach pojawiają się nie tylko na poziomie całej firmy, ale już na poziomie zespołu, zwłaszcza jeśli tworzą go członkowie reprezentujący różne pokolenia. W tym aspekcie przydatne może okazać się przeprowadzone badanie, ponieważ dzięki analizie i poznaniu zdania przedstawicieli różnych pokoleń lider, choć częściowo, może dostosować swoje podejście do oczekiwań pracowników. Jeśli będzie on znał potrzeby osób, którymi zarządza, i elastycznie podchodził do

zarządzania zespołem, będzie w stanie maksymalnie wspierać współpracowników, co w konsekwencji przełoży się na większą efektywność całego zespołu. Tym samym można stwierdzić, że analiza uzyskanych wyników badań może pomóc liderom w kierowaniu zespołem zróżnicowanym pokoleniowo.

## Literatura

1. Baran M., Kłos M. (2014), *Pokolenie Y – prawdy i mity w kontekście zarządzania pokoleniami*, „Marketing i Rynek”, 5, s. 923-929.
2. Dziekoński K., Jurczyk A. (2013), *Kompetencje osobowościowe lidera projektu*, „Przedsiębiorczość i Zarządzanie”, 14, 11/1, s. 37-49.
3. Grafton Recruitment (2022), *Pokolenia na polskim rynku pracy*, <https://www.grafton.pl/pl/pokolenia-na-polskim-ryнку-pracy> (dostęp: 03.04.2023r.).
4. Gruchola M. (2014), *Od Pokolenia X do Pokolenia Alpha – wartości mediów*, [w:] Hofman I., Kępa-Figura D. (red.), *Współczesne media: wartości w mediach, wartości mediów*, 2, s. 31-48, Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin.
5. Kmiotek K., Piecuch T. (2012), *Zachowania organizacyjne. Teoria i przykłady*, Difin, Warszawa.
6. Kombii (2005), *Pokolenie*, Universal Music Polska.
7. Kopacka P. (2015), *Rola lidera w efektywnym zarządzaniu zespołem projektowym*, [w:] Rogozińska-Pawelczyk A. (red.), *Gospodarowanie kapitałem ludzkim*, s. 129-142, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
8. Kroenke A. (2015), *Pokolenie X, Y, Z w organizacji*, „Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Łódzka”, 61, s. 91-104.
9. Marciszewska A. (2013), *Liderzy zespołów projektowych w organizacjach non-profit*, „Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Bankowej we Wrocławiu”, 4(36), s. 171-182.
10. Penc J. (1997), *Leksykon biznesu*, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa.
11. Rojewska M. (2023), *Milenałsi, pokolenie Z, Y, X, generacja baby boomers – kto to?*, <https://interviewme.pl/blog/pokolenie-z> (dostęp: 02.04.2023).
12. *Słownik języka polskiego PWN*, <https://sjp.pwn.pl> (dostęp: 10.04.2023).
13. Szymczyk J. (2022), *Pokolenie X na rynku pracy – charakterystyka*, <https://poradnikprzedsiębiorcy.pl/-pokolenia-w-pracy-pokolenie-x> (dostęp: 13.04.2023).
14. Śliwińska J. (2023), *Wybrzydzą, bo mogą. Pokolenie Z rządzi na rynku*, <https://www.gazetaprawna.pl/magazyn-na-weekend/artykuly/8652471.pokolenie-z-rynek-pracy-za-trudnienie-warunki.html> (dostęp: 12.04.2023).
15. Świerkosz-Hołyś M. (2016), *Pokolenie Z wkracza na rynek pracy*, „Społeczeństwo i Edukacja. Międzynarodowe Studia Humanistyczne”, 2(21), s. 439-447.
16. Waško R. (2016), *Wybrane aspekty różnicujące pokolenie X, Y i Z w kontekście użytkownika nowych technik i Internetu*, [w:] Rykiel Z., Kinal J. (red.), *Socjologia codzienności jako niebanalności*, s. 136-153, Stowarzyszenie Naukowe Przestrzeń Społeczna i Środowisko, Rzeszów.
17. *Wielki słownik języka polskiego*, <https://wsjp.pl> (dostęp: 10.04.2023).
18. Woliński B. (2016), *Koncepcja „Industry 4.0” jako strategia reindustrializacji i wdrożenia procesów produkcyjnych kolejnej generacji*, „Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach”, 308, s. 173-179.
19. Żurawik A., Pietrzak K., Janaczyk B., Parczewski M. (2022), *Postrzeganie pojęcia lidera na przykładzie wybranej grupy uczniów i studentów*, [w:] Wójtowicz Ł. (red.), *Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI w. Aspekty społeczne*, Fundacja Innowacji i Nowoczesnych Technologii, Lublin.

## Acting Like a Leader, Not Just Being a Leader – Employees Expectations on Leaders

**Abstract:** The perception of the leader's definition has been gradually changing over the years. It was due to many social factors and historical conditions. The authors of the chapter focused on one of the most important aspect in their opinion, which is the difference between generations. By analyzing knowledge sources and conducting a survey among working people, they defined differences in the perception of a leader for generations X, Y and Z. In order to verify these differences, 115 respondents working in different economic sectors were surveyed. Based on this research, four qualities of a leaders were identified to recognize the approach of employees of different ages. These traits turned out to be firmness, the ability to motivate team members, team work and a sense of responsibility.

**Keywords:** leader, generation X, generation Y, generation Z

## Rozdział 31

# Pojęcie „zmiany organizacyjnej” a turbulentne otoczenie przedsiębiorstwa

Marek Walczyński

Politechnika Poznańska  
Wydział Inżynierii Zarządzania

**Streszczenie:** Pojęcie „zmiany organizacyjnej” jest obecnie (2023 r.) bardzo popularnym tematem ze względu na dynamiczne i turbulentne otoczenie społeczno-gospodarcze. W rozdziale zaprezentowano definicje zmiany organizacyjnej. Dokonano charakterystyki otoczenia z perspektywy pandemii COVID-19 i obecnego kryzysu gospodarczego. Scharakteryzowano miejsce pracownika w turbulentnym otoczeniu i jego rolę we wdrażaniu zmiany. Przedstawiono zjawiska towarzyszące zmianie organizacyjnej. Przeprowadzono badanie dotyczące zmiany organizacyjnej, które skierowano do kadry kierowniczej z kilkunastu branż. Uzyskano 111 odpowiedzi obejmujących: rozumienie pojęcia „zmiany organizacyjnej”, najważniejsze czynniki wewnętrzne i zewnętrzne decydujące o konieczności wprowadzania zmian oraz wpływ pandemii i obecnego kryzysu na wdrażanie zmian i nastawienie pracowników do zmiany w organizacji.

**Słowa kluczowe:** niepewność, turbulencja, zmiana organizacyjna

## Wprowadzenie

Przedsiębiorstwa funkcjonują w otoczeniu zewnętrznym, które determinuje podejmowanie decyzji z zakresu zarządzania przedsiębiorstwem. Otoczenie stwarza nie tylko szanse i możliwości, ale też wymogi i ograniczenia, w tym różnorodne zagrożenia (Kowalczyk 2015, s. 38). Jednak przedsiębiorstwa mają wpływ bezpośredni lub pośredni na otoczenie, w którym funkcjonują, a które staje się coraz bardziej złożone i ulega ciągłym zmianom (Miciuła 2013, s. 174-175). W ostatnich latach gospodarka doświadczyła ogromnych zmian wywołanych pandemią COVID-19 i jej skutkami (ograniczone zaopatrzenie, wzrost cen produktów). Z kolei od zeszłego roku świat wciąż mierzy się z poważnym kryzysem geopolitycznym w Europie Wschodniej.

Obecnie przedsiębiorstwa funkcjonują pod ciągłą presją zmian, dostosowują się do nowych sytuacji i redukcji niepewności, przede wszystkim w kulturze organizacyjnej i złożoności zjawisk, które stwarzają zarówno szanse, jak i zagrożenia. Dynamika zmian znacznie utrudnia, a nawet uniemożliwia przyjmowanie planów długookresowych i przewidywania sytuacji w gospodarce. Charakter zmian i ich złożoność stawia przed zarządzaniem zmianą nowe wyzwania. Oznacza to również zmianę podejścia we wdrażaniu zmian.

## Definicja zmiany organizacyjnej

Szeroką definicję zmiany organizacyjnej przedstawił W. Walczak, określając ją jako zintegrowany oraz przemyślany proces wdrażania nowych rozwiązań organizacyjnych, technologicznych i kulturowych, mających na celu lepsze wykorzystanie aktywów materialnych i cennych zasobów niematerialnych oraz prowadzących do poprawy sprawności zarządzania, efektywności gospodarowania majątkiem, podniesienia konkurencyjności rynkowej (Walczak 2009, s. 72).

Najbardziej obszerną definicję o charakterze holistycznym zaproponowała K. Grzybowska. Zidentyfikowała ona zmianę organizacyjną jako różnicę między jednym stanem w czasie ( $t_1$ ) a innym stanem w czasie ( $t_2$ ) w zarządzaniu, procesach biznesowych i obszarze społecznym przedsiębiorstwa, bez wskazania na jej potencjalne i realne skutki. Zmiana stanowi wynik działania, często mającego postać procesu, może być wywołana bodźcami wewnętrznymi bądź zewnętrznymi i dotyczyć dowolnego obszaru przedsiębiorstwa. Może tworzyć nowy stan o potencjalnie zwiększonym ładzie i lepszym zorganizowaniu, kształtując nowy paradygmat działania (Grzybowska 2010, s. 9-10).

Jak można zauważyć, nie istnieje jedna, powszechna i uniwersalna definicja zmiany. Jednakże w wyżej przytoczonych definicjach można wyodrębnić kilka wspólnych elementów: 1) zmiana wiąże się z przeorganizowaniem struktury i/lub procesów w organizacji; 2) jest celowa; 3) odbywa się w określonym przedziale czasu. Po przeprowadzeniu zmiany nie ma możliwości powrotu do stanu sprzed jej wprowadzenia. Organizacja funkcjonuje już w inny sposób. Efektem zmiany powinien być rozkwit i wzrost organizacji oraz wzrost jej konkurencyjności. Zmiana stanowi fundament dla rozwoju i jest nieuchronna. Przedsiębiorstwa w coraz większym stopniu objęte są zmianami, które są widoczne w ich funkcjonowaniu. Najczęściej pojęcie „zmiany w organizacji” łączy się z pojęciami: „restrukturyzacja”, „reorganizacja”, „zmiana kierunków działalności”, „reengineering”, „nowe technologie” czy „łączenie i przejmowanie przedsiębiorstw”.

## Dynamika zmian w otoczeniu gospodarczym

W ostatnich trzech latach (2020-2023) zarówno krajowe, jak i światowe gospodarki musiały zmierzyć się z pandemią COVID-19 i jej skutkami.

Zaburzony został pewien stan równowagi w dotychczasowej ekonomii i systemie gospodarczym. Ograniczenie dostępności zasobów w szybkim tempie przełożyło się na ograniczenie, a nawet wstrzymanie produkcji dóbr. Wynikało to z silnych powiązań między organizacjami i ich wzajemnej relacji. Przedsiębiorstwa nie posiadały kontrahentów „awaryjnych” na wypadek ww. okoliczności. Dodatkowo utrzymywanie dotychczasowego poziomu produkcji przy gwałtownym spadku popytu spowodowało szybkie wypełnienie magazynów nadmiernymi zapasami (Dąbrowska, Dożyńska, Hryniewicka 2020, s. 77-78).

Gwałtownej zmianie uległ popyt konsumentów oraz model świadczenia pracy. Pojawiła się praca zdalna, określana jako praca wykonywana z dowolnej odległości od miejsca, w którym oczekuje się na jej efekty lub gdzie byłaby wykonywana w ramach tradycyjnego systemu zatrudnienia, przy użyciu dostępnych technik, narzędzi informatycznych i telekomunikacyjnych. Pracownik tę samą pracę, którą wykonywał w biurze, mógł bez problemu wykonywać w domu czy w innym wygodnym dla niego miejscu (Zalega 2002, s. 41; Trziszka 2017, s. 216-219).

Obecne zjawiska, występujące bezpośrednio po pandemii, oraz spowodowany przez nią kryzys zasobowy i gospodarczy mają charakter turbulentny, co oznacza złożone zachowanie otoczenia, mające znamiona chaotycznego (*Słownik języka...*). Wdrażane zmiany miały charakter nagły i przeciwdziałający negatywnym skutkom w organizacji. Nie były one w żaden sposób zaplanowane. Opracowywane były na bieżąco i wprowadzane doraźnie. Spowodowało to silną presję na pracowników, którzy byli zobligowani do przystosowania się do nowej rzeczywistości.

Jednak turbulentne otoczenie przyspieszyło rozwój obszarów związanych z branżą IT i automatyka przemysłową. Digitalizacja danych w czasach pracy zdalnej okazała się niezbędna do świadczenia pracy i realizacji zadań. Sam termin „digitalizacja” odnosi się do przekształcenia treści analogowej na cyfrową, następnie archiwizacji i zapewnieniu dostępu online ([www.nac.gov.pl](http://www.nac.gov.pl)). Obecnie jednak digitalizacja znacznie wykracza poza cyfryzację dokumentacji. Tworzone są rozbudowane bazy danych, które są analizowane i przetwarzane. Ponadto dane są dostępne przez całą dobę przez 365 dni w roku. Jest to kluczowe szczególnie przy współpracy zespołów rozproszonych w różnych strefach czasowych (Krawczyk-Bryłka 2016, s. 103).

Kolejny obszar, który dynamicznie się rozwija, to automatyzacja i robotyzacja procesów w przedsiębiorstwach. Automatyzacja to ograniczenie bądź zastąpienie pracy ludzkiej zarówno w sferze fizycznej, jak i umysłowej poprzez wykorzystanie pracy maszyn. Robotyzacja polega na zastąpieniu pracy ludzkiej pracą maszyn (Kardasz 2017, s. 25). Przedsiębiorstwa automatyzują zadania i procesy wykonywane przez pracowników w celu zwiększenia efektywności i możliwości obsłużenia większej liczby zadań. Dążą do ciągłego podnoszenia jakości i redukcji

błędów w produkcji i procesach organizacji. Umożliwiają to maszyny – roboty, które wykonują to samo zadanie, które wykonywał pracownik. Różnica polega na tym, że robot za każdym razem będzie wykonywał zadanie dokładnie w taki sam sposób.

## Pracownik w turbulentnym otoczeniu

Dynamika zmian w krótkim czasie wymusiła na pracownikach przystosowanie się do realizacji zadań, które wykonywali w nowy sposób i na nowych zasadach. Można to potraktować jak ponowny proces adaptacji, znany w procesie po rekrutacji, czyli wprowadzenie pracownika do organizacji, w tym do obowiązków na stanowisku (Janowska 2010, s. 83). Przedsiębiorstwa, wprowadzając rozwiązania, adaptowały kadrę do funkcjonowania na nowych zasadach w organizacji. W literaturze wyróżnione są dwa rodzaje adaptacji (Pawlak 2011, s. 250; Woźniak 2013, s. 294):

- adaptacja spontaniczna, która charakteryzuje się pozostawieniem pracownika w początkowym okresie zatrudnienia własnemu losowi;
- adaptacja kierowana, w której organizacja podejmuje określone działania w celu adaptacji nowego pracownika.

Niezależnie od tego, czy wdrażamy zmianę, czy adaptujemy pracownika, to każde przystosowanie się człowieka do nowych warunków lub środowiska jest trudną sytuacją dla jednostki pod względem psychologicznym, co może się przełożyć na jej funkcjonowanie w przyszłości (Woźniak 2013, s. 292-293).

Dla organizacji jako całości ważna jest stabilność postawionych celów i realizowanych procesów. Jednak zmienne otoczenie nie sprzyja przewidywalności zmian. Relacje społeczne i organizacyjne stają się tymczasowe. Intensywność zmian sprawia wrażenie chaosu. Tak przedsiębiorstwa, jak i pracownicy potrzebują pewności i bezpieczeństwa. Turbulentne otoczenie powoduje zmianę podejścia z unikania niepewności na tolerancję pewnej przyjętej granicy niepewności w środowisku społecznym. Niepewność jest pewnym stanem psychicznym polegającym na braku pewności co do prawdziwości danego zdania lub skutków działania, wpływa na brak pewności, bezpieczeństwa i wahanie (Grzesik 2015, s. 148). Wynika głównie z braku dostatecznej ilości informacji i danych w sytuacji decyzyjnej lub w celu zrozumienia zjawiska, które wystąpiło. Niepewność jest zjawiskiem niemierzalnym.

Poziom tolerancji niepewności zależy od charakteru organizacji, jej struktury organizacyjnej, zasobów materialnych i niematerialnych. Zależna jest od możliwości adaptacji pracowników i otwartości na zmiany w funkcjonowaniu w turbulentnym otoczeniu. Zmiana organizacyjna wywołana przez otoczenie ma bardzo szeroki zakres oddziaływania na różne elementy przedsiębiorstwa.



Mają charakter złożony, a ich właściwa analiza, interpretacja i reakcja na zmianę może mieć kluczowe znaczenie w budowaniu przewagi konkurencyjnej. Relacja i funkcjonowanie w zmiennym otoczeniu wymaga odpowiedniego zarządzania zmianą. Szczególnie w momencie, od którego zależeć może przetrwanie przedsiębiorstwa.

## Badania własne

### Założenia badawcze

Badanie przeprowadzono w kwietniu 2023 roku (15-25.04). Dobór próby miał charakter celowy – badanie było skierowane do menedżerów, kierowników i osób pełniących funkcje kierownicze oraz pracowników niepełniących funkcji kierowniczych w przedsiębiorstwach. Przedsiębiorstwa zlokalizowane były na terenie Poznania i powiatu poznańskiego. Głównym celem badań było zweryfikowanie, jak reprezentanci tej grupy postrzegają pojęcie zmiany organizacyjnej. Postępowanie empiryczne prowadzono, aby poznać rozumienie i postrzeganie pojęcia „zmiany organizacyjnej”. Uzyskanie informacji zwrotnej od respondentów pozwoliło na przyjęcie definicji zmiany organizacyjnej i doprecyzowanie dalszych obszarów prac badawczych.

Celem szczegółowym badań było uzyskanie odpowiedzi na następujące pytania:

- Jakie czynniki wewnętrzne i zewnętrzne decydują o konieczności wprowadzania zmian?
- Czy pandemia COVID-19 i kryzys popandemiczny miały i mają istotny wpływ na wywołanie zmian w przedsiębiorstwie?
- Czy nagłe wdrożenie zmian powoduje niepokój i demotywuje pracowników do pracy?
- Czy automatyzacja i digitalizacja są obecnie jednymi z najważniejszych obszarów zmian w przedsiębiorstwie?
- Czy pracownicy z reguły są niechętni wobec wprowadzania zmian w przedsiębiorstwie?

Badanie przeprowadzono przy pomocy kwestionariusza w wersji papierowej i kwestionariusza Google Forms. Ankieta obejmowała 10 pytań zamkniętych. W niektórych pytaniach respondenci mogli podać własne odpowiedzi lub doprecyzować charakter wprowadzanych zmian. Wszystkie pytania odnosiły się do określenia, w jaki sposób respondenci rozumieją pojęcie „zmiany organizacyjnej”, jakie czynniki o tym decydują i jakie zdarzenia mają wpływ na wprowadzanie zmian i jej postrzeganie.

Badani (111 osób) stanowili grupę zróżnicowaną pod względem płci, wieku, aktualnego stażu zawodowego, branży i aktualnego stażu we wskazanej branży przedsiębiorstwa, stanowiska oraz wielkości przedsiębiorstwa, w którym pracują (*tab. 31.1*).

**Tabela 31.1. Charakterystyka osób badanych**

<b>Płeć</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
Kobieta	42	37,8%
Mężczyzna	69	62,2%
<b>Wiek</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
24-30 lat	32	28,8%
31-40 lat	61	55,0%
41-50 lat	16	14,4%
51 lat i więcej	2	1,8%
<b>Staż zawodowy</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
do 5 lat	18	16,2%
6-12 lat	50	45,0%
13-18 lat	31	27,9%
19-24 lat	11	9,9%
powyżej 25 lat	1	0,9%
<b>Aktualny staż pracy we wskazanym przedsiębiorstwie</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
do 3 lat	21	18,9%
4-7 lat	62	55,9%
8-11 lat	17	15,3%
12-15 lat	7	6,3%
powyżej 16 lat	4	3,6%
<b>Stanowisko</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
Kierownicze	76	68,5%
Niekierownicze	35	31,5%
<b>Wielkość przedsiębiorstwa</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
Mikro (zatrudnienie do 10 osób)	5	4,5%
Małe (zatrudnienie od 11 do 50 osób)	14	12,6%
Średnie (zatrudnienie od 51 do 250 osób)	35	31,5%
Duże (zatrudnienie powyżej 251 osób)	57	51,4%
<b>Suma</b>	<b>111</b>	<b>100%</b>

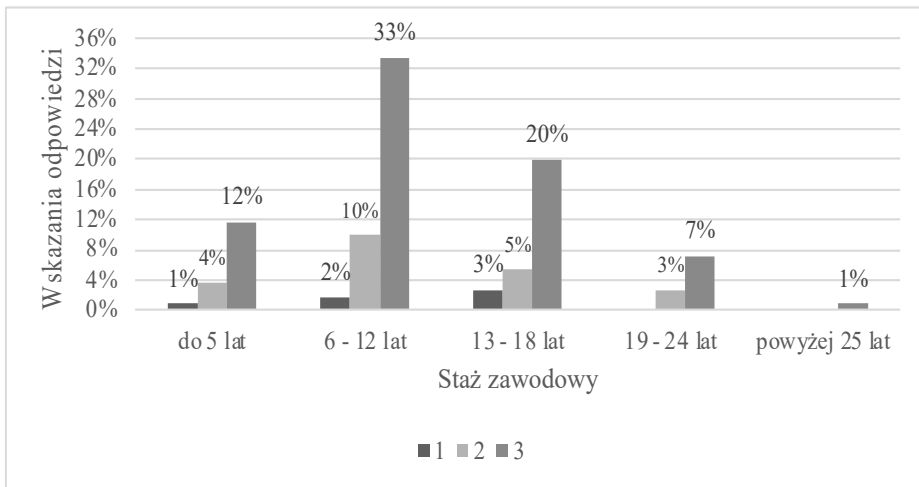
Źródło: Opracowanie własne

### **Analiza wyników badań**

W pierwszym pytaniu poproszono respondentów o odniesienie się do definicji „zmiany organizacyjnej”. Przytoczono trzy definicje zmiany organizacyjnej z różnych źródeł:

1. Zmiana organizacyjna to każda istotna modyfikacja jakiejś części organizacji.
2. Zmiana organizacyjna może dotyczyć każdego aspektu organizacji i może pociągnąć za sobą skutki daleko wykraczające poza obszar, w którym się odbywa.
3. Zmiana organizacyjna to wszystkie przekształcenia zachodzące w różnych sektorach organizacji. Przekształcenia te są dokonywane zarówno pod wpływem działania czynników wewnętrznych, a także zewnętrznych. Zmiany są wprowadzane w celu zwiększenia efektywności funkcjonowania danej organizacji.

Większość ankietowanych (73%) zgodziła się z trzecią definicją zmiany organizacyjnej. Jest to definicja, która obejmuje przekształcenia zachodzące w różnych sektorach gospodarki. Podkreśla znaczenie czynników wewnętrznych i zewnętrznych oddziałujących na organizację. Zmiany przeprowadzane są w celu zwiększenia efektywności. Drugą najpopularniejszą wśród badanych definicją okazała się definicja druga. Ten wariant wybrało 21,6% badanych. W tej opcji zmiana organizacyjna może dotyczyć każdego aspektu organizacji i wykraczać dalej poza obszar, w którym się odbywa. Zdecydowanie mniej osób (5,4%) wybrało opcję pierwszą, określającą zmianę organizacyjną jako każdą istotną modyfikację części organizacji. Zweryfikowano, czy występuje powiązanie wskazania dla trzeciej definicji zmiany wraz z aktualnym stażem zawodowym (rys. 31.1) oraz aktualnym stażem zawodowym w przedsiębiorstwie.



**Rysunek 31.1.** Wybór definicji zmiany organizacyjnej przez respondentów a całkowity staż zawodowy

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie rys. 31.1 najwięcej wskazań na trzecią definicję zmiany organizacyjnej udzielili respondenci z całkowitym stażem zawodowym z przedziału 6-12 lat (33%) i z przedziału 13-18 lat (20%). Do tej grupy należą badani z przedziału wiekowego 24-30 lat i 31-40 lat.

Zestawiono odpowiedzi respondentów z aktualnym stażem zawodowym w obecnym przedsiębiorstwie. Zdecydowana większość respondentów ze stażem z przedziału 4-7 lat wskazała definicję trzecią (39%). Podobnie w drugiej grupie z przedziału do 3 lat (15%) i trzeciej grupie 8-11 lat (13%). Wskazania respondentów można uzasadnić dynamicznym okresem zmian, zrozumieniem nie tylko czynników wewnętrznych, ale także z wynikającym z obserwacji otoczenia

zewnątrznego. Ci badani rozumieją także kompleksowość zmiany, dostrzegają, że wpływa ona nie tylko na jeden obszar, ale na całą organizację.

W dalszej części poproszono o wskazanie najważniejszych czynników wewnętrznych i zewnętrznych zmiany organizacyjnej (*tab. 31.2*). Respondenci mogli wybrać, które spośród czynników wewnętrznych i zewnętrznych zmiany organizacyjnej są najważniejsze.

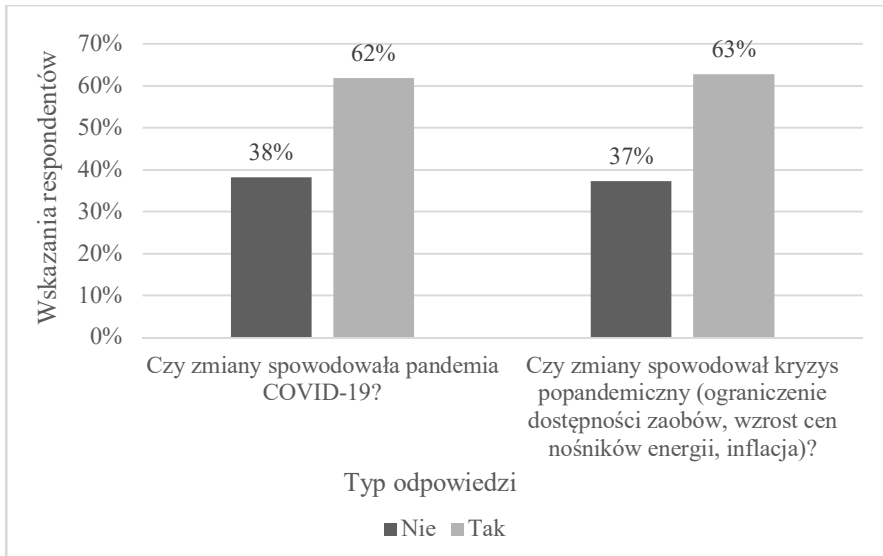
**Tabela 31.2. Czynniki przyczyniające się do wdrażania zmian w organizacji**

Czynniki wewnętrzne	Czynniki zewnętrzne
1. Zużycie techniczne parku maszynowego	1. Zmiana systemu zarządzania gospodarką
2. Zbyt powolny rozwój nowych technologii	2. Zmiany w polityce międzynarodowej
3. Obniżenie poziomu jakości i wzrost reklamacji	3. Zmiany legislacyjne (prawne)
4. Spadek sprzedaży	4. Zmiany w kryteriach oceny instytucji (w przedsiębiorstwach realizujących działalność gospodarczą)
5. Duża rotacja kadry (zwłaszcza kierowniczej)	5. Zmiany w systemie celnym, bankowym, podatkowym
6. Ograniczenie możliwości rozwoju kadry i obniżanie się jej poziomu kwalifikacji	6. Przejście z rynku producenta do rynku konsumenta
7. Ograniczenie wydatków na badania i rozwój	7. Pojawienie się konkurentów lub konkurencyjnych produktów, usług
8. Pesymizm i konflikty wśród załogi	8. Pojawienie się nowych, efektywniejszych technologii
9. Spadek efektywnego wykorzystania zarówno czasu pracy, jak i majątku produkcyjnego	9. Zmiany w ukształtowaniu się potrzeb społecznych

Źródło: Opracowanie na podstawie (Czerska 1996, s. 13-15)

Jako najważniejsze czynniki wewnętrzne powodujące zmianę respondenci wskazali zbyt powolny rozwój nowych technologii (54 odpowiedzi), spadek efektywnego wykorzystania zarówno czasu pracy, jak i majątku produkcyjnego (49 odpowiedzi) i zużycie techniczne parku maszynowego (38 odpowiedzi). Bardzo zbliżony wynik otrzymały również: obniżenie poziomu jakości i wzrost reklamacji oraz spadek sprzedaży (33 i 34 odpowiedzi). Wśród czynników zewnętrznych dominujące okazały się zmiany legislacyjne (prawne) (56 odpowiedzi). Następnie bardzo zbliżone zmiany w systemie celnym, bankowym, podatkowym (40 odpowiedzi), pojawienie się konkurentów lub konkurencyjnych produktów, usług (38 odpowiedzi) oraz pojawienie się nowych, efektywniejszych technologii (37 odpowiedzi).

Kolejne pytanie dotyczyło tego, czy pandemia COVID-19, a następnie kryzys popandemiczny spowodowały istotne zmiany w przedsiębiorstwie. Porównano wskazania respondentów (*rys. 31.2*) i uzyskano wyniki w dużym stopniu zbliżone do siebie.



**Rysunek 31.2.** Wybór odpowiedzi przez respondentów na pytania dotyczące wdrażania zmiany w organizacji

Źródło: Opracowanie własne

Obie sytuacje przyczyniły się do zmian, odpowiedzi respondentów są zbliżone (38% i 37% na nie, 62% i 63% na tak). Jednak należy wziąć pod uwagę, że z jednej strony zmiany mogła wywołać pandemia, ale zmian nie musiał kontynuować kryzys popandemiczny. Respondenci wskazali również, jakie zmiany zostały podjęte przez przedsiębiorstwa. Przykładowymi działaniami było wprowadzenie pracy zdalnej/ hybrydowej, wdrożenie reżimu sanitarnego, częściowe wygaszenie lub całkowite zawieszenie produkcji, zakłócenia i braki w dostawach komponentów, redukcja zatrudnienia. Niektórzy respondenci wskazywali sytuację przeciwną, np. wzrost sprzedaży lub produkcji wynikającej z zachowań konsumentów i branży, np. e-commerce czy produkcji środków ochronnych. Dalszym przyczynkiem do zmian jest trwający kryzys gospodarczy. Respondenci wskazali na dalszą redukcję zatrudnienia, wstrzymanie kluczowych inwestycji czy na wzrost cen produktów/ usług spowodowany wzrostem kosztów działalności. Jednak w niektórych branżach podjęte zostały inwestycje w automatyzację i robotyzację oraz transformację energetyczną, np. montaż paneli fotowoltaicznych.

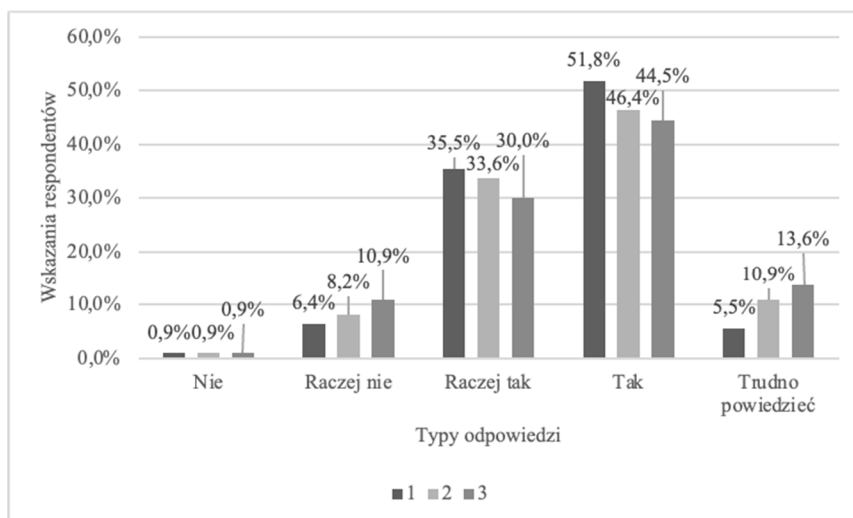
Na koniec respondenci ustosunkowali się do trzech pytań:

1. Czy nagłe wdrażanie zmian powoduje niepokój i demotyduje pracowników?
2. Czy automatyzacja i digitalizacja są obecnie jednymi z najważniejszych obszarów zmian w przedsiębiorstwie?
3. Czy pracownicy są z reguły niechętni do zmian?

Wyniki zbiorcze zebrano na rys. 31.3.

Na pierwsze pytanie odpowiedzi raczej tak i tak udzieliło 87% ankietowanych. Odpowiedzi raczej nie i nie udzieliło 7%, a nie miało zdania 5% badanych. Nagłe

wdrożenie zmian w istotnym stopniu powoduje niepokój i demotywyje do pracy w organizacji.



**Rysunek 31.3.** Wybór odpowiedzi respondentów na pytania dotyczące nagłego wdrażania zmian, digitalizacji i automatyzacji oraz niechęci pracowników do zmian

Źródło: Opracowanie własne

Kolejne pytanie dotyczyło tego, czy digitalizacja i automatyzacja są obecnie jednymi z najważniejszych zmian w przedsiębiorstwie. W odpowiedzi 80% badanych wskazało, że raczej tak i tak, 9% było zdania przeciwnego, natomiast 11% nie podjęło jednoznacznego stanowiska. Ostatnie pytanie odnosiło się do niechęci pracowników do zmian. Zdecydowana większość ankietowanych potwierdziła regułę o niechęci pracowników do zmian (raczej tak i tak 75%). Odpowiedź przeciwną wskazało 12% ankietowanych, a 14% nie wyraziło jednoznacznie swojego stanowiska. Potwierdza to podejścia teoretyczne, że w trakcie wdrażania zmian największą uwagę należy skupić na członkach organizacji. Od ich postawy zależy, czy zmiana zostanie wdrożona i utrwalona w organizacji.

## Podsumowanie

Zagłębiając się zarówno w teorię, jak i w analizę przeprowadzonych badań, można zauważyć, jak duży wpływ na zmianę organizacyjną ma otoczenie. Pandemia i jej skutki w dużym stopniu wpłynęły na stabilność organizacji. W sposób istotny oddziałuje na nią również postęp technologiczny (automatyzacja, robotyzacja i digitalizacja). Najczęściej decyzja o zmianie zapada w wyniku nieefektywnych procesów, zużycia parku maszynowego czy spadku jakości i sprzedaży. W otoczeniu zewnętrznym jako najczęstsze przyczyny należy wskazać zmiany prawne czy pojawienie się nowych konkurentów. Niepewne i turbulentne

otoczenie zmusza przedsiębiorstwa do podejmowania działań. Wdrażana zmiana swoim zasięgiem zwykle wykracza poza organizację. Na uwadze należy mieć pracowników, w których nagłe wdrażanie zmian wywołuje niepokój i dalszą niechęć do zmian. Oczekują oni stabilności i jasnych komunikatów, jakie zmiany organizacja zamierza podjąć. Zmiany powinny być zaplanowane i ujęte procesowo oraz korygowane w przypadku wystąpienia znaczących zmian w otoczeniu na etapie wdrażania. Tematyka zmiany organizacyjnej w przedsiębiorstwie staje się coraz bardzo złożona i wymaga dalszych, bardziej szczegółowych badań w celu wypracowania nowego podejścia do zarządzania zmianą w organizacji.

## Literatura

1. Czerska M. (1996), *Organizacja przedsiębiorstw. Metodologia zmian organizacyjnych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
2. Dąbrowska J., Dołyńska E., Hryniewicka G. (2020), *Wpływ nieprzewidywanych zdarzeń na łańcuchy dostaw na przykładzie pandemii COVID-19*, „Akademia Zarządzania”, 4, 2, s. 71-81.
3. Grzesik K. (2015), *Niepewność jako architekt kontekstu podejmowania decyzji menedżerskich*, „Marketing i Rynek”, 9, CD, s. 143-154.
4. Grzybowska K. (2010), *Reorganizacja przedsiębiorstw. Zarządzanie zmianą organizacyjną*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
5. <https://www.nac.gov.pl> (dostęp: 12.04.2023).
6. Janowska Z. (2010), *Zarządzanie zasobami ludzkimi*, PWE, Warszawa.
7. Kardasz P. (2017), *Współczesna automatyzacja i robotyzacja a człowiek*, „Biuletyn Naukowy Wrocławskiej Wyższej Szkoły Informatyki Stosowanej. Informatyka”, 7, 2, s. 25-27.
8. Kowalczyk A. (2015), *Otoczenie przedsiębiorstwa jako determinanta konkurencyjności*, „Przedsiębiorstwo i Region – Współpraca, Konkurencyjność, Rozwój”, 7, s. 38-52.
9. Krawczyk-Bryłka B. (2016), *Budowanie zespołu wirtualnego – zasady i wyzwania*, „Studia Informatica Pomerania”, 2, s. 99-111.
10. Miciuła I. (2013), *Globalne uwarunkowania funkcjonowania i rozwoju przedsiębiorstw*, „Zarządzanie i Finanse”, 1, 2 s, s. 173-187.
11. Pawlak Z. (2011), *Zarządzanie zasobami ludzkimi w przedsiębiorstwie*, Poltext, Warszawa.
12. *Słownik języka polskiego PWN*, <https://sjp.pwn.pl/> (dostęp: 13.04.2023).
13. Trziszka M. (2017), *Narzędzia komunikacji wykorzystywane w modelu pracy zdalnej w firmach rodzinnych*, „Przedsiębiorczość i Zarządzanie”, 18, 6(3), s. 213-221.
14. Walczak W. (2009), *Metodyka zarządzania zmianami organizacyjnymi*, „Kwartalnik Nauk o Przedsiębiorstwie”, 4, s. 71-77.
15. Woźniak J. (2013), *Rekrutacja. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
16. Zalega T. (2009), *Praca zdalna – obraz przemian w Polsce i wybranych krajach Unii Europejskiej*, „Master of Business Administration”, 17, 4, s. 35-45.

## The Concept of Organizational Change and the Turbulent Environment of the Enterprise

**Abstract:** The concept of organizational change is a very popular topic these days (2023) as a response to the dynamic and turbulent socio-economic environment.

---

The chapter presents definitions of organizational change. The environment was characterized from the perspective of the COVID-19 pandemic and the current economic crisis. The place of the employee in the turbulent environment and his role in implementing the change was characterized. Occurring phenomena associated with organizational change were presented. A survey was conducted on the concept of organizational change, which was addressed to executives from more than a dozen industries. 111 responses were obtained regarding the understanding of organizational change, the most important internal and external factors determining the need for change. What impact did the pandemic and the current time of crisis have on the implementation of change and employees' mindset towards organizational change.

**Keywords:** organizational change, turbulence, uncertainty



## Rozdział 32

### Wybrane metody zarządzania projektem technologicznym

Marta Caban, Dorota Musiał

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane metody zarządzania projektem technologicznym. Współczesna globalizacja otwiera przed przedsiębiorstwami zarówno wiele możliwości, jak i zagrożeń. Z tego względu niezwykle ważna staje się dla nich innowacyjność. Pod pojęciem „innowacyjności” rozumie się wdrażanie, opracowywanie, a także opatentowanie rozwiązań oraz działań skierowanych na szeroko rozumiany rozwój przedsiębiorstwa. W poszukiwaniu odpowiedniej metodyki wdrażania nowej technologii pojawiają się zatem metody konwencjonalne (określane także mianem tradycyjnych) oraz niekonwencjonalne (określane także mianem nowatorskich). Kluczowym aspektem niniejszego rozdziału jest krótka charakterystyka każdego z pojęć, a także przedstawienie najciekawszych, zdaniem autorek, metod wdrożeniowych.

**Słowa kluczowe:** Agile, Design Thinking, metody wdrażania nowej technologii, PMBOK, PRINCE2

#### Wprowadzenie

Współczesny, coraz szybszy tryb życia stawia przed przedsiębiorstwami wiele wyzwań. Chcąc być konkurencyjnym i utrzymać pozycję lidera na danym rynku lub sukcesywnie się do niej przybliżać, przedsiębiorcy muszą szybko reagować na zmiany. Wymusza to konieczność wypracowania niezwykle dynamicznego systemu wdrażania nowej technologii.

Wyzwaniem dla menedżerów staje się więc nie tylko skuteczna implementacja nowej technologii, lecz także uważna obserwacja preferencji rynkowych oraz zachodzących zmian, reagowanie na nie oraz szybkie i skuteczne procesy wdrożeniowe. Obecnie istnieje wiele możliwości przechwytywania technologii m.in. poprzez zakup technologii licencji od wynalazców, współpracy z ośrodkami badawczymi lub uczelniami wyższymi. Współczesne przedsiębiorstwa potrzebują zatem narzędzi skutecznego zastosowania technologii przy maksymalnym uproszczeniu tego procesu, a także skuteczności działania.

Niniejszy rozdział skupia się na dwóch podejściach do wdrażania nowej technologii: konwencjonalnym (standardowym) oraz niekonwencjonalnym (niestandardowym).

Pod pojęciem „konwencjonalne wdrażanie technologii” rozumie się stosowanie uznanych i powszechnie znanych metod i narzędzi w tym procesie. Takie podejście opiera się na przetestowanych praktykach i standardach branżowych, które są uznane za najlepsze w danej dziedzinie. Wdrożenie technologii odbywa się zgodnie z konkretnym planem, a proces ten jest dokładnie monitorowany i oceniany zgodnie z ustalonymi kryteriami. Natomiast niekonwencjonalne metody wdrożeniowe to podejście, które jest dostosowane do indywidualnych potrzeb przedsiębiorstwa i charakterystyki projektu. W takim przypadku proces implementacji jest mniej formalny i mniej strukturalny niż w przypadku standardowego podejścia. Niestandardowe podejście charakteryzuje się elastycznością, dostosowaniem do specyficznych potrzeb przedsiębiorstwa, a także większą innowacyjnością.

## Konwencjonalne metody wdrażania nowej technologii

Konwencjonalne metody wdrażania nowej technologii obejmują procesy zmian, które są powszechnie stosowane w wielu branżach. Zwykle rozpoczynają się one od analizy potrzeb i zasobów firmy, po czym następuje planowanie, wdrożenie, szkolenie pracowników oraz monitorowanie procesu i wszelkich uchybień. W tym procesie wykorzystuje się metodyki projektowe PMBOK® lub Prince2, które pozwalają na skuteczne planowanie i zarządzanie projektem. Konwencjonalne metody mogą charakteryzować się czasochłonnością, znacznymi nakładami finansowymi oraz wymagają odpowiedniego doboru zasobów ludzkich.

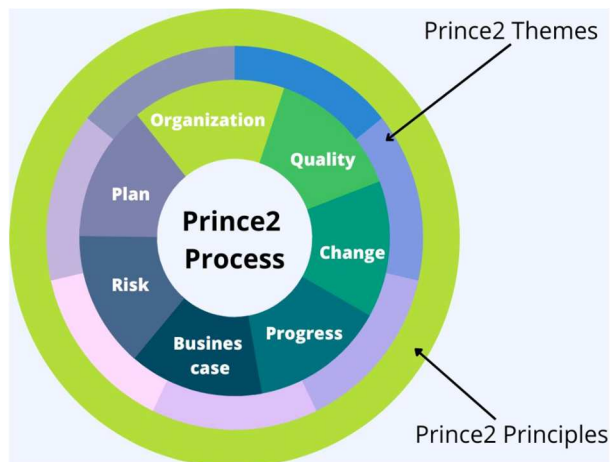
Pierwszą z konwencjonalnych metod jest PMBoK®, zaproponowana w książce (PMBOK® Guide 2021). PMBoK® to standard w dziedzinie zarządzania projektami, który składa się z praktyk i narzędzi umożliwiających skuteczne planowanie, zarządzanie, kontrolowanie i monitorowanie projektów. PMBoK® Guide stanowi podstawowy punkt odniesienia w zarządzaniu projektami, a jego wdrożenie pomaga zwiększyć jego efektywność (Dąbrowski, Jędrzejewski 2012).

W PMBoK® określono 49 procesów, które są podzielone na 10 obszarów wiedzy, takich jak integracja, zakres, czas, koszty, jakość, zasoby ludzkie, komunikacja, ryzyko, zaangażowanie interesariuszy i zamówienia. W metodzie zarządzania projektem zastosowanie tych procesów, wraz z wiedzą, umiejętnościami, technikami i narzędziami, a także odpowiednimi wejściami, generuje wyniki i produkty. Aby zakończyć projekt z sukcesem, należy dostosować metodologię do specyfiki projektu, wybierając odpowiednie procesy, dostosować podejście projektowe do wymagań projektu, zrealizować wymagania interesariuszy i zachować równowagę pomiędzy zakresem, kosztem, czasem, jakością, zasobami i ryzykiem projektu, by osiągnąć cele projektowe (Wyrozębski 2011). Obszary wiedzy w PMBoK® zostały stworzone w celu zebrania i podsumowania najlepszych

praktyk zarządzania projektami, które mogą być wykorzystane w większości projektów, w większości przypadków, a także uzyskać ogólną akceptację za ich pozytywną wartość i użyteczność. Jest to jedna z głównych zalet obszarów wiedzy w metodzie PMBoK® (Wyrozębski 2011).

W związku z powyższym opracowanie charakteryzuje się dużym stopniem uniwersalizmu, jednocześnie warunkując znaczną ogólność proponowanych rozwiązań. PMBoK® wskazuje obszary zarządzania projektami, które powinny zostać rozpatrzone przez kierownika projektu, opisuje procesy w ramach tych obszarów i pokazuje ich wzajemne zależności. Jednocześnie decyzję o zaadaptowaniu procesów do projektu pozostawia w rękach kierownika projektu, który powinien dostosować zakres, szczegółowość i rygor procesów do specyfiki potrzeb danego projektu.

Druga z zaproponowanych metod konwencjonalnych to PRINCE2® (PRojects IN Controlled Environments) to metodyka zarządzania projektami, która została opracowana w Wielkiej Brytanii. PRINCE2® jest zarejestrowanym znakiem towarowym Office of Government Commerce (OGC). PRINCE2® jest standardem zarządzania projektami, który składa się z szeregu zasad, tematów i procesów, które należy stosować, aby zapewnić skuteczne zarządzanie projektami. Metodyka PRINCE2® składa się z siedmiu zasad przedstawionych na rys. 32.1, które muszą być przestrzegane w każdym projekcie. Zasady te obejmują m.in. definiowanie biznesowego uzasadnienia projektu, kontrolowanie etapów projektu, zarządzanie ryzykiem i dopasowywanie metodyki do specyficznych potrzeb projektu. PRINCE2® składa się również z siedmiu tematów (rys. 32.1), które dotyczą kluczowych aspektów projektu, takich jak organizacja, biznesowe uzasadnienie projektu, planowanie, ryzyko, jakość, zmiany oraz postępowanie w przypadku odstępstw od planu.



**Rysunek 32.1.** Struktura metodyki PRINCE2

Źródło: Opracowanie własne na podstawie PRINCE2® – Project Management Methodology

W PRINCE2® zdefiniowano również siedem procesów, które odpowiadają za zarządzanie projektem, od jego inicjacji po zamknięcie projektu. Procesy te obejmują m.in. inicjowanie projektu, planowanie, realizację, kontrolę i monitorowanie, a także zamknięcie projektu.

Można powiedzieć, że PRINCE2® jest bardzo cenioną i stabilną metodyką zarządzania projektami, która zdobyła popularność dzięki spójności i logiczności jej rozwiązań, a także wsparciu ze strony rządu brytyjskiego. Jej podejście oparte na produktach, czyli skupienie na realnych efektach działań, pozwala na utrzymanie przejrzystości i umożliwia ocenę wysiłków zaangażowanych w projekt. Koncentracja na produktach przyczynia się także do lepszego planowania budżetu i zasobów, co ułatwia kontrolowanie wydatków i zapobiega niepotrzebnym kosztom. W PRINCE2® ugruntowało się również podejście organizacyjne oparte na komitecie sterującym, który podejmuje strategiczne decyzje w projekcie i negocjuje interesy różnych stron. Mianowanie osób o odpowiednich uprawnieniach do komitetu pozwala na odciążenie kierownika projektu od odpowiedzialności za podejmowanie decyzji (Wyrozębski 2011).

## Niekonwencjonalne metody wdrażania nowej technologii

Niekonwencjonalne metody wdrażania nowej technologii odnoszą się do stosowania nietypowych i innowacyjnych podejść w celu wdrażania nowych technologii. Metody te skupiają się na dążeniu do zmiany kultury organizacyjnej i zwiększenia zaangażowania pracowników w proces wdrażania. Przykłady niekonwencjonalnych metod wdrażania technologii to m.in. Design Thinking, Agile. Te metody pomagają w szybszym i bardziej elastycznym dostosowaniu się do zmieniających się potrzeb rynkowych.

Design Thinking jest metodyką pochodzącą z branży kreatywnej, a jej popularyzację przypisuje się firmie projektowej IDEO. Ideą DT jest przekazanie narzędzi designerów osobom, które wcześniej nie miały związku z designem, a także zastosowanie tych narzędzi w celu rozwiązywania różnorodnych problemów, nawet tych spoza branży kreatywnej (Wrona 2023). Design Thinking to proces kreatywnego myślenia i projektowania, który skupia się na rozwiązywaniu problemów z punktu widzenia użytkownika. Jest to podejście, które pomaga projektantom, inżynierom, biznesmenom i innym specjalistom w identyfikacji i rozwiązywaniu problemów w sposób innowacyjny i efektywny. Design Thinking składa się z sześciu kroków (*rys. 32.2*): empatia, definiowanie problemu, generowanie pomysłów, prototypowanie, testowanie i wdrożenie. Na pierwszym etapie – empatii – projektanci starają się zrozumieć perspektywę użytkownika, jego potrzeby, zachowania i doświadczenia. Następnie, w fazie definiowania problemu, projektanci identyfikują problem, który mają rozwiązać i określają cele projektu. Na etapie generowania pomysłów projektanci wykorzystują różne techniki i narzędzia, aby wygenerować jak najwięcej pomysłów na rozwiązanie problemu. Kolejny etap, prototypowanie, to tworzenie przez projektantów

wizualnych lub fizycznych modeli swojego rozwiązania. Na koniec etap testowania, podczas którego projektanci testują swoje rozwiązanie na użytkownikach i gromadzą informacje zwrotne pozwalające na ulepszenie projektu. w etapach



Rys. 32.2. Etapy Design Thinking

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Stanford Design Thinking Model

W *tab. 32.2* przedstawiono główne założenia poszczególnych punktów w etapach Design Thinking.

Tabela 32.2. Główne założenia poszczególnych punktów w etapach Design Thinking

Etap	Punkt w etapie	Główne założenia
Zrozumienie	Empatyzacja	Wykorzystanie empatii i wczucie się w potrzeby użytkowników oznacza zdolność do głębokiego zrozumienia i poznania końcowego użytkownika, włącznie z jego emocjami, myślami, obawami, motywacjami i doświadczeniami. W ten sposób można spojrzeć na problem z perspektywy osoby, dla której projektowane jest rozwiązanie, i zrozumieć, jakie są jej potrzeby. To pozwala na stworzenie bardziej dopasowanego i efektywnego rozwiązania, które lepiej spełnia oczekiwania użytkownika.
	Zdefiniowanie problemu	Interpretacja wyników i definiowanie właściwego problemu to proces łączenia zebranych informacji podczas etapu Empatii w celu określenia rzeczywistej istoty problemu z perspektywy potrzeb użytkownika. Kluczowe jest tutaj nie tylko zidentyfikowanie problemu, ale także sformułowanie go w sposób precyzyjny i włączenie ograniczeń, które należy przezwyciężyć, aby osiągnąć sukces. Określenie właściwego problemu jest kluczowe dla późniejszych etapów projektowania rozwiązania, ponieważ stanowi punkt wyjścia dla formułowania wymagań projektowych.

Eksploracja	Generowanie pomysłów	Ideacja to etap procesu projektowego, którego celem jest wygenerowanie jak największej liczby nowych i oryginalnych rozwiązań dla zdefiniowanego problemu. W tym etapie należy powstrzymać się od krytykowania i oceniania pomysłów, aby umożliwić swobodne i kreatywne myślenie. Po zakończeniu ideacji następuje ocena i demokratyczne wybieranie najlepszych pomysłów, które posłużą do stworzenia prototypów.
	Budowanie prototypu	Prototypowanie polega na tworzeniu modeli lub przykładowych wersji proponowanych rozwiązań, zwykle z materiałów takich jak karton, drewno lub styropian. Celem jest zaprezentowanie użytkownikom wizualnej reprezentacji pomysłów, aby umożliwić im zobaczenie, jak działałoby to rozwiązanie w praktyce i zaproponowanie ewentualnych zmian lub ulepszeń. W ten sposób tworzy się doświadczenie, które może pomóc w sprowokowaniu reakcji i lepszym zrozumieniu oczekiwań użytkowników.
Materializacja	Testowanie	Testowanie, ocena i poprawianie/usprawnianie rozwiązań to proces, który polega na przeprowadzeniu testów prototypów w środowisku użytkownika, w celu zebrania opinii i informacji zwrotnych na temat proponowanych rozwiązań. Celem jest usprawnienie rozwiązań na podstawie zebranych uwag i sugestii odbiorców. Na tym etapie można również dokonać ewentualnych modyfikacji, aby zwiększyć funkcjonalność i użyteczność proponowanego rozwiązania. Testowanie i ocena powtarzają się aż do momentu, gdy uzyskane wyniki są zadowalające i spełniają potrzeby użytkowników.
	Wdrożenie	Finalny etap wdrażania projektu zazwyczaj obejmuje etap zamknięcia projektu. Na tym etapie następuje oficjalne zakończenie projektu, a także dokładna ocena procesu wdrażania i wyników, które zostały osiągnięte. W tym czasie należy również dokonać ostatecznej dokumentacji projektu oraz przekazać wyniki i produkty projektu do użytku przedsiębiorstwa.

Źródło: (Wrona 2023)

Design Thinking to podejście, które koncentruje się na współpracy i człowieku oraz wykorzystuje iteracyjne metody do identyfikowania i rozwiązywania problemów poprzez ustalenie rzeczywistego problemu i znalezienie właściwego rozwiązania. Głównym celem metodyki jest tworzenie i implementowanie nowatorskich rozwiązań, takich jak produkty, usługi, marki, komunikacja, technologie, procesy, przestrzenie, strategie rozwoju i modele biznesowe, programy edukacyjne oraz zmiany kultury organizacyjnej. Design Thinking pomaga w rozwoju innowacyjności i daje pewność niestandardowych rozwiązań (Wrona 2023).

Design Thinking poprzez swój uniwersalny charakter ma szerokie zastosowanie – szczególnie użyteczne jest tam, gdzie mamy do czynienia z problemami, które nie mają jednego oczywistego rozwiązania czy sztywnych ram (tzw. *wicked problems*).

Drugą metodą niekonwencjonalnego wdrażania nowej technologii jest Agile. Agile to podejście do zarządzania projektem, które opiera się na iteracyjnym i inkrementalnym podejściu do tworzenia produktów lub usług. Metoda Agile skupia się na elastyczności, szybkim reagowaniu na zmieniające się wymagania i efektywnym zarządzaniu zespołem (Błaszczak 2019). Agile składa się z kilku elementów, takich jak sprinty, spotkania, backlogi i demo. Sprinty to okresy czasu, podczas których zespół pracuje nad konkretnym zadaniem, spotkania służą do omawiania postępów i problemów, backlogi to lista zadań do wykonania, a demo to prezentacja efektów pracy. Metoda ta ma kilka założeń, takich jak ciągła iteracja, szybka reakcja na zmiany, elastyczność i zwinność. Agile skupia się na efektywnym wykorzystaniu zasobów, zwiększaniu wartości dla klienta i szybkim dostarczaniu produktów lub usług. Agile jest szczególnie przydatne w projektach związanych z nowymi technologiami, w których wymagania klienta mogą zmieniać się bardzo szybko. Metoda ta pozwala na szybkie reagowanie na zmieniające się wymagania i dostarczanie produktów lub usług, które są dostosowane do potrzeb klienta. Warto zauważyć, że metoda Agile nie jest tylko narzędziem, ale to sposób myślenia, który pozwala na elastyczne i efektywne zarządzanie projektem. To podejście skupia się na wartości dla klienta, zwiększaniu efektywności zespołu i szybkim dostarczaniu produktów lub usług, co przyczynia się do osiągnięcia sukcesu w konkurencyjnym środowisku.

Podejście Agile to reakcja na dynamiczny i nieprzewidywalny świat, w którym działają firmy (VUCA). VUCA to skrót utworzony przez dwóch amerykańskich profesorów, Warrena Bennis i Burta Nanusa, w kontekście strategii militarnych. Termin ten po raz pierwszy został użyty w Army War College w Stanach Zjednoczonych, aby opisać charakter świata, w którym żyjemy. Można go zdefiniować za pomocą czterech kluczowych słów: zmienność, niepewność, złożoność i niejednoznaczność.

Metoda Agile stanowi alternatywę dla sztywnych i tradycyjnych podejść do zarządzania i wykonywania zadań. Agile narodził się w odpowiedzi na potrzebę większej adaptacyjności i elastyczności, gdyż dotychczasowe metody okazały się niewystarczające dla klientów i biznesu. Obecnie, w rywalizacji o klienta i pracownika, kluczowe stają się czynniki takie jak kreatywność, innowacja i podejście centryczne na klienta. Zwiększająca się świadomość klientów, wzrastająca konkurencja i ciągłe zmiany wymuszają na firmach dostosowywanie się do zmieniających się potrzeb rynku. Sukces w obecnym otoczeniu biznesowym zaczyna się na literę Z, a wzrost wskaźnika EBITDA potwierdza skuteczność podejścia Agile.

EBITDA to skrót od *earnings before interest, taxes, depreciation and amortization*, co w tłumaczeniu na język polski oznacza „zysk operacyjny przed odjęciem odsetek, podatków, amortyzacji i upadłości”. Jest to miara finansowa,

która określa zysk przedsiębiorstwa z jego podstawowej działalności, nie uwzględniając kosztów związanych z finansowaniem czy opodatkowaniem, amortyzacją aktywów niematerialnych i prawnych, a także kosztów związanych z obsługą długu. EBITDA jest wykorzystywana w analizie finansowej i porównywana między różnymi firmami, a także służy do oceny zdolności przedsiębiorstwa do generowania gotówki (Błaszczak 2019).



*Rysunek 32.3. Równanie sukcesu – zasada 5 z*

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Błaszczak 2019)

Zmiana uległa przemianie, stając się nieliniową, ciągłą i wielopoziomową, co wymaga umiejętności korzystania z niej jako wciąż nowego otwarcia i stale napływających możliwości. Kluczowe jest zarządzanie swoją energią i zaangażowaniem, a także prowadzenie ludzi przez zmianę tak, aby nie frustrowała ich i nie podcinała skrzydeł, ale prowadziła do sukcesu. Zaufanie jest kluczowe, ponieważ daje szybkość działania, budzi kreatywność i pozwala na grę zespołową, która jest coraz bardziej wymagana w dzisiejszym biznesie. Zaangażowanie zespołów i jednostek jest niezbędne do osiągnięcia celów, a jedna osoba nie wystarcza już do ich realizacji. Wymagana jest synergia zespołowa, która pozwoli osiągnąć więcej niż pojedynczy człowiek. Kluczowe jest zaangażowanie wszystkich członków zespołu w proces zmiany i rozwój firmy. Zwinność natomiast jest efektem harmonijnego połączenia wszystkich wyżej wymienionych czynników, dając efektywność, która pozwala przewyższyć konkurencję i przetrwać trudne czasy.

## Podsumowanie

W rozdziale przeanalizowano zalety wdrażania nowych technologii w przedsiębiorstwie. Zwrócono uwagę na konwencjonalne metody, takie jak model PMBOK® czy Prince2®, które nie zawsze są wystarczające w przypadku bardziej



złożonych projektów, wymagających elastyczności i innowacyjności. W takich sytuacjach warto rozważyć niekonwencjonalne metody, takie jak Design Thinking, Lean Startup czy Agile, które pozwalają na bardziej iteracyjne podejście i lepsze dostosowanie do zmieniających się potrzeb klienta.

Wprowadzenie nowej technologii wiąże się z koniecznością przeprowadzenia zmiany kultury organizacyjnej oraz dostosowania procesów pracy. Wymaga to od menadżerów i liderów nie tylko odpowiednich narzędzi, ale przede wszystkim umiejętności zarządzania ludźmi, komunikacji i budowania zaangażowania.

Podsumowując, należy stwierdzić, że wdrażanie nowej technologii do przedsiębiorstwa wymaga elastycznego podejścia, umiejętności zarządzania zmianą oraz dostosowania narzędzi i metod do konkretnych potrzeb i celów. Konwencjonalne metody są nadal ważne, ale warto rozważyć alternatywne podejścia, które pozwalają na szybsze i bardziej innowacyjne wdrożenia.

## Literatura

1. PMBOK® Guide (2021), *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, PMBoK® Guide, Project Management Institute.
2. Dąbrowski K., Jędrzejewski K. (2012), *Zarządzanie projektami informatycznymi w metodyce Scrum*, Politechnika Warszawska, Warszawa.
3. Wyrozębski P. (2011), *Metodyka PMI: Project Management Body of Knowledge*, [w:] *Metodyki zarządzania projektami*, s. 55- 93, Bizarre, Warszawa.
4. <https://prince2.wiki/pl/procesy/przygotowanie-projektu/> (dostęp: 12.04.2023).
5. Wyrozębski P. (2011), *Metodyka PRINCE2*, [w:] *Metodyki zarządzania projektami*, s. 95-121, Bizarre, Warszawa.
6. Wrona S. (2023), *Design Thinking, o co chodzi?*, [https://www.parp.gov.pl/attachments/article/69720/CRMSP\\_Design\\_Thinking\\_Sylwia\\_Wrona.pdf](https://www.parp.gov.pl/attachments/article/69720/CRMSP_Design_Thinking_Sylwia_Wrona.pdf) (dostęp: 12.04.2023).
7. Błaszczak E. (2019), *Agile. Zwinne zarządzanie. Krótko, prosto i na temat*, Warszawa.

## Selected Methods of Technological Project Management

**Abstract:** This chapter presents selected methods of technological project management. Contemporary globalization brings many opportunities but also many threats, making it essential for companies to be innovative. Innovation refers to the implementation, development, and patenting of solutions and actions aimed at the broad development of the company. In search of the appropriate methodology for implementing new technology, conventional methods (also known as traditional) and unconventional methods (also known as innovative) emerge. The key aspect of this chapter is to briefly characterize each concept and present the most interesting implementation methods according to the authors.

**Keywords:** Agile, Design Thinking, methods of implementing new technology, PMBOK, PRINCE2

## Rozdział 33

# Wpływ działań marketingowych na decyzje zakupowe klientów

Julia Zub

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** Marketing jest podstawowym narzędziem wykorzystywanym przez przedsiębiorstwa w celu rozpowszechniania swoich produktów i usług. Odpowiednio prowadzone działania w połączeniu z ciekawą i chwytliwą reklamą prowadzoną w telewizji, radiu czy mediach społecznościowych budują zaufanie pomiędzy producentem i klientem, jednocześnie wzmacniając siłę marki. Rozpowszechniające się w ostatnich latach zjawisko greenwashingu stało się zauważalne na wielu płaszczyznach. Taka praktyka wywołuje spreczny odzew. Z jednej strony znajduje się grupa klientów o niskiej świadomości ekologicznej, która nie tylko nie zna symboli i oznaczeń, ale równie często nawet ich nie sprawdza, i nie wywołują one żadnych emocji czy większego zainteresowania. Jest to grupa ludzi, którzy przy zakupie kierują się innymi priorytetami np.: ceną, dostępnością, przyzwyczajeniami, a nawet efektem wizualnym. Z drugiej strony pojawia się część społeczeństwa, dla której środowisko naturalne i wpływ na nie działań przedsiębiorstw i własnych stanowią ważny aspekt przy podejmowaniu decyzji. Ta grupa posiada podstawową wiedzę dotyczącą certyfikatów czy regulacji prawnych. Przed zakupem sprawdzają skład produktów, szkodliwość zawartych w nim substancji, a nawet ogólną działalność marki i to, czy zgodna jest z ich przekonaniem i działaniem.

**Słowa kluczowe:** ekologia, greenwashing, marketing

## Wstęp

Marketing jest sposobem na budowanie dobrych i trwałych relacji z klientem, obejmuje działania wspomagające i poszerzające sprzedaż dóbr i usług. W obecnych czasach marketing ma za zadanie usatysfakcjonowanie konsumenta i zbadanie jego niespełnionych potrzeb i pragnień. Zestaw elementów składających się na działania marketingowe w przedsiębiorstwie określa się jako marketing-mix, który obejmuje produkt, cenę, dystrybucję i promocję. Podstawowym celem tych elementów jest ukazanie produktu lub usługi w jak najkorzystniejszym świetle (Szrajnert).

Przedsiębiorstwa bardzo często korzystają również z marketingu sensorycznego, który wpływa bezpośrednio na podświadomość i zmysły konsumenta. Skupia się na czynnikach zewnętrznych, takich jak zapach, smak, dotyk, obraz czy dźwięk. Stąd bierze się również druga nazwa tej techniki, czyli marketing pięciu zmysłów. Niezbędnym elementem działania przedsiębiorstwa w celu pozyskiwania klientów i zachęcenia ich do swoich produktów lub usług będzie również reklama, social media czy Internet, które z biegiem czasu stają się podstawowym środkiem do poszukiwania najlepszej oferty spełniającej oczekiwania konsumenta. Dlatego można zauważyć wzrost korzystania z usług influencerów, które pozwalają dotrzeć do zróżnicowanej grupy klientów i jednocześnie ukazać obraz marki w bardziej zaufanym i sprawdzonym świetle (Grzybowska-Brzezińska, Rudzewicz 2013).

Wraz z rozwojem technologii i świadomości społecznej coraz częstsze i bardziej powszechne staje się pokazywanie przez przedsiębiorstwo ekologicznego podejścia do środowiska. Wymuszają to nie tylko przepisy, normy czy ustawy, ale również sami konsumenci. Moda na bycie eko oraz trendy dotyczące zdrowego trybu życia i dbania o planetę sprawiły, że społeczeństwo coraz częściej wybiera produkty, które pokazywane są jako ekologiczne, odnawialne, w pewnym sensie bardziej przychylne środowisku naturalnemu. Dlatego można zauważyć w sklepach, telewizji, radiu czy Internecie coraz więcej produktów i usług reklamowanych właśnie pod tymi hasłami: „naturalne”, „bio”, „ekologiczne”, „zdrowe”, „nie szkodzą naturze” lub „w porozumieniu z naturą” (Kłós 2015). Jeśli takie reklamy poparte są badaniami, wynikami ogólnodostępnymi, a produkty w całym procesie powstawania wytwarzają mniej szkodliwych substancji lub wykonane są z mniej szkodliwych materiałów, a końcowo są wykorzystywane do recyklingu w całości lub znajdują drugie życie po wyrzuceniu (a nie tkwią w błędnym kole polegającym na tym, że przedsiębiorstwo może na jednym etapie produkcji zmniejsza szkodliwość po to, by na innym zwiększyć ją dwukrotnie), to takie działanie jest dobre i zasługuje na tytuł bardziej ekologicznego. Niestety bardzo często przedsiębiorstwa wykorzystują to, że nie każdy element czy symbol umieszczony w celu reklamy jest uregulowany prawnie. W takim przypadku mamy do czynienia z greenwashingiem, czyli ekościemą (*Greenwashing...* 2023).

## Greenwashing, czyli błędne, fałszywe lub niepełne informacje

W najprostszym tłumaczeniu greenwashing to komunikacja marketingowa przedsiębiorstwa, która bazuje na fałszywych deklaracjach dotyczących zgodności produktu czy usług z zasadami ochrony środowiska lub takich, które mają wprowadzać w błąd konsumenta. Nie zawsze greenwashing stanowi celowy efekt nadużyć przedsiębiorstwa, czasami wynika z braku wiedzy na ten temat lub nieprecyzyjnych i niedokładnych opisów oferty.

Dwie amerykańskie agencje Terrachoice i Futtera Sustainability Communication dokonały analizy praktyk „zielonego mydlenia oczu” i opisały te najczęściej

spotykane i stosowane. Analiza Terra Choice pokazuje następujące praktyki, nazywane również grzechami:

**Grzech ukrytych działań** – to najczęściej spotykany przykład greenwashingu. Polega on na pokazywaniu, że produkt jest zgodny z zasadami ochrony środowiska, niestety najczęściej pokazywany jest tylko fragment cyklu życia, który nie obrazuje wpływów środowiskowych wynikających z całego cyklu życia produktu.

**Grzech braku dowodów** – najczęściej to deklaracje dotyczące parametrów środowiskowych produktu, niemające odzwierciedlenia w żadnych źródłach, i takie, które nie mają pokrycia przez instytucje certyfikujące. Najprościej mówiąc, są to wszystkie informacje, których konsument nie jest w stanie sprawdzić, np. produkt nietestowany na zwierzętach.

**Grzech braku precyzji** – tutaj można wyróżnić opisy na produkcie, które są niekonkretne i nieprecyzyjne na tyle, że konsument sam może zinterpretować je na wiele sposobów, np. „w stu procentach naturalne”, co może dotyczyć również takich substancji trujących jak formaldehyd, inaczej aldehyd mrówkowy, lub „wolny od chemikaliów”, co w obecnych czasach jest praktycznie niemożliwe.

**Grzech nieistotności** – w tym przypadku informacje zawarte na produkcie mogą być jak najbardziej prawdziwe i jednocześnie kompletnie nieistotne, ponieważ mogą dotyczyć substancji dawno zakazanych i wykluczonych z użytku, takich jak np. raktopamina, adrenosteron czy freony.

**Grzech łgarstwa** – opiera się po prostu na celowym przekazywaniu nieprawdziwych i niepopartych faktami informacji, np. używaniu certyfikatów niezgodnie z prawem, lub nieprawdziwych danych o przydatności do recyklingu.

**Grzech mniejszego zła** – pokazywanie i podkreślanie, że dany produkt pozytywnie wyróżnia się na tle innych w danej kategorii, która i tak w rzeczywistości w całości jest szkodliwa nie tylko dla środowiska, ale również dla zdrowia.

Futtera Sustainability Communication pokazuje jeszcze więcej oznak greenwashingu, do których zalicza się dodatkowo nieprecyzyjny język, żargon czy pojęcia naukowe, a nawet stosowanie barw lub elementów nasuwających myśl o ekologicznych walorach produktu (*Greenwashing...* 2023; POLADA 2022; Karwowska 2020).

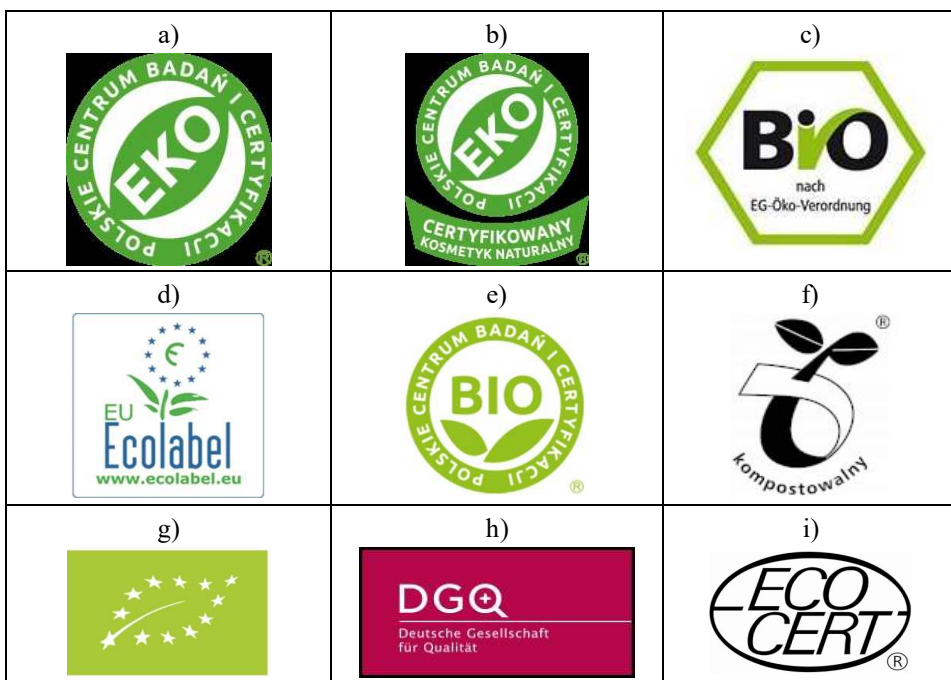
## Nieświadomość i brak wiedzy a wybory konsumentów

W 2020 roku Centrum Badań Opinii Społecznej opublikowało komunikat dotyczący świadomości ekologicznej Polaków w porównaniu z rokiem 2011 i innymi latami. Wyniki badań i wnioski, które zostały wyciągnięte, pokazały, że wzrósł odsetek badanych deklarujących zwracanie uwagi i unikanie produktów szkodliwych dla społeczeństwa z 72 do 78%. Jednocześnie podniósł się odsetek badanych deklarujących sprzątanie napotkanych śmieci w środowisku naturalnym, np. w lasach, z 22 do 47%. Obawy związane ze środowiskiem naturalnym zarówno w skali lokalnej, jak i globalnej wyraża zdecydowana część badanych, co przynosi również skutki w ich sposobie działania i rozumienia pojęć związanych z ekologią. Wpływa to również na ich decyzje zakupowe. Jednak pewien

stopień społeczeństwa nadal nie przejmuje się i nie zwraca zbytnej uwagi na produkty, z których korzysta, w pełni ufając producentom. Swoje wybory związane z zakupami opiera na tym, co widzi na opakowaniach i co słyszy w reklamach bądź od innych klientów, albo pozostaje przy stałych markach, które znane są z wysokiej jakości. Pozwala to producentom w dalszym ciągu posługiwać się greenwashingiem, ubierając produkty w przyjemne dla oka barwy, wzory roślinne lub zwierzęce, krzykliwe hasła, niepełne czy kłamliwe informacje, a nawet symbole czy certyfikaty, których autentyczności część konsumentów i tak nie zna i nie sprawdza, a nawet kieruje się nimi, wybierając dany produkt (Patrzalek 2017; CBOS 2020).

### Świadomość ekologiczna a decyzje zakupowe

Konsumenci zainteresowani środowiskiem naturalnym znajdują podstawowe certyfikaty uregulowane prawnie, jednocześnie zwracają dużo większą uwagę na oznaczenia produktów, skład i dodatkowe informacje, które bardzo często sprawdzają w Internecie czy innych dostępnych źródłach i aplikacjach. Jest to grupa klientów, którymi ciężko manipulować.



**Rysunek 33.1.** Certyfikaty ekologiczne a) Certyfikat ekologiczny PCBiC, b) Certyfikowany kosmetyk naturalny, c) Ekologiczny certyfikat Bio-Siegel, d) Certyfikat ekologiczny EU Ecolabel, e) Certyfikat BIO, f) Znak Seedling, g) Certyfikat ekologiczny Euroliść, h) Deutsche Gesellschaft für Qualität, i) Certyfikat ekologiczny Ecocert

Źródło: (FIIA)

Greenwashing jest dość niebezpieczną dla przedsiębiorstwa taktyką, ponieważ mimo tego, że odzew wśród społeczeństwa jest podzielony, to może przynieść wiele szkód. Świadoma grupa może bowiem zrezygnować z produktów oferowanych przez danego producenta, jednocześnie tracąc zaufanie do marki, przez co nie tylko ucierpią elementy reklamowane przez taką taktykę, ale wszystkie znajdujące się w ofercie. Kolejnym minusem będzie zaburzenie celów i działań konsumenta, który traci wiarę w to, że jego próba bycia eko może się powieść (Smurfit Kappa 2023).

## Podsumowanie

Wszelkie nadużycia w sferze marketingu, również te związane bezpośrednio z greenwashingiem, wpływają negatywnie na obraz przedsiębiorstwa w oczach konsumenta. Działanie takie w połączeniu ze wzrostem świadomości ekologicznej społeczeństwa powodują, że postawa wobec różnych inicjatyw związanych z ochroną środowiska przyjmowana jest z dużym dystansem i nieufnością wobec intencji producenta. W niektórych przypadkach może prowadzić to do sytuacji, w której klienci zaczną wątpić w sens oraz skuteczność własnego zaangażowania i podejmowania jakichkolwiek starań o środowisko naturalne. Dlatego ważne jest, aby marketingiem w przedsiębiorstwie zajmowała się osoba posiadająca odpowiednie kompetencje i wiedzę na tematy prawne, która weźmie również pod uwagę, w jaki sposób przekazywane informacje mogą zostać zinterpretowane i odebrane przez potencjalnych klientów.

Marketing sam w sobie jest czymś dobrym dla przedsiębiorstwa, zwłaszcza gdy opiera się na rzetelnych informacjach i faktach przekazywanych w sposób czytelny. Zwraca on uwagę konsumenta, buduje zaufanie i siłę marki, stawiając produkt w jak najlepszym i najkorzystniejszym świetle. Taka technika powoduje, że konsument jest skłonny z całej grupy artykułów wybrać właśnie ten konkretny.

## Literatura

1. CBOS 2020, [https://www.cbos.pl/SPISKOM.POL/2020/K\\_163\\_20.PDF](https://www.cbos.pl/SPISKOM.POL/2020/K_163_20.PDF) (dostęp: 12.03.2023).
2. Grzybowska-Brzezińska M., Rudzewicz A. (2013), *Wpływ marketingu sensorycznego na decyzje konsumentów (znaczenie zmysłów)*, „Handel Wewnętrzny”, 6(347), s. 68-79.
3. FIIA, *Certyfikaty ekologiczne*, <https://fiia.pl/blog/certyfikaty-ekologiczne> (dostęp: 07.03.2023),
4. Kłós L. (2015), *Świadomość ekologiczna Polaków – przegląd badań*, „Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania”, 42, 2, s. 35-44.
5. *Greenwashing...* (2023), <https://wlaczoszczedzenie.pl/greenwashing-ekosciema-czyli-zielone-klamstwo/> (dostęp: 08.03.2023).
6. POLADA (2022), *Lista substancji i metod zabronionych 2023*, <https://anty doping.pl/lista-substancji-i-metod-zabronionych-2023/> (dostęp: 10.03.2023).

7. Karwowska J. (2020), *Co to jest greenwashing?*, <https://gazeta.sgh.waw.pl/po-prostu-ekonomia/greenwashing-swiadome-czy-nieswiadome-wprowadzanie-klienta-w-blad> (dostęp: 10.03.2023).
8. Patrzalek W. (2017), *Znaczenie świadomości ekologicznej w zachowaniach konsumentów*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu”, 501, s. 11-23.
9. Smurfit Kappa (2023), <https://esklep.smurfitkappa.pl/blog/post/ekologia-w-e-commerce-dlaczego-to-takie-wazne> (dostęp: 12.03.2023).
10. Szrajnert R. (2023), *Marketing – co to jest?*, <https://uniqueseo.pl/marketing/> (dostęp: 06.03.2023).

## Impact of Marketing Activities on Purchase Decisions Customers

**Abstract:** Marketing is the primary tool used by companies to disseminate their products and services. Properly conducted activities combined with interesting and catchy advertising carried out on TV, radio or on social media, build trust between the manufacturer and the customer, while strengthening the brand strength. Spreading in recent years, the phenomenon of greenwashing has become noticeable on many levels. Such a practice has a contradictory response. On the one hand, there is a group of customers with low environmental awareness, who are not only unfamiliar with the symbols, markings, but equally often do not even check them and they do not evoke any emotion or much interest. This is a group of people who, when buying, are guided by other priorities e.g.: price, availability, habits, and even visual effect. On the other hand, there is an emerging social group, for whom the environment and the impact on it of companies' and their own actions are an important aspect in decision-making. This group has a basic knowledge of certifications or regulations. Before buying, they check the composition of products, the harmfulness of the contained substances, and even the overall activities of the brand and whether they are in line with their beliefs and actions.

**Keywords:** ecology, greenwashing, marketing



## Rozdział 34

# Ramię diagnostyczne inspekcyjnego robota mobilnego w technologii druku 3D

Patrycja Krason, Kinga Dygudaj, Tomasz Kowalik, Jakub Gutze, Nadia Koperska  
Tomasz Garstka, Marcin Kwapisz

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono budowę diagnostycznego manipulatora dla mobilnego robota inspekcyjnego własności związanych z jakością kształtowych wyrobów stalowych. Konstrukcja robota rozwijana jest sukcesywnie przez członków Studenckiego Koła Naukowego Mechatroniki Mecatoo. Elementy ramienia zostały wykonane w technice druku 3D, a do jego napędu zastosowano cyfrowe serwomechanizmy. Na obecnym etapie prac ramię diagnostyczne zostało wyposażone w kamerę systemu wizyjnego przekazującą obraz badanego wyrobu, co pozwala na dodatkową analizę stanu powierzchni w miejscu wykrycia wad.

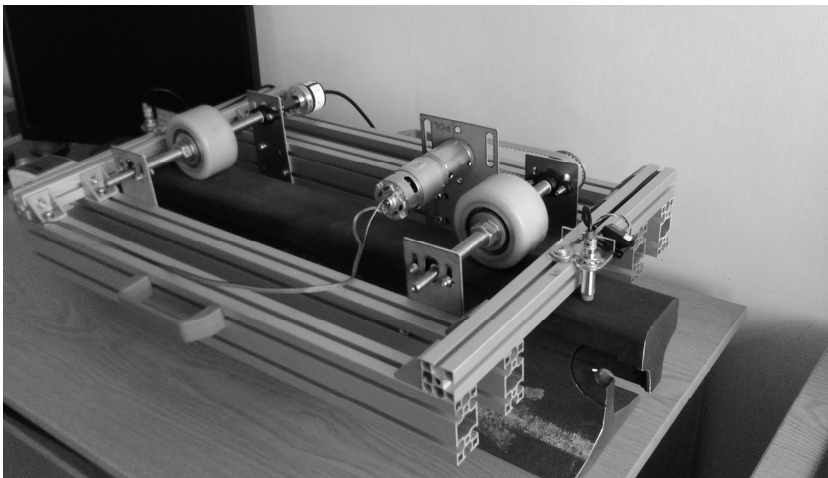
**Słowa kluczowe:** druk 3D, robot inspekcyjny, ramię robota, kamera, system wizyjny

## Wprowadzenie

Jednym z etapów życia stalowych wyrobów konstrukcyjnych pełniących odpowiedzialne funkcje jest badanie ich jakości, własności mechanicznych czy wykrywania defektów, zarówno bezpośrednio po procesie produkcyjnym, jak i w trakcie ich eksploatacji. Dotyczy to m.in. szyn czy kształtowników konstrukcyjnych mających zastosowanie w inżynierii lądowej (Towpik 2017; Kowalczyk i in. 2019). Objęcie szerokim zakresem badań dużych partii wyrobów bądź będących w użytkowaniu jest możliwe tylko przy zastosowaniu metod nieniszczących. W odniesieniu do badania stanu naprężeń mechanicznych czy wykrywania wad i defektów do metod podatnych na automatyzację czy robotyzację należy zaliczyć głównie metodę ultradźwiękową (Rawicki i in. 2018) oraz metody bazujące na zjawiskach magnetycznych, jak np. metoda Barkhausena (Ding i in. 2018). W ramach prac Studenckiego Koła Naukowego Mechatroniki Mecatoo na Wydziale Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów PCz od kilku lat



rozwijana jest konstrukcja mobilnego robota inspekcyjnego (rys. 34.1), stanowiącego bazę transportową dla aparatury diagnostycznej, która służy np. do pomiaru naprężeń własnych w wyrobach kształtowych (Garstka 2008). Robot ten stanowi swoisty poligon doświadczalny do zdobywania przez członków Koła nowej wiedzy i praktycznych umiejętności związanych z automatyką i robotyką, inżynierią materiałową oraz szeroko rozumianą inżynierią produkcji. Ostatnim rozszerzeniem tej konstrukcji jest zbudowane uniwersalne ramię diagnostyczne. Może ono być nośnikiem dodatkowych czujników, głowic pomiarowych (Garstka i in. 2022) czy efektorów (np. urządzeń znakujących), a przede wszystkim kamery systemu wizyjnego przesyłającego w czasie rzeczywistym do operatora obraz, np. miejsca, w którym wykryto koncentrację naprężeń.



**Rysunek 34.1.** Szczegóły budowy i konstrukcji układu jezdnego robota

Źródło: Opracowanie własne

## Charakterystyka konstrukcji ramienia

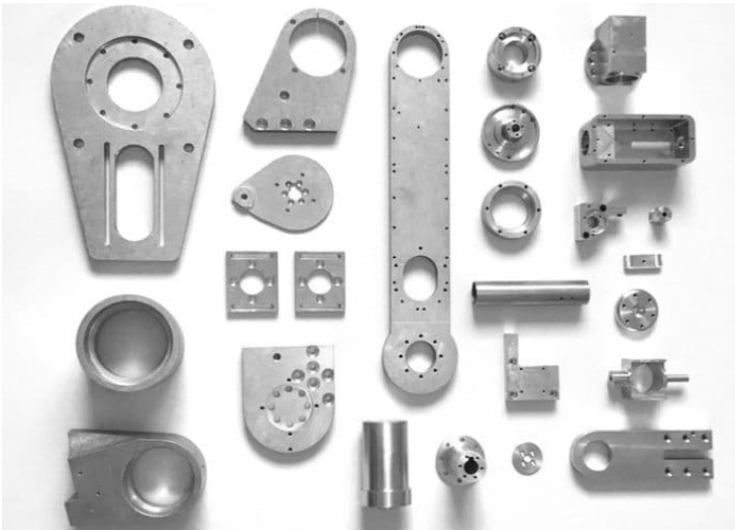
Budowę ramienia oparto na akademickim projekcie *Open Academic Robot Arm* (NIST 2015), dla którego udostępnione zostały modele 3D (rys. 34.2) poszczególnych elementów w serwisie [thingiverse.com](https://www.thingiverse.com/thing:368804) (<https://www.thingiverse.com/thing:368804>).

W zakresie struktury kinematycznej ramienia (rys. 34.3) trzy podstawowe osie główne są połączone przegubowo, umożliwiając ruch zespołu osi dłoni w płaszczyźnie XY. Do ich napędu zostały użyte serwomechanizmy cyfrowe Dynamixel AX-12A, przy czym napędy dolnej części ramienia względem podstawy zintegrowanej z konstrukcją jezdną zostały zdublowane ze względu na relatywnie duży ciężar całości ramienia w stosunku do jego kilkudziesięciocentymetrowego zasięgu. Identyczne serwomechanizmy, ale pracujące jako przeguby osiowe w dłoni, umożliwiają realizację obrotu narzędzia wokół osi X i Y.



Realizacja druku 3D, pomimo dużej różnorodności rozwiązań, sprowadza się do podstawowej zasady polegającej na nakładaniu kolejnych warstw materiału konstrukcyjnego. Obecne realizacje druku 3D można podzielić na cztery rodzaje: FDM/FFF (Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication), SLA (Stereolitografia), SLS (Selective Laser Sintering) i CJP (Color Jet Printing).

Metodą druku 3D użytą do wykonania elementów ramienia robota była FDM/FFF. Metoda ta jest najbardziej powszechna ze względu na stosunkowo proste rozwiązanie techniczne i niski koszt wydruków. Polega ona na układaniu warstw z wytłaczanego przez dyszę tworzywa (ang. *filament*), który jest podgrzany do zadanej temperatury topnienia zależnej od parametrów tworzywa.



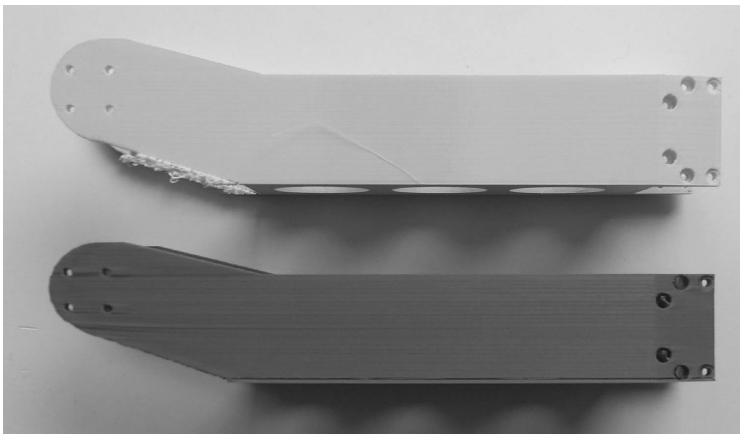
**Rysunek 34.4.** Przykładowe elementy ramienia robota o zbliżonej konstrukcji, wykonane z aluminium

Źródło: (Geeky Gadgets 2018)

Oprogramowanie steruje kierunkiem przemieszczania głowicy oraz prędkością wytłaczania filamentu. Naniesienie kolejnej warstwy następuje poprzez podniesienie dyszy drukującej o grubość warstwy lub obniżenie stołu roboczego, jest to zależne od konstrukcji drukarki 3D. Dokładność wydruków zależy od średnicy dyszy i precyzji układu jej pozycjonowania, ale przede wszystkim od właściwości krzepnięcia filamentu. Z uwagi na metodykę nanoszenia warstw drukowanie w większości odbywa się przy użyciu jednego filamentu. W najnowszych urządzeniach zaimplementowane są rozwiązania kilkugłowicowe, pozwalające na wydruki z dwóch materiałów. Kolejną wadą metody FDM jest konieczność umieszczenia drukowanej warstwy na podkładzie, ponadto rozpuszczony filament musi mieć podporę zanim zastygnie. Nie jest więc możliwe wydrukowanie elementów wystających z powierzchni obiektu bez dodatkowego drukowania specjalnych podpór. Podczas drukowania w metodzie FDM/FFF najczęściej stosowane są dwa

materiały: ABS (terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy) oraz PLA – (poliaktyd, inaczej poli(kwas mlekowy)).

Początkowo elementy ramienia robota drukowano przy użyciu drukarki jednogłowicowej Zortrax M200. Materiałem użytym do druku był PLA, średnica dyszy 0,4 mm (standardowa dysza używana podczas większości wydruków), wysokość warstwy 0,19 mm, prędkość druku 40 mm/s. Istotnym problemem był skurcz i odklejanie się wydruku wystających fragmentów dużych elementów, co skutkowało ich finalnym zniekształceniem i nietrzymaniem krytycznych wymiarów końcowych w newralgicznych miejscach, jak np. punktach mocowania serwomechanizmów (rys. 34.5). W związku z powyższym do drukowania użyto dwugłowicowej drukarki Raise3D Pro 2.

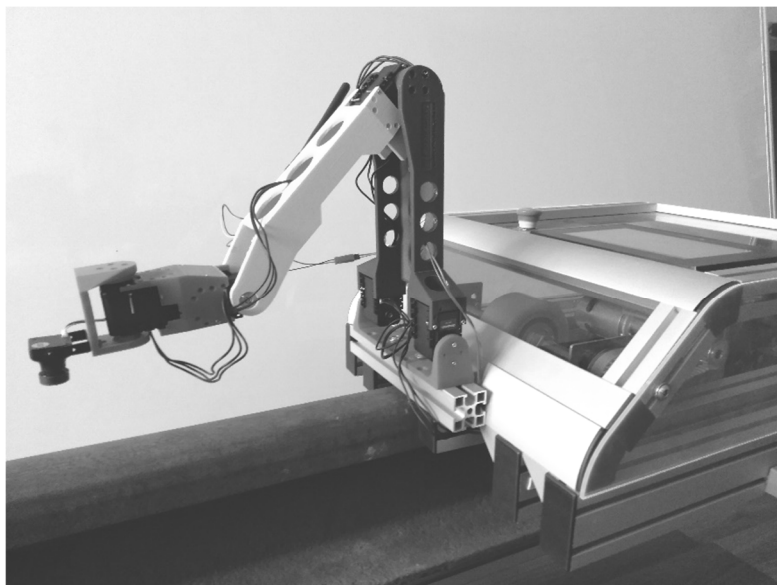


**Rysunek 34.5.** Widok zniekształconej i prawidłowo wydrukowanej jednej z części ramienia

Źródło: Opracowanie własne

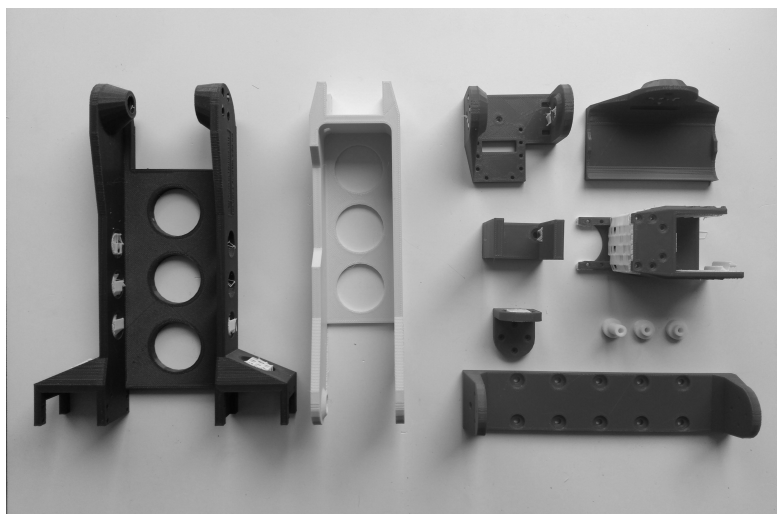
Zastosowano również filament PLA dla obu dysz, lecz w celu łatwiejszego usuwania podpór użyto różnych kolorów w poszczególnych dyszach. Parametry druku pozostawiono niezmienione. W tym przypadku osiągnięto wydruki odznaczające się pożądaną geometrią. Kompletny zestaw wydrukowanych elementów, wraz z częściowo pozostawionymi dla lepszego zobrazowania podporami z innego koloru (biały), przedstawiono na rys. 34.6.

Widok zmontowanego ramienia, w częściowo rozłożonej pozycji, przedstawiono na rys. 34.7. Ponieważ cała konstrukcja dotychczasowej części mobilnej była wykonana na bazie aluminiowych profili konstrukcyjnych 30 mm, podstawę ramienia o zbliżonej szerokości przykręcono do dodatkowej, wyprowadzonej na krótkich wspornikach półki z tego samego profilu. Na końcu ramienia, w miejscu montowania efektora, została umieszczona kamera FPV 1200TVL 1/4 systemu wizyjnego, składającego się ponadto z modulatora z nadajnikiem o mocy 600 mW, pracującym na częstotliwości 5,8 GHz oraz zintegrowanych gogli zawierających odbiornik i wyświetlacz.



**Rysunek 34.6.** Komplet wydrukowanych elementów ramienia diagnostycznego

Źródło: Opracowanie własne

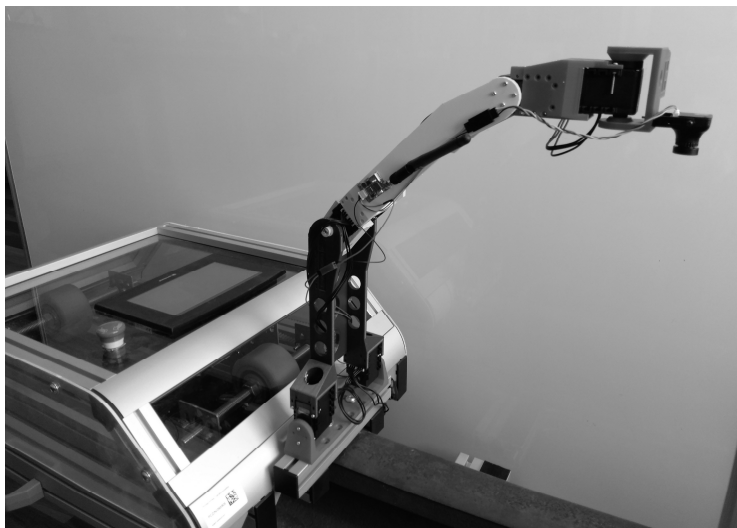


**Rysunek 34.7.** Widok zmontowanego ramienia

Źródło: Opracowanie własne

Na *rys. 34.8* przedstawiono wykonane ramię w pozycji rozłożonej. Na bocznej powierzchni górnej części ramienia widoczny jest moduł nadajnika z anteną, przesyłający obraz z kamery. Przykładowy widok, jaki jest w tej pozycji dostępny dla operatora sterującego zdalnie robotem i ramieniem, pokazano na *rys. 34.9*. Jest to

zdjęcie ekranu znajdującego się w goglach, na którym widać fragment szyny kolejowej, po której porusza się robot, jak również elementy jego konstrukcji.



**Rysunek 34.8.** Widok rozłożonego ramienia wraz z kamerą i nadajnikiem

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 34.9.** Zdjęcie obrazu z kamery umieszczonej na ramieniu robota, widoczny w goglach operatora, w położeniu jak na rysunku 34.8

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

Przedstawione w rozdziale ramię diagnostyczne, którego elementy konstrukcyjne zostały wykonane w technice druku 3D, stanowi znaczne rozszerzenie funkcjonalności dotychczasowego robota mobilnego budowanego przez SKN Mecatoo.

Jego budowa pozwoliła na zdobycie wiedzy i nabycie praktycznych umiejętności związanych z wyzwaniem, jakie pojawiają się podczas wydruku 3D dużych funkcjonalnych elementów, które następnie muszą ze sobą współpracować.

## Literatura

1. Ding S., Lin Y., Wang P., Zhu D. (2018), *Reduction of Thermal Effect On Rail Stress Measurement Based on Magnetic Barkhausen Noise Anisotropy*, „Measurement”, 125, s. 92-98.
2. Garstka T. (2008), *System pomiarowy do badań właściwości wyrobów stalowych z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena*, „Pomiary, Automatyka, Robotyka”, 6, s. 58-61.
3. Garstka T., Krakowiak M., Kwapisz M. (2022), *Zintegrowana głowica pomiarowa do badań metodą Barkhausena*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 11, s. 151-154.
4. Geeky Gadgets (2018), [www.geeky-gadgets.com/ar2-open-source-aluminium-6-axis-robot-arm-21-03-2018/](http://www.geeky-gadgets.com/ar2-open-source-aluminium-6-axis-robot-arm-21-03-2018/) (dostęp: 14.05.2023).
5. <https://www.thingiverse.com/thing:368804> (dostęp: 14.05.2023).
6. Kowalczyk D., Antolik Ł., Mikłaszewicz I. (2019), *Wady szyn kolejowych a badania ultradźwiękowe*, „Badania Nieniszczące i Diagnostyka”, 4, s. 9-13.
7. Kwapisz M. (2022), *Analiza wytrzymałości materiałów uzyskanych w technologii druku 3D*, [w:] Jakubus A., Perec A., Kostrzewa J. (red.) *Nowoczesne technologie w przemyśle. Inżynieria wytwarzania i konstrukcje maszyn*, s. 197-207, Akademia im. Jakuba z Paradyża w Gorzowie Wielkopolskim, Gorzów Wielkopolski.
8. NIST (2015), *The Confined Space Robotics Challenge*, <http://www.intelligentrobots.org/files/responserobotics/ConfinedSpaceChallenge-flyer-20150424-email.pdf> (dostęp: 14.05.2023).
9. Przybylski P. (2016), *Wykorzystanie technologii druku 3D w projektowaniu chwytaków robotów przemysłowych*, „Mechanik”, 7, s. 804-805.
10. Rawicki Ł., Kaczmarek K., Irek P., Hottowy G., Słania J. (2018), *Badania ultradźwiękowe szyn kolejowych*, „Badania Nieniszczące i Diagnostyka”, 2, s. 23-28.
11. Staniewski P. (2019), *Wpływ orientacji wydruku 3D na energię łamania*, [w:] Staniewska E. *Potencjał innowacyjny w inżynierii produkcji i technologii materiałów*, s. 497-500, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
12. Towpik K. (2017), *Możliwości oceny stanu naprężeń w szynach toru bezstykowego*, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej”, 25, s. 407-417.

## Diagnostic Arm of a Mobile Inspection Robot in 3D Printing Technology

**Abstract:** The chapter presents the construction of a diagnostic manipulator for a mobile inspection robot of properties related to the quality of shaped steel products. The construction of the robot is successively developed by members of the Mecatoo Mechatronics Student Scientific Association. The elements of the arm were made in the 3D printing technique, and digital servos were used to drive it. At the current stage of work, the diagnostic arm has been equipped with a vision system camera, transmitting the image of the tested product, which allows for additional analysis of the surface condition in the place of detecting defects.

**Keywords:** 3D printing, camera, inspection robot, robot arm, vision system



## Rozdział 35

# Metody zapewnienia bezpieczeństwa informatycznego aplikacji webowych

Kacper Foks, Sabina Szymoniak

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki

**Streszczenie:** Celem tego rozdziału jest zbadanie, jakie czynniki mają wpływ na bezpieczeństwo współczesnych aplikacji webowych. Przedstawiono proces implementacji aplikacji internetowej służącej do przeprowadzenia serii testów, badań i zwiększania bezpieczeństwa aplikacji internetowej. Aplikacja została przebadana przez popularne frameworki, które mają za zadanie zwiększenie bezpieczeństwa aplikacji internetowych. Badanie miało na celu sprawdzenie, jak wygląda proces implementacji aplikacji webowej, gdzie główny nacisk jest kładziony na jej bezpieczeństwo.

**Słowa kluczowe:** aplikacje internetowe, bezpieczeństwo, podatności

## Wprowadzenie

Aplikacje internetowe były niegdyś prostymi serwisami, często działającymi na jednym serwerze. W dzisiejszych czasach są to rozbudowane aplikacje złożone z wielu urządzeń, często umiejscowionych na całym świecie. Na rynku istnieje wiele dostępnych technologii oraz rozwiązań, które pozwalają na tworzenie coraz to bardziej skomplikowanych aplikacji webowych. Wiele z nich to biblioteki i frameworki, które potrafią przyspieszyć proces tworzenia aplikacji.

Ważnym aspektem działania aplikacji internetowych jest ich bezpieczeństwo. Bezpieczeństwo zawsze należy rozpatrywać na wielu różnych płaszczyznach. Pojawia się tutaj problem bezpieczeństwa użytkowników i ich danych, bezpieczeństwa urządzeń, które warunkują działanie aplikacji, bezpieczeństwa kluczy szyfrujących komunikację (Szymoniak i in. 2023) czy też bezpieczeństwa samej komunikacji.

Aplikacje internetowe przetwarzają ogromne ilości informacji i danych wprowadzonych przez użytkowników. Każda aplikacja wymaga przede wszystkim założenia konta. Konto chronione jest poprzez hasło, które tworzy użytkownik.



Jeżeli dojdzie do wycieku bazy danych, może się okazać, że użytkownik wykorzystuje to samo hasło np. w bankowości internetowej. Haker komputerowy, który przechwyci takie hasło, może je następnie wykorzystać, aby przejąć zawartość konta ofiary na swoje. Z tego powodu aplikację internetową należy zabezpieczać na każdym etapie jej działania, począwszy od projektu, poprzez jej implementację, skończywszy na jej utrzymaniu. Wszystkie błędy popełnione na etapie projektowania aplikacji będą oddziaływały na nią na dalszych etapach jej tworzenia i mogą się okazać trudne w naprawieniu. Tutaj kluczową rolę odgrywa OWASP TOP 10, czyli standardowy dokument dotyczący świadomości programistów i bezpieczeństwa aplikacji internetowych. Dokument ten reprezentuje szeroki konsensus co do najbardziej krytycznych zagrożeń dla bezpieczeństwa aplikacji internetowych. Każda aplikacja powinna być również regularnie sprawdzana pod kątem typowych podatności, na jakie narażone są tego typu aplikacje.

Celem tego rozdziału jest przedstawienie oraz zbadanie, jakie aspekty są kluczowe w celu zapewnienia bezpieczeństwa aplikacji internetowych, zaczynając od doboru technologii, poprzez konfigurację i wdrożenie aplikacji na serwer, a kończąc na utrzymaniu oraz dalszym rozwoju całego systemu. Aby trafnie zbadać cały proces implementacji aplikacji, włączanie z aspektami bezpieczeństwa, w ramach tego rozdziału została stworzona przykładowa aplikacja służąca do wymiany walut. Na podstawie stworzonej aplikacji przeprowadzono badania oraz testy bezpieczeństwa. Motywacją do podjęcia tego zagadnienia był niezmienny od lat wzrost liczby ataków na aplikacje webowe.

W rozdziale przedstawiono też pojęcia, które odgrywają kluczową rolę w procesie projektowania aplikacji internetowych oraz wszystkie etapy badawcze związane z tworzoną aplikacją internetową. Ostatnią sekcję tego rozdziału stanowi podsumowanie przeprowadzonych testów bezpieczeństwa i uzyskanych wyników.

## Teoretyczne aspekty bezpieczeństwa aplikacji internetowych

Dobór odpowiedniej i bezpiecznej technologii do danego projektu jest jednym z kluczowych oraz pierwszych aspektów bezpieczeństwa, które należy rozważyć przed rozpoczęciem pisania, a w późniejszym etapie wdrażania aplikacji internetowych. Ten aspekt nie dotyczy jedynie języka czy także coraz to bardziej popularnych bibliotek czy frameworków, ale także serwera webowego lub silnika bazy danych. Popularnością cieszą się rozwiązania, które są opracowane i rozwijane przez gigantów technologicznych, takich jak Meta Platforms czy Microsoft (Sajdak i in. 2019).

Tworząc aplikację internetową, warto wspomnieć o wielu różnych aspektach bezpieczeństwa. Pierwszym z nich jest integralność, która jest własnością danych w systemie informatycznym mającą na celu wykluczenie niekontrolowanego wprowadzenia zmian w danych (Integralność danych 2022). Naruszenie integralności danych może przypadkowe lub celowe. Walidacja polega na sprawdzeniu

poprawności danych przesłanych przez użytkownika. Rezultatem tej operacji jest zapewnienie, że przesłane dane są poprawne oraz przydatne dla działania systemu informatycznego. Ważną kwestią są również hasła użytkowników. W systemie informatycznym hasło nie powinno być przechowywane w formie jawnej, ponieważ podczas potencjalnego wycieku dane uwierzytelniające mogą zostać łatwo wykorzystane przez atakujących, co zagraża bezpieczeństwu aplikacji oraz ich użytkowników. Szyfrowanie powinno odbywać się za pomocą funkcji skrótu, których wynikiem są hasze. Przykładową funkcję skrótu jest algorytm SHA256, który wchodzi w skład zestawu kryptograficznego SHA-256. Aktualnie najbezpieczniejszą metodą przechowywania haseł statycznych są funkcję PBKDF, które oprócz funkcji skrótu mają dodatkowe mechanizmy wpływające na bezpieczeństwo haseł statycznych. Wynikiem działania funkcji PBKDF jest klucz (Cortez i in. 2020; Choi i in. 2021).

Identyfikacja jest deklaracją mającą na celu potwierdzenie tożsamości danego użytkownika, która polega na dostarczeniu pewnych unikatowych informacji w danych systemie o danej tożsamości. W systemach informatycznych jest to najczęściej adres e-mail lub pseudonim użytkownika. Po operacji identyfikacji następuje proces weryfikacji podanej przez użytkownika tożsamości, czy jest ona prawdziwa, czy fałszywa. Na tym etapie aplikacja weryfikuje, czy podane dane uwierzytelniające są takie same, jak podczas rejestracji konta w danym systemie. Autoryzacja jest krytycznym działaniem w procesie kontroli dostępu, dlatego to działanie powinno być w szczególności dobrze zabezpieczone, aby uniknąć incydentów naruszenia bezpieczeństwa danego systemu informatycznego. Wynikiem tego procesu jest decyzja, czy dany użytkownik może wykonać daną operację lub mieć dostęp do odpowiednich zasobów.

Polityka haseł to zbiór wymagań złożoności haseł w systemie informatycznym. Ma on na celu poprawę bezpieczeństwa użytkowników poprzez tworzenie odpowiednio złożonych haseł. Zasady te mogą się różnić w zależności od wymagań lub potrzeb konkretnej aplikacji. W celu poprawy bezpieczeństwa zespół CERT Polska publikuje polską wersję haseł z upublicznionych wycieków danych użytkowników. Baza aktualnie zawiera około milion upublicznionych haseł, które są posortowane w kolejności od najbardziej do najmniej popularnych. Lista jest publikowana w celu ułatwienia wdrożenia rekomendowanej przez zespół polityki haseł.

Najbardziej fundamentalnym aspektem bezpieczeństwa systemów operacyjnych są regularne aktualizacje systemowe, które mogą w łatwy sposób usunąć wiele podatności. Brak aktualizacji jest częstą przyczyną ataków na systemy operacyjne. Dodatkowo należy pamiętać, że aktualizacje mogą być podatne na luki bezpieczeństwa typu 0-day, co oznacza, że nie zostały one wcześniej wykryte. Luki tego typu często istnieją podczas opracowywania danego produktu i obrona przed atakami 0-day jest trudna.

Nagłówki zabezpieczeń to zbiór poleceń lub dyrektyw, które są wymieniane pomiędzy przeglądarką a serwerem webowym (Nagłówki zabezpieczeń HTTP 2022).

Zbiór dyrektyw informuje, co może być wyświetlane przez daną witrynę, a co powinno zostać zablokowane. Jest to łatwy sposób na zwiększenie bezpieczeństwa aplikacji internetowych. Przykłady nagłówków bezpieczeństwa:

- Content Security Policy – nagłówek zabezpiecza przed atakami polegającymi na wstrzyknięciu fragmentu kodu języka skryptowego, który może być uruchomiony w przeglądarce.
- X-XSS-Protection – nagłówek blokujący ładowanie strony, jeżeli wyfiltruje podejrzaną zawartość przesłanych przez użytkownika danych.
- HTTP Strict Transport Security – nagłówek, który automatycznie przenosi ruch sieciowy z HTTP na szyfrowany HTTPS, chroniąc przed przechwytywaniem pakietów.
- X-Frame-Options – ogranicza listę domen, jaka może być umieszczana w tagach HTML: frame, iframe, object. Nagłówek został wprowadzony jako zabezpieczenie przed atakami typu Clickjacking.
- Secure – jest to specjalna dyrektywa, która dotyczy plików cookie. Wymusza ona, aby żądanie odbywało się jedynie poprzez szyfrowany kanał HTTPS. Nagłówek zabezpiecza plik cookie przed potencjalnym przechwyceniem przez nieszyfrowany kanał komunikacji http.
- HTTP Only – jest to flaga do plików cookie, która blokuje możliwość odczytu ciasteczka w inny sposób niż HTTP. Flaga znacznie wpływa na bezpieczeństwo aplikacji w przypadku wystąpienia podatności XSS, ponieważ wtedy flaga blokuje możliwość przejęcia pliku cookie przez atakującego.

## Projektowanie, implementacja i badanie bezpieczeństwa aplikacji internetowej

W celu przedstawienia oraz zbadania, jakie aspekty są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa aplikacji internetowych, została stworzona przykładowa aplikacja w języku angielskim służąca do wymiany walut. Analiza kluczowych aspektów związanych z bezpieczeństwem wiązała się z doбором technologii, konfiguracją aplikacji, jej wdrożeniem na serwer, a także utrzymaniem aplikacji oraz dalszym rozwojem całego systemu. Stworzona aplikacja posłużyła do przeprowadzenia badań i testów bezpieczeństwa.

Zaimplementowana aplikacja uwzględniła walidację po stronie klienta za pomocą biblioteki Yup (Biblioteka react-yup 2023), a także haszowanie haseł za pomocą algorytmu SHA-256, aby utrudnić potencjalnemu atakującemu przejęcie hasła w formie jawnej poprzez podsłuchiwanie przesyłanych wiadomości. Podczas projektowania aplikacji założono, że minimalna długość hasła wynosi 12 znaków, natomiast maksymalna jego długość 64 znaki. Dodatkowo w panelu rejestracji utworzono wskaźnik, który pokazuje siłę aktualnie podanego hasła. Ten zabieg ma na celu uświadomienie użytkownikowi złożoności jego hasła. Poprzez interaktywną i ciekawą formę prezentacji siły aktualnego hasła użytkownik

powinien zostać zainteresowany wypełnieniem całego wskaźnika, co pozytywnie wpłynie na jego bezpieczeństwo. Panel rejestracji użytkownika został przedstawiony na rys. 35.1.

**Cloud**

## Registration

Email address  
kacf0719@gmail.com ✓

Password

Hide password

Password requirements: [How to create strong password?](#)

- The password should be 12-64 characters long

Required

Confirm password

Hide confirm password

Required

Already have an account? [Sing in](#)

**Sign up**

© Created and powered by Kacper Foks 2023

**Rysunek 35.1.** Panel rejestracji użytkownika

Źródło: Opracowanie własne

Z kolei po stronie serwera walidowane są obiekty służące do przesłania danych przez sieć (Obiekty typu Data Transfer Object 2023). Ponadto zostało tutaj wdrożone haszowanie haseł na pomocą algorytmu PBKDF2-HMAC-SHA256, której największą zaletą jest automatyczne dodawanie soli podczas haszowania hasła. Zastosowanie funkcji haszujących znacznie zwiększa czas potrzebny na złamanie hasła, po potencjalnym jego wycieku z bazy danych. Ważnymi aspektami aplikacji są również mechanizmy uwierzytelnienia oraz autoryzacji użytkowników, które umożliwiają zarządzanie tożsamością użytkowników oraz dodawanie i przypisywanie im roli (ASP. Net Identity 2023). Walidacja uwzględnia również mechanizm ograniczania ilości niechcianych i tymczasowych kont w aplikacji, który odrzuca tymczasowe domeny adresów e-mail (Tymczasowe domeny adresów e-mail 2023).

Zalogowany użytkownik ma dostęp do trzech funkcjonalności: przeglądanie aktualnych kursów walut, obliczanie kursu walut z PLN na kilka walut obcych, zmiana hasła użytkownika. Aplikacja zawiera również mechanizm przypomnienia

hasła, który umożliwi bezpieczne jego zresetowanie i ponownie ustawienie. Panel przeglądania kursu wymiany walut został przedstawiony na rys. 35.2.

The screenshot shows a web interface for currency calculations. At the top, the title 'Currency calculations' is centered. Below it, there is a form with the following elements:
 

- A text input field containing '1000' with 'PLN' written above it.
- A dropdown menu labeled 'Currency' with 'GBP' selected.
- Text indicating 'Currency rate: 5.3711'.
- Text indicating 'Calculation: 186.18 GBP'.

**Rysunek 35.2.** Kurs wymiany PLN na GBP

Źródło: Opracowanie własne

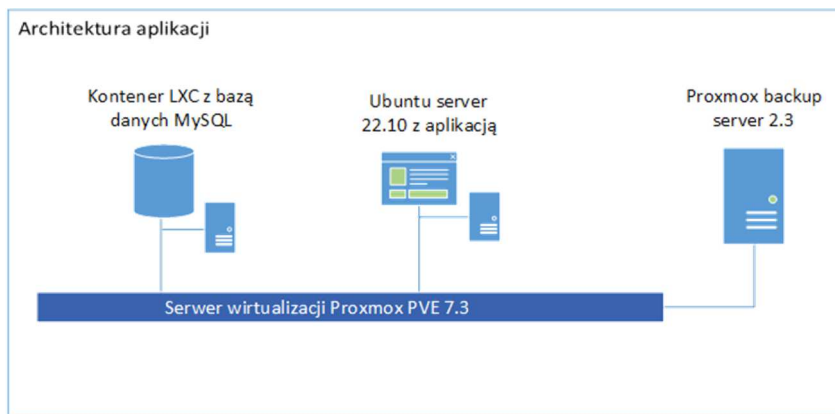
Administrator aplikacji może wykonywać te same operacje co zwykły użytkownik, ale dodatkowo może wysłać wiadomości do wszystkich użytkowników aplikacji, czyli poinformować wszystkich użytkowników o aktualizacjach, awariach, a także o możliwym wycieku haseł lub ataku na aplikację. Na wszystkich urządzeniach zostały wygenerowane klucze SSH przy pomocy algorytmu Ed25519. Aplikacja została wdrożona na serwerze o parametrach wyspecyfikowanych w tab. 35.1.

**Tabela 35.1.** Specyfikacja techniczna serwera

Procesor	AMD FT3 A4-5000 Quad-Core
Płyta główna	ASRock QC5000-ITX
Pamięć RAM	2 x 4 GB DDR3 1600 MHz
Dyski twarde	1 x SSD 120 GB, 2 x HDD 750 GB
Zasilacz	Chieftec GPS-450AA-101A 450 W
Obudowa	Cooler Master Elite 110

Źródło: Opracowanie własne

Aplikacja składa się z czterech urządzeń. Głównym urządzeniem jest serwer wirtualizacji z systemem Proxmox PVE, na nim są zaimplementowane dwa inne systemy. Pierwszym z nich jest system Ubuntu server wraz z główną aplikacją, natomiast drugim urządzeniem jest kontener LXC wraz z silnikiem bazy danych MySQL. System Proxmox backup server wraz z kopiami zapasowymi został zainstalowany i skonfigurowany na innym serwerze. Takie działanie ma na celu zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodności kopii zapasowych w sytuacji awarii głównego systemu. Architektura aplikacji została przedstawiona na rys. 35.3.



Rysunek 35.3. Diagram architektury aplikacji

Źródło: Opracowanie własne

## Testowanie bezpieczeństwa aplikacji

Testy bezpieczeństwa aplikacji zostały przeprowadzone zgodnie ze standardem OWASP TOP 10 z 2021 roku. Aplikację zbadano m.in. pod kątem następujących podatności:

- A01:2021-Broken Access Control – podatność, przed którą należy zabezpieczać się zarówno po stronie klienta, jak i serwera aplikacji. Po stronie klienta aplikacji został zaimplementowany mechanizm private routers, który przydziela odpowiedni dostęp do paneli użytkownika, na bazie roli otrzymanej od backendu aplikacji. W przypadku, gdy użytkownik nie jest zalogowany lub jego rola nie jest wystarczająca do otrzymania danych zasobów, użytkownik jest przekierowywany do strony z odpowiednimi dla niego uprawnieniami (Podatność typu Broken Access Control 2022).
- A02:2021-Cryptographic Failures – aplikacja korzysta z silnej funkcji SHA256 oraz PBKDF. Podatność występuje także w przypadku zakodowanych sekretów lub haseł w kodzie aplikacji. W aplikacji, wszystkie poufne dane są przechowywane w pliku appsettings.json, który służy do konfigurowania ustawień backendu aplikacji. Pliki konfiguracyjne nie powinny być przechowywane w repozytoriach gitowych, ponieważ zdobycie przez atakujących zawartych w nich poufnych informacji może mieć krytyczne skutki dla bezpieczeństwa całej aplikacji (Podatność typu Cryptographic Failures 2022).
- A03:2021-Injection – najbardziej podstawową, skuteczną i zalecaną metodą ochrony przed atakami typu SQL Injection są parametryzowane zapytania do bazy danych. Ponieważ nie jest stosowana konkatenacja ciągów znaków, ryzyko wystąpienia podatności SQL zostało zminimalizowane (Podatność typu Injection 2022).

- A04:2021-Insecure Design – podatność nie występuje ze względu na odpowiednie złożenia w procesie budowania aplikacji. Tutaj wybrano znane, pewne i bezpieczne metodologie budowy aplikacji, których poprawność została potwierdzona przez znane instytucje zajmujące się bezpieczeństwem oprogramowania. Podatność występuje w dużej mierze w starszych projektach, które wykorzystują niebezpieczne mechanizmy, jak mechanizm odzyskiwania poświadczeń za pomocą pytań i odpowiedzi, ponieważ nie jest to wystarczający dowód na potwierdzenie tożsamości użytkownika (Podatność typu Insecure Design 2022).
- A07:2021-Identification and Authentication Failures – za obsługę wszystkich mechanizmów identyfikacji, uwierzytelnienia i autoryzacji odpowiada framework ASP.NET Identity Core, który zapewnia wysoki poziom bezpieczeństwa tych kluczowych mechanizmów aplikacji (Podatność typu Identification and Authentication Failures 2022).
- A09:2021-Security Logging and Monitoring Failures – logowanie zdarzeń w aplikacji jest bardzo ważnym działaniem, które umożliwia analizę w wyniku nieprzewidzianego zachowania aplikacji nie tylko podczas ataku na system informatyczny, ale także do wykrywania anomalii czy błędów. W aplikacji są logowane wszystkie akcje wykonywane przez użytkownika, między innymi utworzenie konta, logowanie do systemu czy resetowanie hasła (Podatność typu Security Logging and Monitoring Failures 2023).
- A10:2021-Server-Side Request Forgery – zabezpieczenie przed SSRF z poziomu aplikacji polega w głównej mierze na sanityzacji oraz walidacji danych od użytkownika zarówno po stronie klienta, jak i serwera aplikacji. Najlepszą metodą zabezpieczeń przed tym atakiem jest stworzenie listy adresów IP, które są zaufane i mogą się łączyć z aplikacją. Natomiast stworzenie blokowanej listy dostępu lub użycie wyrażeń regularnych do blokowania niechcianych urządzeń nie jest dobrym rozwiązaniem, ponieważ atakujący korzystają między innymi z gotowych palyloadów i narzędzi, aby obejść to zabezpieczenie. Ważnym aspektem jest także wyłączenie przekierowań HTTP (Podatność typu Server-Side Request Forgery (SSRF) 2023).

Skanowanie aplikacji zostało przeprowadzone za pomocą narzędzi OWASP ZAP oraz Greenbone Security Assistant. Narzędzie OWASP ZAP wykryło podatność z nim związaną. Może się to wiązać z wysokim skomplikowaniem wdrożenia tego nagłówka. Dzięki przeprowadzonemu testowi można uzyskać informację odnośnie do istniejących podatności bądź luk w systemie. Narzędzie Greenbone Security Assistant wykryło kilka podatności, których rozwiązaniem jest aktualizacja. Po zaktualizowaniu serwera z systemem Proxmox PVE wykryte w nim podatności zostały usunięte.

Od początku tworzenia aplikacji jej kluczową cechą miało być bezpieczeństwo, mimo to dostępne narzędzie wykryły kilka podatności o poziomie istotności medium oraz kilka o poziomie low czy info/dobre praktyki.

Skanowanie aplikacji, podobnie jak kopie zapasowe powinny być uruchamiane regularnie i automatycznie. Główną różnicą pomiędzy tymi działaniami jest regularność samego uruchamiania. W większości przypadków proces skanowania powinien być uruchamiany raz w tygodniu. Zarówno narzędzie OWASP ZAP, jak i Greenbone oferują generowanie raportów, które można analizować w jeszcze łatwiejszy sposób. Proces wykrywania podatności nie jest działaniem wystarczającym. Po wykryciu danej podatności należy zastosować odpowiednie kroki w celu jej usunięcia lub ograniczenia związanych z nią konsekwencji. Oba narzędzia oferują podpowiedzi, w jaki sposób można usunąć luki bezpieczeństwa wykryte w przeskanowanych maszynach.

Nawet w przypadku sytuacji, gdy wszystkie narzędzia pokazują pozytywne wyniki przeprowadzonych testów, warto pamiętać, że prawdopodobnie w aplikacji istnieje co najmniej jedna podatność, o której nie ma informacji. Bardzo często mogą to być podatności typu Zero-day.

## Podsumowanie

Zapewnienie bezpieczeństwa współczesnych aplikacji webowych jest tematem bardzo złożonym i skomplikowanym, podobnie jak architektura i działanie samych aplikacji internetowych. Współczesne aplikacje webowe mają coraz to więcej nowych wektorów ataków, które atakujący mogą wykorzystać. Założenia dotyczące bezpieczeństwa aplikacji trzeba zaprojektować jeszcze przed stworzeniem pierwszego projektu i rozpoczęciem prac nad tworzeniem aplikacji. Jest to konieczne, aby minimalizować wystąpienie luk bezpieczeństwa.

Wiele dostępnych technologii w prosty sposób umożliwia bezpieczniejsze tworzenie aplikacji webowych. Należy pamiętać o tym, że te frameworki i biblioteki także mogą posiadać istniejące podatności, które na bieżąco należy wykrywać i eliminować. Warto wybierać rozwiązania sprawdzone i często wykorzystywane, dzięki czemu zwiększa się bezpieczeństwo nie tylko samej aplikacji, ale całego systemu informatycznego. Na bezpieczeństwo systemu znacząco wpłynąć może korzystanie z wielu dostępnych standardów dotyczących polityki haseł lub testowania bezpieczeństwa. Automatyzują one cały proces, często są łatwe we wdrożeniu i stanowią pewną gwarancję bezpieczeństwa. Na pewno są one lepszym wyborem, niż tworzenie własnych rozwiązań od zera.

Na rynku jest dostępnych wiele narzędzi, które ułatwiają proces testowania, wykrywania i usuwania podatności w systemach informatycznych. Są to rozwiązania zarówno płatne, jak i darmowe. Szeroki wachlarz tych narzędzi może zapewnić odpowiednie rozwiązania w zależności od budżetu i wielkości samej aplikacji.

Dążenie do zapewnienia bezpieczeństwa współczesnych aplikacji webowych jest ciągłym procesem wykrywania i usuwania nowych podatności. Często reakcja na wykrycie musi być bardzo szybka, aby nie udało się jej wykorzystać przez atakujących. Nie tylko same aplikacje się rozwijają, lecz także ich atakujący mają coraz to większe umiejętności, sprzęt oraz pomysły na sposoby złamania zabezpieczeń aplikacji internetowych.



## Literatura

1. ASP.Net Identity, <https://learn.microsoft.com/pl-pl/aspnet/identity/overview/getting-started/introduction-to-aspnet-identity> (dostęp: 20.01.2023).
2. Biblioteka react-yup, <https://www.npmjs.com/package/react-yup> (dostęp: 19.01.2023).
3. Choi H., Seo S.C. (2021), *Optimization of PBKDF2 using HMAC-SHA2 and HMAC-LSH Families in CPU Environment*, „IEEE Access”, 9, s. 40165-40177.
4. Cortez D.M.A., Sison A.M., & Medina, R. P. (2020), *Cryptanalysis of the Modified SHA256*, [w:] *Proceedings of the 2020 4<sup>th</sup> High Performance Computing and Cluster Technologies Conference & 2020 3<sup>rd</sup> International Conference on Big Data and Artificial Intelligence*, s.179-183, Association for Computing Machinery New York
5. Integralność danych, <https://gogolek.pl/Ksiazki/LEKSYKON.pdf> (dostęp: 25.12.2022).
6. Nagłówki zabezpieczeń HTTP, <https://www.wpoven.com/blog/http-security-headers/> (dostęp: 25.12.2022).
7. Obiekty typu Data Transfer Object, <https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/web-api/overview/data/using-web-api-with-entity-framework/part-5> (dostęp: 19.01.2023).
8. Podatność typu Cryptographic Failures, [https://owasp.org/Top10/A02\\_2021-Cryptographic\\_Failures/](https://owasp.org/Top10/A02_2021-Cryptographic_Failures/) (dostęp: 27.12.2022).
9. Podatność typu Insecure Design, <https://sekurak.pl/owasp-top-ten-2021-a04-insecure-design-przeglad-przypadkow/> (dostęp: 27.12.2022).
10. Podatność typu Injection, [https://owasp.org/Top10/A03\\_2021-Injection/](https://owasp.org/Top10/A03_2021-Injection/) (dostęp: 01.12.2022).
11. Podatność typu Broken Access Control, [https://owasp.org/Top10/A01\\_2021-Broken\\_Access\\_Control/](https://owasp.org/Top10/A01_2021-Broken_Access_Control/) (dostęp: 27.12.2022).
12. Podatność typu Identification and Authentication Failures, [https://owasp.org/Top10/A07\\_2021-Identification\\_and\\_Authentication\\_Failures/](https://owasp.org/Top10/A07_2021-Identification_and_Authentication_Failures/) (dostęp: 27.12.2022).
13. Podatność typu Security Logging and Monitoring Failures, [https://owasp.org/Top10/A09\\_2021-Security\\_Logging\\_and\\_Monitoring\\_Failures/](https://owasp.org/Top10/A09_2021-Security_Logging_and_Monitoring_Failures/) (dostęp: 05.01.2023).
14. Podatność typu Server-Side Request Forgery (SSRF), [https://owasp.org/Top10/A10\\_2021-Server-Side\\_Request\\_Forgery\\_%28SSRF%29/](https://owasp.org/Top10/A10_2021-Server-Side_Request_Forgery_%28SSRF%29/) (dostęp: 05.01.2023).
15. Sajdak M., Bentkowski M., Piosek M., Michalczyk A., Jadnicki R., Niezabitowski M., Czyż A., Trawiński G., Kamiński J., Widła B. (2019), *Bezpieczeństwo Aplikacji Webowych*, Securitum, Kraków.
16. Szymoniak S., Kesar S. (2023), *Key Agreement and Authentication Protocols in the Internet of Things: A Survey*, „Applied Sciences”, 13, 1, 404.
17. Tymczasowe domeny adresów e-mail, <https://github.com/unkn0w/disposable-email-domain-list> (dostęp: 10.01.2023).

## Methods of Ensuring IT Security of Web Applications

**Abstract:** The purpose of this chapter is to examine what factors affect the security of modern web applications. As part of the work, the process of implementing a web application was presented, which was used to carry out a series of tests, research and increase the security of the web application. The application has been tested by popular frameworks that are designed to increase the security of web applications. The study was aimed at checking the process of implementing a web application, where the main emphasis is placed on its security.

**Keywords:** internet applications, security, vulnerabilities

## Rozdział 36

# Wykorzystanie systemów wspomagania inżynierskiego w projektowaniu oraz analizie wytrzymałościowej felgi aluminiowej

Kamil Gryboś, Łukasz Lisiecki

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

**Streszczenie:** Trudnym zadaniem w dzisiejszych realiach byłoby wymienienie sprawnie funkcjonującego przedsiębiorstwa, które nie korzysta z rozwiązań informatycznych podczas realizowania swoich powinności. W przypadku firm z branż produkcyjnych nie jedyny, lecz niezastąpiony jest system typu PLM, którego zadaniem, w wolnym tłumaczeniu, jest zarządzanie cyklem życia produktu. Składa się on między innymi z oprogramowania do komputerowego wspomagania wytwarzania. Prężny rozwój komputerów realizowany poprzez zwiększanie ich mocy obliczeniowej, trwający nieprzerwanie od początku drugiej połowy XX wieku, daje możliwości programistom (początkowo na uczelniach, następnie w obszarze przedsiębiorstw produkcyjnych, obecnie w firmach specjalizujących się w tworzeniu oprogramowania) na ciągle udoskonalanie programów CAD/CAM/CAE. Dzięki nim unikamy błędów konstrukcyjnych już na etapie projektowania, redukujemy koszty oraz minimalizujemy czas wytworzenia wyrobu. W niniejszym rozdziale przedstawiono etapy projektowania elementu, na które składa się zaprojektowanie geometrii oraz badania wytrzymałościowe w wirtualnym środowisku oprogramowania SolidWorks, będące przykładem praktycznego wykorzystania omawianych systemów.

**Słowa kluczowe:** analiza, geometria, MES, projektowanie, symulacja, systemy CAD/CAM/CAE, systemy PLM

## Wprowadzenie

Praktyczny przykład zastosowania zintegrowanych systemów CAD/CAM/CAE, będący tematem tego rozdziału, udowadnia skuteczność, zwiększenie wydajności procesu projektowania oraz redukcję kosztów późniejszej produkcji elementu poprzez wykrycie oraz wyeliminowanie wad konstrukcyjnych jeszcze na etapie badania wirtualnego modelu. W ramach niniejszej pracy wykonano projekt felgi samochodowej w warunkach „pozaprzemysłowych”, wykorzystując

komputer klasy PC oraz oprogramowanie SolidWorks na licencji studenckiej, ogólnie dostępne dla studentów uczelni technicznych.

Tworząc projekt elementu pracującego w złożeniu z innymi elementami, a w szczególności podczas projektowania dla wymagającej branży automotive, oprócz nowoczesnej deski kreślarskiej oraz wirtualnego laboratorium wytrzymałościowego, które zawierają się w dobrze rozwiniętych programach do komputerowego wspomaganie projektowania, niezbędne jest posiadanie wiedzy na temat zagadnień inżynierskich, m.in. z zakresów mechaniki czy wytrzymałości materiałów. Należy także „podażać” za ówczesnym rynkiem części (w omawianym przypadku warto mieć rozeznanie w dostępnych na rynku oponach oraz felgach), aby rozpatrywany projekt mógł konkurować z już dostępnymi częściami oraz aby był w pełni użyteczny. Celem każdego konstruktora jest bowiem zaoferowanie elementu bardziej wytrzymałego, lżejszego oraz tańszego niż oferowany przez konkurencję.

Poza najbardziej oczywistą rolę felgi, jaką jest przenoszenie momentu obrotowego generowanego przez silnik pojazdu na opony, które to dzięki siłom tarcia wprawiają pojazd w ruch, jest również ochrona opon oraz wentylacja układu hamulcowego (Smogur 2018). Wraz z implementacją coraz większej liczby materiałów oraz procesów technologicznych do produkcji felgi zyskały również na przestrzeni lat rolę ozdobną, szczególnie dla samochodów osobowych.

Rodzaje felg możemy podzielić według różnych kryteriów, takich jak materiał, sposób produkcji czy budowa. Najczęściej jednak stosuje się podział ze względu na wykorzystany do ich produkcji materiał. W codziennej praktyce zwykle spotykane są elementy stalowe bądź aluminiowe. Felgi stalowe, będące najbardziej podstawowym rodzajem, są obecnie montowane głównie w pojazdach użytkowych, nierzadko można je również zauważyć w samochodach osobowych. Są tanie, łatwo dostępne oraz odporne na uszkodzenia mechaniczne. Mają także swoje wady – słabą odporność korozyjną, słabe odprowadzanie ciepła z tarczy hamulcowej oraz wyższą skłonność do pęknięcia niż felgi aluminiowe. Felgi aluminiowe są pozbawione wad ich stalowych odpowiedników – mają znacznie wyższą odporność na czynniki środowiskowe, są bardziej elastyczne oraz lepiej odprowadzają ciepło generowane w trakcie hamowania. Wykorzystując dzisiejsze, dobrze rozwinięte techniki wytwarzania, ich walory estetyczne stoją na wysokim poziomie.

Projekt opisany w niniejszym rozdziale dotyczy elementu aluminiowego. Stopy aluminium są materiałem coraz chętniej wykorzystywanym w branży automotive, gdyż materiały te mogą mieć tak samo dobre właściwości mechaniczne jak stal, będąc przy tym do 40% lżejszymi. Ponadto wykorzystanie elementów aluminiowych w konstrukcji całego pojazdu, poprzez redukcję jego masy, pozwala m.in. na redukcję ogólnoświatowej produkcji CO<sub>2</sub>, jak również na zmniejszenie zużycia paliwa (European Aluminium 2021).

Części aluminiowe mogą być odlewane lub kute. Dla felg aluminiowych opracowano hybrydową technologię FlowForm, łączącą oba te procesy. Dobrany

w projekcie materiał (aluminium A356) posiada skład chemiczny pozwalający na kształtowanie felgi w procesie odlewania niskociśnieniowego (LPDC) oraz na uzyskanie dobrych własności mechanicznych gotowego elementu. Krzem w zawartości 7% odpowiada za dobre właściwości odlewnicze, natomiast udział 0,3% magnezu zwiększa własności wytrzymałościowe po obróbce cieplnej (Tocci i in. 2015).

W celu określenia, czy zaprojektowana część będzie mogła pracować pod obciążeniami występującymi w rzeczywistych warunkach, a ponadto spełniać normy bezpieczeństwa, przeprowadza się testy na gotowych wyrobach. Warunki poszczególnych testów są zestawione w odpowiednich normach.

## Przyjęte założenia

Celem rozdziału było stworzenie projektu felgi o parametrach odpowiednich dla elementu ze średniej półki cenowej. Na wstępie określono model samochodu, dla którego będzie projektowana część. Dzięki temu, korzystając ze znormalizowanych wartości, możliwe było określenie wymiarów geometrycznych felgi niezbędnych do prawidłowego zamocowania w piaście samochodu oraz do montażu opony. Wybrany model samochodu to Opel Astra H 1.8i 2007, którego parametry niezbędne do przeprowadzenia późniejszych symulacji zestawiono w *tab. 36.1*.

**Tabela 36.1. Parametry samochodu Opel Astra 1.8i 2007 niezbędne do wykonania obliczeń dla felgi**

Parametr	Wartość
Masa samochodu z maks. obciążeniem [kg]	1750
Maksymalny moment obrotowy [Nm]	175 (przy 3800 rpm)
Zalecane ciśnienie w oponach [bar]	2,3 dla przedniej osi; 2,1 dla tylnej osi

Źródło: (Automobile Catalog 2021)

Dla wybranego modelu samochodu odpowiednie są felgi o oznaczeniu 6.5J15 ET35 oraz opony 195/60R15 (Wheel-Size 2021). Rozszyfrowanie oznaczenia felgi prowadzi do uzyskania następujących informacji na temat jej wymiarów geometrycznych (Oponeo 2021):

6.5 – szerokość felgi w calach;

J – oznaczenie profilu kołnierza, profil oznaczony literą J jest przeznaczony do samochodów osobowych;

15 – średnica felgi w calach;

ET35 – odległość powierzchni montażowej od linii symetrii felgi w milimetrach.

W *tab. 36.2* zestawiono wymiary oraz rozstaw śrub mocujących, których wartości są zależne od modelu samochodu.

**Tabela 36.2. Wymiary oraz rozstaw śrub mocujących**

Parametr	Wartość
Liczba śrub mocujących	5
Rozstaw śrub [mm]	110
Średnica otworu dla piasty [mm]	65,1
Rodzaj śrub	M12 x 1,5

Źródło: (Wheel-Size 2021)

Materiał, jaki przypisano do modelu, to aluminium A356-T2, który jest powszechnie stosowany do produkcji felg z wykorzystaniem procesu odlewania niskociśnieniowego. Założenia dotyczące testowania zostały zestawione w normach. Dodatkowo wykonano symulację odtwarzającą warunki znane z codziennego użytkowania samochodu.

Pierwszym testem był test obciążenia promieniowego wg normy SAE J2530 042016. Test ten polega na dociskaniu złożenia felgi z oponą do obracającego się bębna z siłą określoną wg poniższego wzoru:

$$F = WK \quad (1)$$

gdzie:

$F$  – obciążenie w kierunku promieniowym, N;

$W$  – nośność koła określona przez producenta, N;

$K$  – współczynnik obciążenia dobierany wg normy.

W opisywanym badaniu do obliczenia nośności koła przyjęto w uproszczeniu  $\frac{1}{4}$  masy samochodu z maksymalnym obciążeniem, wartość współczynnika obciążenia jako 2,5 (wartość odpowiednia dla kół aluminiowych odlewanych oraz kutych). Po podstawieniu wartości do wzoru (1) wartość obciążenia w kierunku promieniowym wyniosła 10 721,6875 N.

Drugie badanie było symulacją testu skręcania. Warunki przeprowadzania testu zawarto w normie SAE J2530 042016. Test ten polega na utwierdzeniu nieruchomo felgi w maszynie testującej. Na felgę działa moment siły przenoszony przez belkę będącą imitacją osi skrętnej samochodu. Wartość momentu siły jest określana na podstawie wzoru (2) wg ww. normy:

$$M = W (R\mu + d) S \quad (2)$$

gdzie:

$W$  – nośność koła określona przez producenta, N;

$R$  – promień koła (felga + opona), m;

$\mu$  – współczynnik tarcia pomiędzy oponą a podłożem (należy przyjąć 0,7);

$d$  – odległość powierzchni montażowej od linii symetrii felgi, m;

$S$  – współczynnik obciążenia dobierany wg normy.

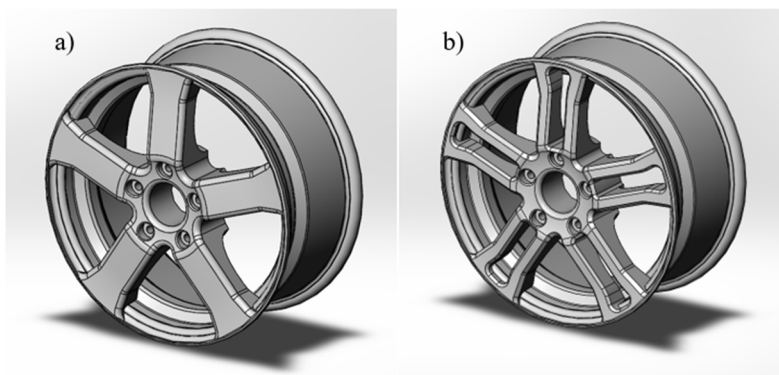
Po podstawieniu odpowiednich wartości do wzoru (2) otrzymano wartość momentu siły  $M = 2148,08 \text{ Nm}$ .

Ostatnie badanie miało na celu sprawdzenie, jak wygląda rozkład naprężeń w elemencie podczas warunków eksploatacyjnych. W tym celu zasymulowano dynamiczne ruszanie pojazdu z miejsca, podczas którego na koła samochodu działa duży moment obrotowy. Wykorzystano informacje o osiąгах samochodu (Automobile Catalog 2021), takich jak maksymalny moment obrotowy generowany przez silnik oraz odpowiadającą mu prędkość. Maksymalny moment obrotowy działający na koło w omawianym przypadku wynosi  $2485,51 \text{ Nm}$ .

Uzyskane wartości były podstawą do wykonania użytecznych badań w module symulacyjnym programu. Wraz z wykorzystaniem wiedzy inżynierskiej pozwoliły one na zasymulowanie rzeczywistych testów, których to rezultaty umożliwiły określenie, czy element jest bezpieczny. Omówienie badań stanowi następną część tego rozdziału.

## Wyniki badań

Zaprojektowanie geometrii felg uwzględniało zarówno zawarte w normach wymiary i kształty poszczególnych elementów części, jak i zmysł estetyczny konstruktora. Za pomocą narzędzi szkicu oraz szeregu operacji tworzenia brył oferowanych przez program wykonano dwa modele (rys. 36.1) w celu porównania ich własności wytrzymałościowych w późniejszych symulacjach.

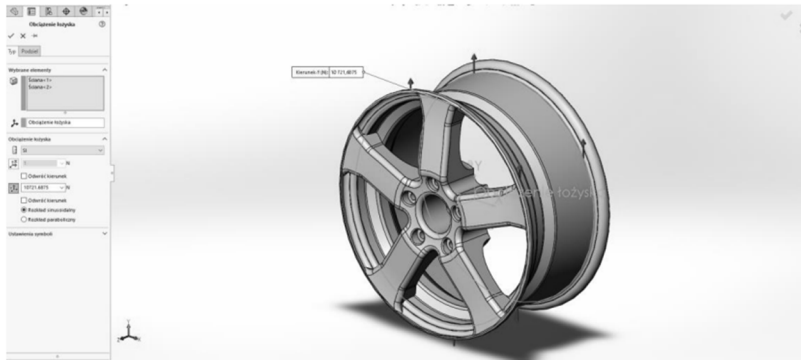


**Rysunek 36.1.** Modele wykonane w programie SolidWorks: a) pierwszy wariant, b) drugi wariant

Źródło: Opracowanie własne

Obliczone wcześniej wartości sił, momentów obrotowych czy momentów sił zaimplementowano w symulacjach testów. Podczas przygotowywania analizy (tzw. preprocessing) niezbędna okazała się wiedza na temat przeprowadzania testów w rzeczywistych warunkach. Pozwoliło to na poprawne określenie

warunków brzegowych (umocowania, obciążenia) oddających jak najwierniej stan, w jakim znajduje się element podczas testowania na urządzeniach laboratoryjnych bądź w warunkach eksploatacyjnych. Przykładową definicję obciążenia (dla testu zmęczenia promieniowego) przedstawiono na rys. 36.2. Umocowanie reprezentujące połączenie koła z piastą poprzez śruby zostało zdefiniowane jako unieruchomienie ścian otworów pod śruby, natomiast strzałki zwrócone grotami ku górze obrazują kierunek działającej siły oraz powierzchnie elementu poddane tej sile.



**Rysunek 36.2.** Okno definicji obciążenia

Źródło: Opracowanie własne

Program SolidWorks wykorzystuje metodę elementów skończonych w obliczeniach symulacyjnych. Metoda ta wymaga podzielenia badanego obiektu na skończoną liczbę elementów. Na model nakłada się siatkę dzielącą badany model na przyległe do siebie wielokąty, których rozmiarem można sterować. Gęstość siatki znacząco wpływa na jakość uzyskanych wyników.

W omawianym przypadku zastosowano standardową siatkę o rozmiarze globalnym wynoszącym 14 mm (globalny średni rozmiar elementu). Program, za pomocą polecenia Szczegóły, przedstawia użytkownikowi szereg parametrów siatki „nałożonej” na badany obiekt. Parametry siatek obydwu modeli przedstawiono na rys. 36.3.

Przeprowadzenie poszczególnych symulacji pozwoliło na uzyskanie informacji o stanach naprężenia, odkształcenia oraz przemieszczeniach w badanych elementach występujących pod zadanymi warunkami brzegowymi.

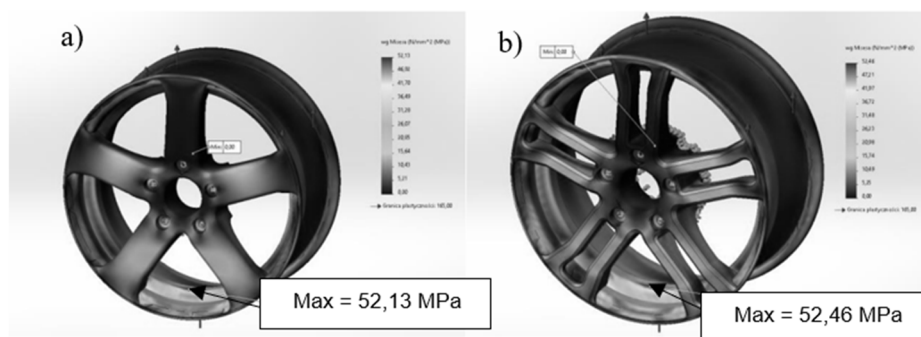
Symulacja testu obciążenia promieniowego, obecnego z racji utrzymywania ciężaru pojazdu przez element, przyczyniła się do zlokalizowania najwyższej wartości naprężenia występującego w miejscu styku z podłożem. Jego wartość w przypadku obydwu wariantów wynosiła około 52 MPa. Naprężenie o wartościach 15,3 MPa oraz 18,6 MPa (odpowiednio dla wariantu ze standardowymi ramionami i dla wariantu z perforacjami w ramionach) zostały wykryte na samych

ramionach. Intensywność naprężenia w całym modelu jest przedstawiona na rysunkach generowanych przez program (rys. 36.4).

Nazwa badania	Test zmęczenia promieniowego (Default)	Nazwa badania	Test zmęczenia promieniowego (Default)
Typ siatki	Siatka bryłowa	Typ siatki	Siatka bryłowa
Użyty generator siatki	Siatka standardowa	Użyty generator siatki	Siatka standardowa
Automatyczne przejście	Wyłączone	Automatyczne przejście	Wyłączone
Uwzględnij automatyczne pętle siatki	Wyłączone	Uwzględnij automatyczne pętle siatki	Wyłączone
Punkty jakobianu siatki wysokiej jakości	16 punktów	Punkty jakobianu siatki wysokiej jakości	16 punktów
Rozmiar elementu	14 mm	Rozmiar elementu	14 mm
Tolerancja	0,7 mm	Tolerancja	0,7 mm
Jakość siatki	Wysoka	Jakość siatki	Wysoka
Całkowita liczba węzłów	53726	Całkowita liczba węzłów	52816
Całkowita liczba elementów	30801	Całkowita liczba elementów	29314
Maksymalny współczynnik kształtu	28,171	Maksymalny współczynnik kształtu	29,148
Procent elementów o współczynniku kształtu <3	38,4	Procent elementów o współczynniku kształtu <3	41,7
Procent elementów o współczynniku kształtu >10	9,55	Procent elementów o współczynniku kształtu >10	9,33
Procent zniekształconych elementów	0	Procent zniekształconych elementów	0
Liczba zniekształconych elementów	0	Liczba zniekształconych elementów	0
Czas do ukończenia siatki (hh:mm:ss)	00:00:28	Czas do ukończenia siatki (hh:mm:ss)	00:00:34
Nazwa komputera		Nazwa komputera	

**Rysunek 36.3.** Parametry siatek dostępne do wglądu dla użytkownika: a) pierwszego modelu, b) drugiego modelu

Źródło: Opracowanie własne

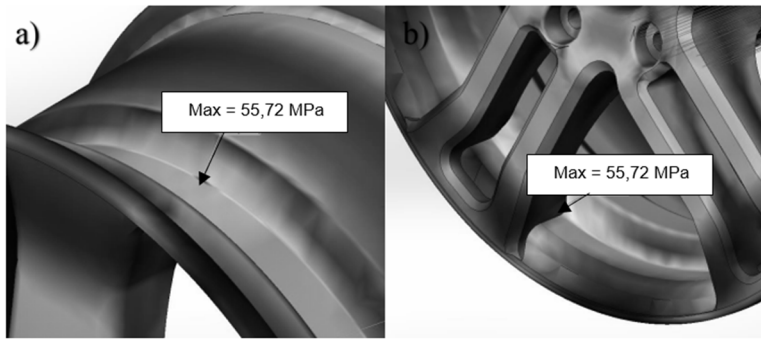


**Rysunek 36.4.** Rozkład naprężeń zredukowanych: a) w pierwszym wariantcie, b) w drugim wariantcie

Źródło: Opracowanie własne

Druga symulacja – obejmująca analizę testu skręcania – odtwarzała stan, w jakim znajduje się koło podczas manewru skręcania, powstający w szczególności poprzez działanie momentu siły przenoszącego przez oś skrętną samochodu. Podobnie jak w przypadku testu obciążenia promieniowego naprężenia o relatywnie niedużej wartości występowały na ramionach. Wykryto koncentrację naprężenia w miejscu połączenia ramion z obręczą w feldze z otworami w ramionach, natomiast w klasycznej feldze pięcioramiennej spiętrzenie naprężeń miało miejsce na obręczy (rys. 36.5).





**Rysunek 36. 5.** Miejsca występowania koncentracji naprężenia: a) w pierwszym wariantcie, b) w drugim wariantcie

Źródło: Opracowanie własne

Ostatnia symulacja badała reakcję projektowanej części na sytuację, w której maksymalny moment obrotowy osiągany przez silnik pojazdu jest przenoszony na przednią oś samochodu. Do przeprowadzenia tego testu wymagane były informacje na temat osiągnięć samochodu, aby obliczyć moment obrotowy działający na koło.

Naprężenia w elemencie wynikające z działania maksymalnego momentu obrotowego nie osiągnęły niebezpiecznych wartości. Wyniosły one 20,3 MPa dla pierwszego wariantu oraz 62,9 MPa dla drugiego wariantu. Trzykrotnie większa wartość naprężenia w drugim wariantcie, której miejsce znajdowało się na połączeniu ramion z obręczą (podobnie jak w symulacji testu skręcania), pozwala wnioskować o możliwych błędach konstrukcyjnych w tym obszarze.

W opisywanym przypadku, w którym w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych dopuszczalne są pewne odkształcenia sprężyste, nie uwzględniano tych wyników w dyskusji.

## Dyskusja wyników

Przeprowadzone badania z wykorzystaniem analizy numerycznej dały podstawę do tego, aby zakwalifikować zaprojektowane elementy jako bezpieczne. W przypadku każdego z badań, dla dwóch wariantów felgi, naprężenie maksymalne było około trzykrotnie mniejsze od granicy plastyczności zastosowanego materiału, wynoszącej 165 MPa. Wysoki współczynnik bezpieczeństwa daje konstruktorowi szeroki zakres możliwości w kontekście modyfikacji modelu, np. redukcji masy poprzez usunięcie materiału z miejsc najmniej obciążonych.

Symulacja testu skręcania pozwoliła zlokalizować koncentrację naprężenia w obszarach połączenia ramion z obręczą. Pomimo tego, że wartości naprężenia nie powinny przyczynić się do zniszczenia elementu (a zarazem narażenia użytkowników na niebezpieczne sytuacje), mogą być cenną informacją na temat zastosowanego rozwiązania. Konstruktor może spróbować alternatywnych

rozwiązań, np. wykorzystanie zaokrąglenia bądź sfazowania w miejscu połączenia ramion z obręczą, aby wyeliminować występujące koncentracje naprężenia.

Test reakcji koła samochodu na maksymalną wartość momentu obrotowego nie jest testem znormalizowanym. W przypadku odtworzenia tego zjawiska wymagana jest wiedza na temat sił działających na element w rzeczywistości oraz doświadczenie w wykonywaniu badań symulacyjnych, gdyż pewne warunki obciążenia lub umocowania muszą zostać odwzorowane w pewnym uproszczeniu. W warunkach testowania nie osiągnięto niebezpiecznych wartości naprężenia, jednak miejsce występowania maksymalnej jego wartości potwierdza, że linia łączenia ramion z obręczą mogłaby zostać zaprojektowana w inny sposób.

Należy mieć na uwadze fakt, że modelowanie numeryczne zjawisk fizycznych nie uwzględnia czynników losowych, które są niemożliwe do uniknięcia w rzeczywistych warunkach. Gotowy produkt może posiadać wady wynikające z niepoprawnie zaprojektowanego i przeprowadzonego procesu produkcyjnego – odlewania, kucia, obróbki skrawaniem czy obróbki cieplnej. W związku z powyższym badania przeprowadzone za pomocą analizy numerycznej powinny być traktowane jedynie jako narzędzie pozwalające na wykrywanie i usuwanie błędów na etapie projektowania oraz muszą być uzupełnione o testy na gotowych wyrobach.

## Podsumowanie

Metodyka pracy przedstawiona w tym rozdziale potwierdza, jak przydatnym narzędziem są metody numeryczne w procesie projektowania elementów o specyficznym kształcie, wymiarach oraz wymaganych własnościach wytrzymałościowych. Projektant może urzeczywistniać swoje pomysły poprzez proces projektowy, jednocześnie sprawdzając poprawność konstrukcyjną za pomocą wirtualnych testów.

W ramach badań zaprojektowano modele felgi samochodowej, uwzględniając obowiązujące standardy w branży motoryzacyjnej, oraz sprawdzono ich właściwości użytkowe, modelując warunki testowania, jak również zjawiska obecne podczas eksploatacji fizycznych elementów. Uzyskano odpowiedź zwrotną m.in. w postaci rozkładów i koncentracji naprężenia występujących w częściach, wynikających z działania sił zewnętrznych, które pozwoliły ocenić część jako bezpieczną.

Analizy wytrzymałościowe dają cenną informację na temat własności projektowanej części, jednak nie mogą być zamiennikiem dla testów wykonywanych na fizycznych elementach.

## Literatura

1. Automobile Catalog (2021), *2007 Opel Astra 1.8 (man. 5) engine Horsepower / Torque Curve*, [https://www.automobile-catalog.com/curve/2007/2526785/opel\\_astra\\_1\\_8.html#gsc.tab=0](https://www.automobile-catalog.com/curve/2007/2526785/opel_astra_1_8.html#gsc.tab=0) (dostęp: 13.09.2021).

2. European Aluminium (2021), *Aluminium in Use*, [www.european-aluminium.eu](http://www.european-aluminium.eu) (dostęp: 13.07.2021).
3. Norma międzynarodowa SAE J2530 042016.
4. Oponeo (2021), *Budowa felgi samochodowej i jej parametry*, <https://www.oponeo.pl/arttykul/budowa-felgi> (dostęp: 30.07.2021).
5. Smogur J. (2018), *Felgi. Definicja i rodzaje felg samochodowych*, <https://proserwis.info/felgi-definicja-i-rodzaje-felg-samochodowych/> (dostęp: 21.06.2021).
6. Tocci M., Pola A., La Vecchia G.M., Modigell M. (2015), *Characterization of a New Aluminium Alloy for the Production of Wheels by Hybrid Aluminium Forging*, „Procedia Engineering”, 109, s. 303-311.
7. Wheel-Size (2021), *Wheel Fitment Guide*, [www.wheel-size.com](http://www.wheel-size.com) (dostęp: 30.07.2021).

## The Use of Computer Aided Systems in Designing and Structure Load Testing of an Aluminium Car Rim

**Abstract:** It's a hard task to name a well performing business nowadays, which do not use IT solutions in dealing with its everyday challenges. When it comes to firms from production section, one of the most important tools is PLM system, whose main duty is the management of product' life cycle. It consists, among other things, of software for computer aided manufacturing. Rapid computer hardware development taking place since middle of XX. century lets IT specialists (initially in universities, subsequently in the developing departments of production firms, currently in corporations which specialize in developing IT solutions) to improve CAD/CAM/CAE software continuously. By using such a software we can avoid construction mistakes on prototype stage, we reduce production costs and minimize manufacturing time. In present chapter have been presented part's designing steps, which consist of design of shape with mechanical analysis executed in Solid-Works software, being an example of use discussed systems.

**Keywords:** analysis, geometry, FEA, designing, simulation, CAD/CAM/CAE systems, PLM systems

## Rozdział 37

# Podłogi kinetyczne jako przyszłość odnawialnych źródeł energii

Aleksandra Marciniak

Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu  
Instytut Nauk o Jakości

**Streszczenie:** Podłogi generujące energię kinetyczną to jeden z najnowszych trendów w dziedzinie odnawialnych źródeł energii. Są to specjalne podłogi, które wykorzystują energię ruchu, aby produkować prąd elektryczny. W ostatnich latach coraz częściej spotykane są one w budynkach publicznych, takich jak lotniska lub stacje metra, gdzie duży ruch pieszny jest wykorzystywany do produkcji energii. W rozdziale na podstawie przeglądu literatury scharakteryzowano podłogi kinetyczne. Przedstawiono ich podział oraz omówiono działanie paneli modułowych i drewnianych. Ponadto opisano skuteczność i efektywność podłóg kinetycznych, a także ukazano perspektywy ich rozwoju.

**Słowa kluczowe:** kinetyczne podłogi energetyczne, odnawialne źródła energii, panele modułowe, panele drewniane

## Wprowadzenie

Rozwój energetyki odnawialnej na świecie jest uzależniony od możliwego do wykorzystania potencjału energetycznego w zakresie wspierania rozwoju instalacji odnawialnych źródeł energii (OZE). Biorąc pod uwagę zagrożenia wynikające ze zmian klimatu i rosnące zapotrzebowanie na zieloną energię, eksperci od lat podkreślają znaczenie odkrywania nowych sposobów promowania zielonej energii w życiu codziennym. Od około 15 lat na rynku zaczęły się pojawiać podłogi zdolne do generowania energii elektrycznej poprzez nacisk kinetyczny.

Podłoga kinetyczna jest zdefiniowana jako podłoga, która została specjalnie zaprojektowana lub przystosowana do generowania energii kinetycznej podczas jej użytkowania. Energia z podłóg kinetycznych powstaje z ruchu wszystkich części, z których składa się podłoga. Działa na zasadzie zamiany energii mechanicznej, która jest generowana poprzez ruch ludzi na podłodze w energię elektryczną lub ciepłą (Hairfield 2013, s. 1-2). Podłogi kinetyczne są jednym ze sposobów

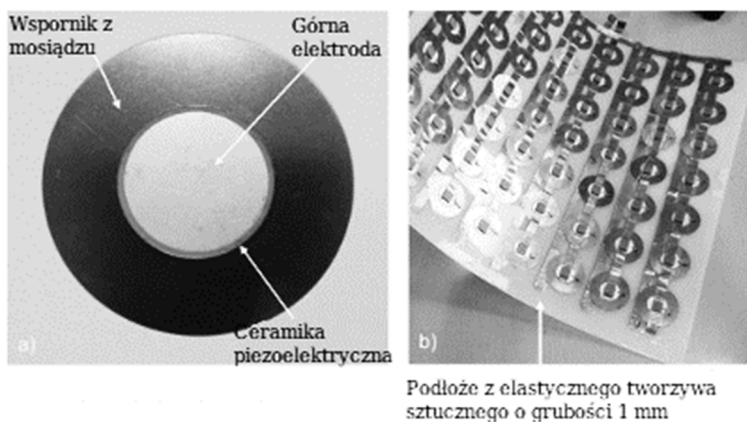
na generowanie energii odnawialnej, a jednocześnie stanowią interesującą i innowacyjną formę architektury i projektowania przestrzeni.

Celem rozdziału było scharakteryzowanie podłóg kinetycznych. Na podstawie przeglądu literatury przedstawiono ich podział oraz omówiono działanie paneli modułowych i drewnianych. Ponadto opisano skuteczność i efektywność podłóg kinetycznych, a także ukazano perspektywy ich rozwoju.

## Podłogi kinetyczne – charakterystyka ogólna

Obecnie na rynku dostępne są różne rodzaje podłóg kinetycznych, które różnią się między sobą sposobem generowania energii i zastosowaniem. Ze względu na budowę, podłogi kinetyczne dzielą się na podłogi z paneli modułowych i drewnianych. Natomiast ze względu na zastosowanie dzielą się na podłogi kinetyczne przetwarzające energię mechaniczną w energię elektryczną przy wykorzystaniu specjalnych płytek piezoelektrycznych lub magnetycznych oraz na podłogi kinetyczne przetwarzające energię mechaniczną w energię cieplną. Podłogi kinetyczne obecnie stosowane są w różnych miejscach, takich jak: centra handlowe, lotniska, hale widowiskowe, szkoły i uczelnie, miejsca pracy i domy prywatne (Energy Floors 2023).

Podłogi kinetyczne wykorzystują maty z wbudowanymi elementami piezoelektrycznymi, które przekształcają energię mechaniczną w energię elektryczną (rys. 37.1).



**Rysunek 37.1.** Struktura standardowego modułu zbierającego energię

Źródło: (Pucasu i in. 2018, s. 909)

Piezoelektryki to materiały, które wykazują zjawisko piezoelektryczności. Zjawisko to polega na tym, że kiedy na taki materiał wywierany jest nacisk lub zostanie zdeformowany mechanicznie, to w materiale pojawiają się ładunki elektryczne. Piezoelektryczność wynika z asymetrii budowy materiału, w którym na

skutek odkształceń struktury krystalicznej pojawiają się dodatnie i ujemne ładunki, które z kolei generują pole elektryczne (Puscasu i in. 2018, s. 907-909). To pole elektryczne może być wykorzystane do zasilania urządzeń elektrycznych. W przypadku podłóg kinetycznych zastosowanie piezoelektryków polega na tym, że elementy piezoelektryczne wbudowane w matę na podłodze ulegają deformacji pod wpływem nacisków wywieranych przez chodzącego po niej człowieka. Ta deformacja powoduje powstanie ładunków elektrycznych, które są następnie gromadzone i przechowywane w kondensatorach, skąd mogą być wykorzystane do zasilania urządzeń elektrycznych.

## Panele modułowe

Panele modułowe rozdzielone są na dwa główne podtypy: Sustainable Energy Floor oraz Sustainable Dance Floor. Pierwszy z nich wykorzystywany jest w codziennym środowisku miejskim, drugi natomiast głównie w środowiskach przeznaczonych rozrywce, typu kluby lub koncerty. Przy płytkach do środowiska codziennego wykorzystywane są panele słoneczne, po których można chodzić. Panele mają ocenę wydajności dwóch trzecich zwykłych paneli fotowoltaicznych, generując do 35 watów. Każdy moduł ma wymiary 60 x 60 cm. Wytworzona energia jest przesyłana z powrotem do sieci. Podłogi można zaprogramować do interakcji z pieszymi, rowerzystami i samochodami poprzez gry lub wizualizację danych, co zwiększa prawdopodobieństwo oddziaływania na nią (Energy Floors 2023). Drugi rodzaj płytek działa poprzez siłę nacisku, która wygina je o około 10 mm. Ten ruch jest przetwarzany na energię elektryczną – średnio 15 watów i do 25 watów mocy szczytowej. Płytki są modułowe, dzięki czemu można połączyć ze sobą 40 płytek, a sieć będzie generować do 1 kW. Cały system jest zaprojektowany tak, aby był ujemny energetycznie przez cały okres eksploatacji technicznej, który szacuje się na około 15 lat. Dlatego cała energia potrzebna do wytworzenia komponentów i ich montażu może zostać zrekompensowana przez produkcję energii przez płytki podczas ich użytkowania. Skuteczność produkcji energii przez panele modułowe zależy jednak od wielu czynników, m.in. liczby płytek, natężenia ruchu czy specyfiki zastosowania. Dzięki modułowości instalacji można stosunkowo szybko i tanio wymienić uszkodzone części. Płytki wykonane są z materiałów nadających się do recyklingu – główne komponenty to ogniwa fotowoltaiczne w szklanych warstwach wierzchnich, a podstawa wykonana jest z tworzyw sztucznych pochodzących z recyklingu oraz gumy (Energy Floors 2023).

## Panele drewniane

Drewno nie ma rzeczywistej tendencji do pozyskiwania lub utraty elektronów, co ogranicza jego zdolność do generowania elektryczności, jednak zespołowi Sun i in. 2021 udało się poprawić właściwości tryboelektryczne drewna. Drewno użyte w ich nanogeneratorze zostało udoskonalone za pomocą kombinacji silikonowej

powłoki i osadzonych nanokryształów. Badaniom zostały poddane różne rodzaje drewna, aby ustalić, czy określone gatunki lub kierunek cięcia drewna mogą wpływać na jego właściwości tryboelektryczne, służąc jako lepsze rusztowanie dla powłoki. Wyniki badania potwierdzają, że tryboelektryczny nanogenerator wykonany z promieniowo ściętego świerku wykazywał najlepsze właściwości. Zabiegi łącznie zwiększyły wydajność tryboelektrycznego nanogeneraora. Generował 80 razy więcej energii elektrycznej niż naturalne drewno. Moc wyjściowa urządzenia była również stabilna przy stałych siłach przez okres do 1500 cykli. Prototyp drewnianej podłogi o powierzchni nieco mniejszej niż kartka papieru mógł wytworzyć energię wystarczającą do napędzania domowych lamp LED i małych urządzeń elektronicznych, takich jak kalkulatory. Z powodzeniem udało się zapalić żarówkę z prototypem, gdy dorosły człowiek szedł po niej, zamieniając kroki w elektryczność.

Świerk jest drewnem tanim i dostępnym oraz ma korzystne właściwości mechaniczne. Podejście funkcjonalizacji jest dość proste i może być skalowalne na poziomie przemysłowym. Oprócz tego, że jest wydajny, zrównoważony i skalowalny, nowo opracowany nanogenerator zachowuje również cechy, które sprawiają, że drewno jest przydatne w projektowaniu wnętrz, w tym jego wytrzymałość mechaniczną i ciepłe kolory. Naukowcy twierdzą, że te cechy mogą pomóc w promowaniu wykorzystania drewnianych nanogeneratorów jako źródeł zielonej energii w inteligentnych budynkach. Konstrukcja drewniana może również pomóc w łagodzeniu zmian klimatu poprzez sekwestrację CO<sub>2</sub> ze środowiska przez cały okres użytkowania materiału. Kolejnym krokiem jest dalsza optymalizacja nanogeneraora za pomocą powłok chemicznych, które są bardziej przyjazne dla środowiska i łatwiejsze do wdrożenia (Sun i in. 2021, s. 3052-3067).

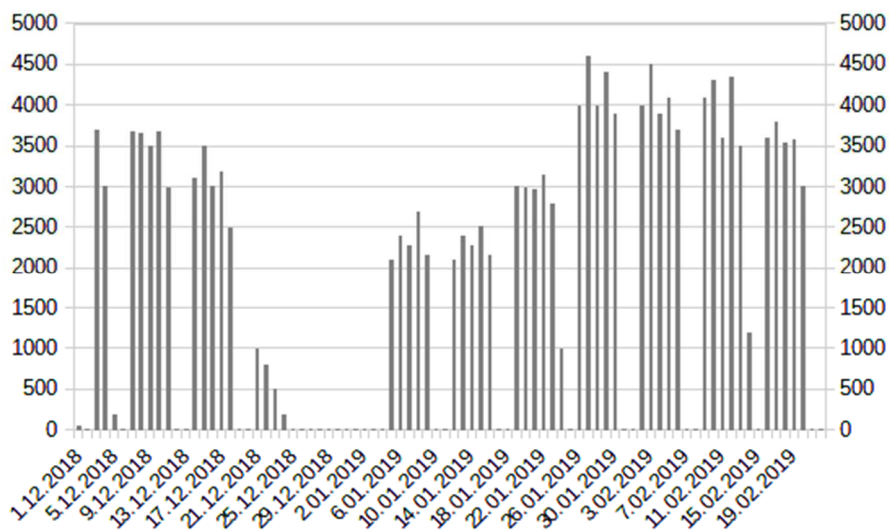
## Skuteczność i efektywność podłóg kinetycznych

W ostatnich latach przeprowadzono badania w kierunku oceny skuteczności i efektywności podłóg kinetycznych. Wyniki badań wskazują, że podłogi kinetyczne mogą generować wystarczającą ilość energii, aby zasilac oświetlenie i urządzenia elektryczne w budynkach (Rossi, Hutton 2013, s. 1315-1334). Również w Polsce można zaobserwować wykorzystanie energii z podłóg kinetycznych. W 2020 roku otwarty został sklep sieci Żabka zasilany w 100% odnawialnymi źródłami energii, wykorzystując przy tym również energię podłóg kinetycznych. Na tamten moment była to dopiero druga taka instalacja sieci handlowej w Europie. Podłogi zapewniały energię dla urządzeń znajdujących się na terenie obiektu (Żabka 2023). Podłogi kinetyczne przetwarzające energię kinetyczną w energię elektryczną mogą mieć wydajność energetyczną od 10 do nawet 50% (Hairfield 2013, s. 3-4). Oznacza to, że tylko część energii kinetycznej, która jest generowana, może zostać przetworzona na energię elektryczną. W przypadku podłóg kinetycznych przetwarzających energię kinetyczną w energię cieplną



wykazano, że podłogi te mogą znacznie zmniejszyć koszty ogrzewania budynków (Hairfield 2013, s. 3-4).

W 2018 roku przeprowadzono eksperyment dotyczący wygenerowanej energii na uniwersyteckim ruchliwym korytarzu. Monitorowaniu, w okresie 3 miesięcy, została poddana liczba użytkowników w części ruchliwego korytarza uniwersyteckiego (rys. 37.2).



**Rysunek 37.2.** Natężenie ruchu na uniwersyteckim korytarzu

Źródło: (Puscasu i in. 2018, s. 908)

Zauważyć można tygodniowe cykle. Maksima osiągnęte są w dni robocze, natomiast weekendy i ferie zimowe cechują się niskimi ruchami. Maksymalny ruch na badanym odcinku korytarza wyniósł 4613 użytkowników dziennie. Przy ugięciu 5 mm i natężeniu 4613 kroków użytkownicy generowałiby 11 500 J dziennie, czyli 3,2 Wh. Zakładając technologię o 50% sprawności zbioru konwersji mechaniczno-elektrycznej, 1,6 Wh zostanie zmagazynowane jako energia elektryczna do użytku. Wynosiłoby to 210 Wh dziennie i nawet 77 kWh rocznie przy stałym dużym natężeniu ruchu każdego dnia. Znając cenę za kilowatogodzinę energii elektrycznej, można stwierdzić, że energochłonne podłogi prawdopodobnie nie będą opłacalnym rozwiązaniem jako główne źródło wytwarzania energii, jednakże dobrze sprawdzą się jako źródło pomocnicze (Puscasu i in. 2018, s. 908).

Podłogi kinetyczne są obecnie uważane za obiecujące źródło energii odnawialnej, ale istnieją również pewne trudności związane z ich projektowaniem, produkcją i eksploatacją. W porównaniu z tradycyjnymi podłogami podłogi kinetyczne są zazwyczaj droższe w produkcji i instalacji. Wynika to też z tego, że muszą być odpowiednio zaprojektowane i zainstalowane, aby były kompatybilne z innymi systemami budynkowymi takimi jak klimatyzacja, oświetlenie, wentylacja



i systemy bezpieczeństwa. Ponadto niektóre modele wymagają regularnej konserwacji, co może zwiększyć koszty eksploatacji. Dodatkowo na chwilę obecną są mniej wydajne w przetwarzaniu energii w porównaniu z innymi źródłami energii odnawialnej, takimi jak panele fotowoltaiczne lub turbiny wiatrowe. Wymagają stałego i intensywnego ruchu, aby generować wystarczającą ilość energii. Dlatego ich zastosowanie może być ograniczone w pomieszczeniach o niskim ruchu lub w przypadku, gdy ruch na podłodze jest nierównomierny.

## Perspektywy rozwoju podłóg kinetycznych

Podłogi kinetyczne mają obecnie wiele perspektyw rozwoju zarówno w zakresie kierunków zastosowań, jak i w zakresie technologicznym. Przejawiają duży potencjał w dziedzinie budownictwa, zwłaszcza w budynkach publicznych takich jak biura, lotniska, szpitale, sklepy i centra handlowe. Mogą być one również stosowane w przestrzeniach publicznych takich jak place, parki i ulice. Wraz z rozwojem technologii podłogi kinetyczne mogą stać się bardziej wydajne w przetwarzaniu energii. Nanogenerator piezoelektryczny, który konwertuje energię mechaniczną na elektryczną, może być wykorzystany do zwiększenia efektywności energetycznej. Podłogi kinetyczne mogą być zintegrowane z innymi systemami budynku, takimi jak systemy oświetlenia i klimatyzacji, aby zwiększyć ich efektywność energetyczną. Swoje zastosowanie mogą znaleźć również w przemyśle, w którym wielu ludzi porusza się po podłodze, na przykład w halach produkcyjnych, centrach dystrybucyjnych i magazynach. Podłogi kinetyczne mogą przyczynić się do redukcji emisji gazów cieplarnianych i innych szkodliwych substancji, co może pomóc w walce ze zmianami klimatycznymi.

## Podsumowanie

Podłogi kinetyczne są innowacyjnym rozwiązaniem pozwalającym na przetwarzanie energii kinetycznej w energię elektryczną, co może być szczególnie przydatne w miejscach, gdzie panuje duży ruch pieszych, takich jak centra handlowe, lotniska czy stacje kolejowe. Dodatkowo podłogi kinetyczne są ekologicznym rozwiązaniem, ponieważ pozwalają na odzyskanie energii, która zwykle jest tracona w trakcie codziennej aktywności człowieka. Jednakże nie należy zapominać o pewnych ograniczeniach podłóg kinetycznych. Przede wszystkim energia uzyskana z nich jest stosunkowo niewielka i może być wykorzystana jedynie do zasilania małych urządzeń elektrycznych. Ponadto same podłogi kinetyczne są kosztowne w instalacji i wymagają określonej konstrukcji, co może stanowić przeszkodę dla ich powszechnego stosowania. Pomimo tych ograniczeń podłogi kinetyczne są obiecującym rozwiązaniem, które może mieć wiele zastosowań w przyszłości, zwłaszcza w dziedzinie energii odnawialnej i ekologicznego projektowania budynków.

## Literatura

1. Hairfield C. (2013), *Harnessing Kinetic Energy from Humans*, „Geos 206: Renewable Energy and the Sustainable Campus”, [https://sustainability.williams.edu/files/2015/04/Hairfield\\_Final-Paper.pdf](https://sustainability.williams.edu/files/2015/04/Hairfield_Final-Paper.pdf) (dostęp: 22.03.2023).
2. Energy Floors (2023), <https://energy-floors.com/> (dostęp: 22.03.2023).
3. Kim H., Yun S., Kim K., Kim W., Ryu J., Gyun Nam H., Min Han S., Jeon S., Hong S. (2020), *Breaking the Elastic Limit of Piezoelectric Ceramics Using Nanostructures: A Case Study Using*, „Nano Energy”, 105259, 78.
4. Puscasu O., Counsell N., Reza M., Richard H., Peace J., Patsavellas J., Day R. (2018), *Powering Lights with Piezoelectric Energy-Harvesting Floors*, „Energy Technology”, 6, s. 906-916.
5. Rossi J., Hutton T. (2013), *Federal Preemption and Clean Energy Floors*, „North Carolina Law Review”, 4, 91, s. 1283-1356.
6. Sun J., Tu K., Büchele S., Koch S.M., Ding Y., Ramakrishna S.N., Stucki S., Guo H., Wu Ch., Keplinger T., Pérez-Ramírez J., Burgert I., Panzarasa G. (2021), *Functionalized Wood with Tunable Tribopolarity for Efficient Triboelectric Nanogenerators*, „Matter”, 4, 9, s. 3049-3067.
7. Wang X., Yang Y., Xu L. (2017), *Toward the Blue Energy Dream by Triboelectric Nanogenerator Networks*, „Nano Energy”, 39, s. 9-26.
8. Żabka (2023), *Żabka otworzyła sklep zasilany w 100% zieloną energią*, <https://www.zabka.pl/biuro-prasowe/zabka-otworzyla-sklep-zasilany-w-100-zielona-energia> (dostęp: 27.02.2023).

## Kinetic Floors as the Future of Renewable Energy Sources

**Abstract:** Kinetic energy-generating floors are one of the latest trends in the field of renewable energy. These are special floors that use the energy of motion to produce electricity. In the last few years the use of power generating floors has become increasingly common in public buildings, such as airports or metro stations, where large pedestrian traffic is used to produce energy. In the chapter, based on a review of the literature, kinetic floors were characterized. Their division is presented and the operation of modular and wooden panels is discussed. In addition, the effectiveness and efficiency of kinetic floors were described, as well as the conducted analysis allowed to show the prospects for their development.

**Keywords:** kinetic energy floors, renewable energy sources, modular panels, wooden panels

## Rozdział 38

# Koncepcja optymalizacji materiałowej i analizy metody wytwarzania biodegradowalnego kubka

Paulina Gołuch, Konrad Białek, Patryk Gańczorz, Maciej Stec, Anna Kiljan  
Ewa Jonda, Piotr Sakiewicz

Politechnika Śląska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny

**Streszczenie:** W rozdziale przedstawiono wyniki analizy materiałów oraz technologię wykonania, wizualizację i funkcje użytkowe biodegradowalnego kubka. Produkt wykonany jest w całości z materiałów biodegradowalnych, takich jak łuski zbóż i słomy. Jest odporny na działanie gorącej wody i lekkich kwasów, a jego konstrukcja zapobiega przeciekaniu. Jego zaletą jest to, że może być poddany procesowi biodegradacji w zdecydowanie krótszym czasie niż kubki wykonane z polistyrenu po wyrzuceniu odpadów. Głównym celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie możliwości optymalizacji materiałowej i analizy metody wytwarzania biodegradowalnego kubka.

**Słowa kluczowe:** (bio)degradacja, gospodarka bezodpadowa, nanomateriały, opakowania wielokrotnego użytku, ślad węglowy

## Wprowadzenie

Postęp technologiczny i rozwój gospodarczy spowodowały wzrost liczby gotowych i pakowanych produktów na rynku, co wiąże się ze zwiększonym zapotrzebowaniem na wykorzystanie gotowych opakowań. Standardowe opakowania produkowane są ze szkła, metalu, drewna, tektury, papieru i materiałów syntetycznych. Syntetyczne tworzywa sztuczne w dużej mierze zastąpiły inne, stosowane wcześniej materiały opakowaniowe. Pomimo rosnącej świadomości zagrożeń związanych z zanieczyszczeniem tworzywami sztucznymi ponad 99% produkowanych na świecie tworzyw sztucznych nadal nie ulega biodegradacji i pochodzi z kopalnych paliw energetycznych. Są one łatwe w obróbkę, a otrzymane z nich wyroby charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami użytkowymi (lekkość, wytrzymałość, trwałość, elastyczność, hydrofobowość). Ich stosowanie pozwala zaoszczędzić rzadkie surowce, takie jak drewno do produkcji

papieru (aspekty środowiskowe). Są również tańsze niż inne materiały, a koszty produkcji maleją wraz z postępem technologicznym (Leszczyński 1999, s. 50).

Odpady z tworzyw sztucznych, po skorzystaniu z nich, mogą zostać przetworzone w różnoraki sposób. Obecnie około 60% wszystkich tworzyw sztucznych, jakie kiedykolwiek wyprodukowano, zostało zdeponowanych w przyrodzie lub zgromadzonych na wysypiskach, co stanowi zagrożenie dla różnorodności biologicznej. Opakowania mogą być ponownie wykorzystane, jednakże stwarza to problem z czystością i odpowiednim stanem sanitarnym. Obecnie stosowany jest również odzysk materiałowy (recykling) ograniczony zbiórką i segregacją odpadów, co jednak wpływa na wyższe koszty związane z odbiorem odpadów przez firmy świadczące te usługi, jednocześnie zwiększeniu ulegają koszty ich przetwarzania. Odpady można też poddawać odzyskiwaniu chemicznemu lub energetycznemu. Metody te wymagają jednak znacznych inwestycji w specjalistyczny sprzęt instalacyjny i koszty eksploatacji (Jakowski 1997, s. 29-33).

Możliwe jest opracowanie różnych strategii w celu zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko przedmiotów jednorazowego użytku o krótkim okresie użytkowania i zwiększenia efektywności wykorzystania zasobów, np. poprzez przeprojektowanie ich procesów przy użyciu zrównoważonych metod i skupienie się na materiałach ulegających biodegradacji (Rosenboom i in. 2022, s. 117-137). Biodegradacja to proces rozkładu związków chemicznych z udziałem mikroorganizmów lub enzymów, w wyniku czego powstają prostsze związki chemiczne. Jest to więc proces naturalny, który polega na rozkładaniu substancji organicznych przez mikroorganizmy (Wróblewska-Krepsztul i in. 2017, s. 579-584). Z ekologicznego punktu widzenia najkorzystniejsze są tworzywa, które ulegają procesowi biodegradacji w środowisku naturalnym. Do produkcji takich materiałów wykorzystywane są naturalne substancje, głównie pochodzenia roślinnego (Leszczyński 1999, s. 50-55).

Kubek spożywczy, jako jeden z najbardziej powszechnych produktów użytku codziennego, wytwarzany jest w większości z tworzyw sztucznych. Wykonana analiza zaproponowanych materiałów i procesu technologicznego wytworzenia standardowego kubka ma na celu nie tylko ukazanie, jak stosunkowo proste i przystępne jest wyprodukowanie biodegradowalnego kubka, ale też popularyzację rozwiązań przyczyniających się do pozytywnego wpływu na środowisko.

## Analiza materiałowa współczesnych produktów

Obecnie produkowane kubki jednorazowe z tworzyw sztucznych najczęściej są wykonane z polistyrenu (PS) lub polipropylenu (PP). Materiałami, z których wykonana jest zaproponowana wersja kubka, są łuski ze zbóż stanowiące pozostałość po procesie łuskania oraz słoma. Substancjami, które w nich występują, są celuloza i lignina. Lepiszczce, które zostało zastosowane, to PCL – polikaprolakton. Ze względu na małą stabilność termiczną włókien naturalnych liczba tworzyw termoplastycznych, które można wykorzystać do produkcji kompozytów,

jest ograniczona do takich, których temperatura przetwarzania nie przekracza temperatury rozkładu lub spalania włókien roślinnych (zwykle poniżej 210°C) (Kiljeński i in. 2016, s. 465-582).

### Polistyren

Najpopularniejszym materiałem do produkcji kubków jest polistyren, oznaczony wzorem  $(-[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n-)$ . PS jest polimerem o dużej masie cząsteczkowej i dużej stabilności, o hydrofobowym charakterze, co powoduje, że jest on odporny na degradację. Produkcja żywicy polistyrenowej obejmuje cztery główne procesy produkcyjne: produkcję etylenu, produkcję benzenu, produkcję styrenu poprzez reakcję benzenu i etylenu oraz polimeryzację styrenu w celu wytworzenia polistyrenu. Jest to bardzo złożony i energochłonny proces, mający negatywny wpływ na środowisko i wykorzystujący w dużej mierze zasoby naturalne. Zgodnie z informacjami przedstawionymi w (tab. 38.1) etap produkcji żywicy polistyrenowej (surowiec do żywicy polistyrenowej) przyczynił się do najwyższego GWP (potencjał tworzenia efektu cieplarnianego) i wykazywał najwyższą emisję CO<sub>2</sub> (70 kg ekwiwalentu CO<sub>2</sub> lub 24,96 kg PS na 1000 jednostek pojemnika) (*Polistyren*).

**Tabela 38.1. Energochłonność na różnych etapach produkcji żywicy polistyrenowej do podstawy wyrobów**

L.p.	Opis	Zużycie energii
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ekstrakcja paliw kopalnych</li> <li>– Gaz ziemny (NG)</li> <li>– Ropa naftowa</li> <li>– Całkowite zużycie energii w produkcji (NG 0,33 kg i ropa naftowa 0,63 kg)</li> </ul>	11,34 MJ/kg NG 24,30 MJ/kg Ropa naftowa 46,38 MJ/kg PS żywice
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ekstrakcja paliw kopalnych</li> <li>– Gaz ziemny (NG)</li> <li>– Ropa naftowa</li> <li>– Całkowite zużycie energii w produkcji (NG 0,33 kg i ropa naftowa 0,63 kg)</li> </ul>	39,75 MJ/kg PS żywice
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Termoformowanie pudła styropianowego</li> <li>– Elektryczność</li> </ul>	4,75 MJ/kg PS resin
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Transport (zużycie paliwa energetycznego)</li> <li>– Dostawa kartonu styropianowego do klienta</li> </ul>	284,19 MJ/FU

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Tin Sin, Soo Tuen 2023, s. 45-89)

## Analiza materiałowa zaproponowanego rozwiązania

### Lignina

Ściany komórkowe roślin składają się z ligniny, która jest biopolimerem fenylpropanoidowym, nadającym strukturze rośliny wytrzymałość mechaniczną.

Celuloza i hemiceluloza tworzą całą biomasę i są trwale połączone z cząsteczkami ligniny poprzez wiązania kowalencyjne i wodorowe, które sprawiają, że struktura jest niezwykle mocna i trudna, a techniki obróbki wstępnej. Biomasa lignocelulozowa składa się głównie z celulozy (38-50%), hemicelulozy (23-32%) i ligniny (12-25%). Składnik ligniny jest znany jako drugi co do wielkości niewyczerpany naturalny polimer organiczny, który przenosi największą substancję energetyczną ze wszystkich powyższych. Powyższe własności ligniny wpływają pozytywnie na wytrzymałość strukturalną zaproponowanego rozwiązania kubka. Jako biopolimery oraz materiały biodegradowalne wpisują się idealnie w obecne trendy panujące na rynkach światowych. Nie oddziałują negatywnie na organizm człowieka oraz środowisko. Prowadzone analizy statystyczne wskazują jednoznacznie, że jej znaczenie w życiu codziennym ludzi oraz w przemyśle z roku na rok będzie coraz większe (Ponnusamy i in. 2019).

### Celuloza

Celuloza jest polimerem beta-d-glukozy z grupami  $-CH_2OH$  ułożonymi naprzemiennie powyżej i poniżej płaszczyzny cząsteczki celulozy, co skutkuje długimi, nierozgałęzionymi łańcuchami. Ponieważ cząsteczki celulozy nie mają łańcuchów bocznych, sklejają się, tworząc sztywne struktury. Dzięki posiadaniu sieci wiązań wodorowych, które nie rozpuszczają się w zwykłych rozpuszczalnikach wodnych, w stanie stałym przechodzi bezpośrednio w stan gazowy. Zastosowanie łusek zbóż i słomy przyczynia się do wykorzystania potencjału stabilnych własności wytrzymałościowych celulozy (Ponnusamy i in. 2019).

### Technologie wykonania

W celu wytworzenia kubka, konieczne jest wykonanie następujących kroków:

1. **Pozyskanie surowców.** Etap ten obejmuje pozyskanie surowców, czyli słomy i łusek zbóż oraz polikaprolaktonu (PCL). Jest to możliwe poprzez nawiązanie współpracy z okolicznymi firmami zajmującymi się rolnictwem czy przetwórstwem spożywczym.
2. **Suszenie.** Suszenie słomy i łusek odbywa się w zakresie temperatury od 45-100°C, w czasie 3,0-96,3 godzin.
3. **Zmielenie.** Etap ten obejmuje zmielenie z wykorzystaniem młyna uprzednio wysuszonej słomy i łusek zbóż w celu uzyskania mniejszej frakcji.
4. **Zmieszanie.** Wysuszone i zmielone surowce trafiają do pojemnika, gdzie dodawane jest lepiszcze – polikaprolakton w postaci płynnej, aby połączyć ze sobą oba surowce. Następnie dokładnie zmieszane ze sobą surowce trafiają do kolejnego etapu, którym jest termoformowanie.
5. **Termoformowanie.** Jest to proces, w którym tworzywo termoplastyczne w postaci płaskiego arkusza składającego się z mieszanki celulozy i ligniny nagrzewane jest do odpowiedniego zakresu temperatury mięknięcia,

a następnie formowane w celu uzyskania kształtu kubka. Proces termoformowania składa się z:

- a) Przygotowania formy. Przed rozpoczęciem procesu termoformowania przygotowuje się formę do kształtowania kubka. Forma może być wykonana z metalu lub tworzywa sztucznego i musi być dokładnie dopasowana do pożądanego kształtu kubka.
- b) Wytłaczania tworzywa. Operator umieszcza odpowiednią ilość biodegradowalnego tworzywa w formie. Następnie prasa opuszcza ramkę dociskową, aby przylegała do tworzywa.
- c) Grzania i wypompowywania powietrza. Wytwarzanie ciepła może się odbywać poprzez grzanie za pomocą promieniowania podczerwonego lub przez stosowanie gorącego powietrza. Proces grzania rozpoczyna się z równoczesnym wypompowywaniem powietrza z komory próżniowej i trwa do momentu, w którym materiał podgrzany zostanie do temperatury formowania (temperatura formowania próżniowego to 170-190°C).

**Wstępne uformowanie materiału** dokonuje się za pomocą rozciągania wstępnego, którego istnieją różne rodzaje:

- rozciąganie wstępne z przedmuchem, tj. tworzenie pęcherzyków za pomocą sprężonego powietrza;
- rozciąganie wstępne przy użyciu presetu, tzn. tworzenie pęcherzyków przy użyciu próżni;
- rozciąganie mechaniczne wstępne przy użyciu samej formy;
- rozciąganie mechaniczne za pomocą narzędzia wspomagającego, zwanego również narzędziem wspomagającym lub górnym.

**Formowanie kształtowe** uformowanego elementu polega na odzwierciedleniu zewnętrznego konturu formy, przy czym siły powrotne w materiale i siły formowania konturowego działają w tym samym kierunku. Gdy arkusz osiągnie właściwą temperaturę, jest on formowany przy użyciu specjalnej formy. Forma ta składa się z dwóch części: dolnej i górnej. Arkusz biodegradowalnego tworzywa jest umieszczany na dolnej części formy, a następnie górna część formy jest opuszczana na arkusz, kształtując go do pożądanego kształtu.

Podczas procesu formowania pozytywnego celuloza oraz lignina przyjmują różne właściwości. Dokładne parametry podano w (tab. 38.3, 38.4) oraz (tab. 38.5).

1. **Chłodzenie uformowanego elementu.** Opcje chłodzenia formowanego elementu, w zależności od typu maszyny użytej do formowania pozytywnego:
  - Chłodzenie w wyniku kontaktu z narzędziem formującym (zazwyczaj jednostronne).
  - Chłodzenie w temperaturze otoczenia bez dodatkowych zabiegów.
  - Rozformowanie uformowanego elementu. Rozformowywanie następuje po schłodzeniu materiału termoplastycznego poniżej temperatury jego giętkości, czyli po uzyskaniu odpowiedniej sztywności.

2. **Obróbka końcowa.** Po sformowaniu kubka i jego ochłodzeniu należy odciąć nadmiar materiału w celu uzyskania końcowego wymiaru kubka. Po przecięciu konturu zewnętrznego i uzyskaniu ostatecznego kształtu kubek jest gotowy do użycia. Biodegradowalny materiał, z którego został wykonany, ulegnie naturalnemu rozkładowi, co jest korzystne dla środowiska naturalnego.

**Tabela 38.3. Parametry celulozy i ligniny**

Parametr	Lignina	Celuloza	Jednostka
Gęstość	1,3-1,4	1,28	g/cm <sup>3</sup>
Wytrzymałość na rozciąganie	25-61	37	N/mm <sup>2</sup>
Moduł sprężystości	1800	1500-6670	N/mm <sup>2</sup>
Przejrzystość optyczna	+	+	-
Liniowa rozszerzalność cieplna	-	110	10 <sup>-6</sup> °C
Ciepło właściwe	-	1,6	kJ/ kg·K
Minimalna temperatura ciągłego użytkowania	-	-40	°C
Maksymalna temperatura ciągłego użytkowania	85-120	80	°C

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Verlag 2016, s. 12-23)

**Tabela 38.4. Parametry ligniny**

Parametr	Lignina	Jednostka
Temperatura formowania w formowaniu ciśnieniowym	150-170	°C
Czynnik materiałowy dla czasu nagrzewania	1	-
Czynnik materiałowy dla czasu chłodzenia	1,3	-
Wymiar otworu odpowietrzającego w formowaniu pozytywnym, tzw. <i>bore hole</i>	0,6	mm
Wymiar otworu odpowietrzającego w formowaniu pozytywnym, tzw. <i>slot</i>	0,3	mm

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Verlag 2016, s. 12-23)

**Tabela 38.5. Właściwości formy po procesie formowania**

Właściwości	Uformowana część
Dokładność obrazu formy w uformowanym elemencie	Na wewnętrznej stronie
Wymiary (w rysunku)	Od wewnątrz
Sektor grubych krawędzi	Krawędź przerzedzona przez rozciąganie
Najgrubsze miejsce	Na podstawie
Najcieńsze miejsce	Na krawędzi (przejście do ściany bocznej)
Ryzyko powstawania zmarszczek	W narożnikach przylegających do krawędzi

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Verlag 2016, s. 12-23)



## Podsumowanie

Rozdział w obszerny sposób przedstawia materiały, z których może powstać biodegradowalny kubek, oraz szczegółowy opis technologii wykonania. Propozycja wykonania w pełni biodegradowalnego kubka pozwala na znaczące zmniejszenie ilości powstających odpadów. Kubek powstał z myślą o zastosowaniu na imprezach masowych o dużej skali, podczas których wymagane są jednorazowe naczynia, a późniejsza ich utylizacja mogłaby stanowić problem. Zaproponowane rozwiązanie eliminuje problem utylizacji kubków i ewentualnie innych naczyń, ponieważ technologia może zostać z łatwością dostosowana do innego rodzaju zastosowań związanych z żywnością.

## Literatura

1. Jakowski S. (1997), *Metody ograniczania obciążenia środowiska zużytymi opakowaniami*, „Przemysł Spożywczy”, 10, 51, s. 29-33.
2. Kijeński J., Kijeńska M., Osawaru O. (2016), *Włókna roślinne jako zamienniki włókien mineralnych w kompozytach termoplastów – wizja Forda czy Al Gore'a?*, <http://polimery.ichp.vot.pl/index.php/p/article/view/412> (dostęp: 10.04.2023).
3. Leszczyński W. (1999), *Biodegradowalne tworzywa opakowaniowe*, „Biotechnologia”, 2, s. 50-64.
4. *Polistyren*, <https://szkolnictwo.pl/szukaj,Polistyren> (dostęp: 09.04.2023).
5. Ponnusamy V.K., Nguyen D.D., Dharmaraja J., Shobana S., Banu J.R., Saratale R.G., Chang S.W., Kumar G. (2019), A Review on Lignin Structure, Pretreatments, Fermentation Reactions and Biorefinery Potential, „Bioresource Technology”, 271, s. 462-472, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852418313233> (dostęp: 10.04.2023).
6. Rosenboom J.-G., Langer R., Traverso G. (2022), *Bioplastics for a Circular Economy*, „Nature Reviews Materials”, 7, s. 117-137, <https://www.nature.com/articles/s41578-021-00407-8> (dostęp: 10.04.2023).
7. Tin Sin L., Soo Tuen B. (2023), *Plastics and Sustainability*, <https://www.sciencedirect.com/book/9780128244890/plastics-and-sustainability> (dostęp: 10.04.2023).
8. Verlag C.H. (2016), *Thermoforming. A Practical Guide*, [https://www.hanserpublications.com/SampleChapters/9781569907092\\_9781569907092\\_LPR.pdf](https://www.hanserpublications.com/SampleChapters/9781569907092_9781569907092_LPR.pdf) (dostęp: 10.04.2023).
9. Wróblewska-Krepsztul J., Michalska-Požoga I., Szczypiński M., Szczypiński M.M., Rydzkowski T. (2017), *Biodegradacja – atrakcyjna alternatywa dla obecnych technik utylizacji odpadów tworzyw polimerowych*, „Przetwórstwo Tworzyw”, 6, s. 579-584, <https://bibliotekanauki.pl/articles/277969> (dostęp: 10.04.2023).

## Concept of Material Optimization and Analysis of Method for Manufacturing Biodegradable Cup

**Abstract:** The chapter presents the results of the analysis of materials and the technology of making, visualization, and functional features of a biodegradable cup. The product is made entirely of biodegradable materials such as grain husks and straw. It is resistant to hot water and mild acids, and its construction prevents leakage. Its advantage is that it can be subjected to biodegradation in a significantly shorter period than cups made of polystyrene after waste disposal. The main purpose of this chapter is to present the possibility of material optimization and analysis of the method of producing a biodegradable cup.

**Keywords:** (bio)degradation, nanomaterials, reusable packaging, carbon footprint, zero waste economy

## Rozdział 39

# Analiza czynników determinujących właściwe gospodarowanie odpadami komunalnymi na przykładzie wybranych gmin w Polsce

Kinga Dygudaj, Patrycja Krasoń

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** Polska, przystępując do Unii Europejskiej, przyjęła cele Dyrektywy Rady 1999/31/WE z 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów, deklarując jednocześnie zmniejszenie ilości odpadów deponowanych na składowiskach m.in. na rzecz recyklingu. Jednak, mimo licznych inicjatyw podejmowanych zarówno na szczeblu regionalnym, jak i krajowym, świadomość ekologiczna Polaków jest nadal niska, a dodatkowo rosnące koszty utylizacji nie sprzyjają właściwemu zarządzaniu odpadami. W rozdziale przedstawiono analizę porównawczą wad i zalet systemu zarządzania odpadami komunalnymi w wybranych gminach województwa śląskiego i łódzkiego. Opierając się na danych statystycznych za rok 2020 dla gminy Częstochowa i Gorzkowice, przeanalizowano istniejące rozwiązania zmierzające do minimalizacji i właściwego postępowania z odpadami. Wykazano korzyści i wady płynące z systemu wprowadzonych zachęt i kar, w szczególności w odniesieniu do naliczanych przez gminy stawek za wywóz odpadów. Efektem przeprowadzonej analizy było zaproponowanie rozwiązań zmierzających do poprawy systemu zarządzania odpadami komunalnymi w analizowanych gminach, a w szczególności do podniesienia świadomości ekologicznej mieszkańców, co przełoży się na wzrost poziomu recyklingu i odzysku odpadów zebranych selektywnie.

**Słowa kluczowe:** odpady komunalne, recykling, segregacja, świadomość ekologiczna, zarządzanie

## Wprowadzenie

Gospodarka stałymi odpadami komunalnymi stanowi w chwili obecnej jedno z największych wyzwań, zwłaszcza środowiskowych, zarówno dla krajów rozwijających się, jak i rozwiniętych. Ilość stałych odpadów komunalnych rośnie z dnia na dzień na całym świecie (Singh 2019). Przyczynia się do tego m.in. wzrost liczby ludności, wysoki standard życia oraz wzrost gospodarczy i urbanizacja

(Kundariya i in. 2021). Niewłaściwe postępowanie z odpadami wpływa negatywnie na środowisko naturalne, a w szczególności przyczynia się do pogarszania jakości wody i właściwości gleby oraz uwalniania metanu odpowiedzialnego za globalne ocieplenie, a także wpływa na stan zdrowia ludzi (Awasthi i in. 2022). Z danych literaturowych wynika (Awasthi i in. 2022), że od 2004 roku największym producentem na świecie stałych odpadów komunalnych (ang. *Municipal Solid Waste* – MSW) są Chiny, które w ciągu jednego roku zebrały 6 mld ton nieprzetworzonych MSW i około 200 mld ton z 660 metropolii kraju.

W Polsce, jak wynika z danych GUS, obserwuje się wzrost ilości odpadów komunalnych, tj. odpadów odebranych od właścicieli nieruchomości oraz zebranych selektywnie. W 2020 roku wytworzono 13 117 tys. ton (raport GUS), co stanowi wzrost o 2,9% w stosunku do 2019 roku. Z przeliczenia na jednego mieszkańca wynika, że przeciętny Polak wytworzył w 2020 roku 342 kg odpadów, tj. **o 10 kg więcej aniżeli w 2019 roku**. Największą ilość odpadów na mieszkańca (400 kg) odnotowano w 2020 roku w województwie dolnośląskim, natomiast najniższą w województwie podkarpackim (236 kg). Ilość wytworzonych odpadów komunalnych ściśle zależy od liczby ludności oraz od wzorców konsumpcji. Największe zróżnicowanie obserwuje się w gminach. W 2020 roku w 29% gmin odebrano poniżej 200 kg odpadów komunalnych na mieszkańca, natomiast w 58% gmin ilość wytworzonych odpadów wynosiła od 200-400 kg na mieszkańca, przy czym największa ilość została zebrana w gminach turystycznych (w sześciu gminach odebrano ponad 1000 kg odpadów komunalnych). Jak wskazują dane z raportu GUS, w 2020 roku funkcjonowało 2239 punktów selektywnego zbierania odpadów komunalnych (PSZOK), czyli miejsc, do których właściciele nieruchomości w ramach wnoszonej opłaty za zagospodarowanie odpadami mogą bezpłatnie dostarczyć wybrane frakcje odpadów komunalnych. Usługi odbierania odpadów komunalnych świadczyło 1306 przedsiębiorstw. Niestety liczba PSZOK-ów nie jest wystarczająca.

Z projektu uchwały opracowanej przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska wynika, że polska gospodarka odpadami posiada istotne luki inwestycyjne w tym zakresie (Spiller 2020). Jak wskazano w projekcie, dla poprawy systemu gospodarowania odpadami w Polsce należy wybudować 814 nowych punktów selektywnego zbierania odpadów komunalnych, a około 30% już istniejących wymaga modernizacji. Ponadto, w celu zapewnienia możliwości sortowania selektywnie zebranych odpadów, do 2028 roku planuje się budowę około 200 sortowni, a do 2034 roku kolejnych 30. W zakresie biologicznego przetwarzania stałych odpadów komunalnych planuje się do 2028 roku budowę instalacji o wydajności minimalnej na poziomie 1 700 000 Mg/rok, 34 instalacji fermentacji o przepustowości 30 000 Mg/rok lub 51 instalacji o przepustowości 20 000 Mg/rok oraz około 47-70 kompostowni o przepustowości od 15 000 do 10 000 Mg/rok. W zakresie recyklingu papieru, szkła, metalu, tworzyw sztucznych, bioodpadów oraz odpadów wielomateriałowych planuje się do 2028 roku budowę 4 zakładów przetwarzania stłuczki szklanej, instalacji do przetwarzania papieru, około 25 instalacji

recyklingu tworzyw sztucznych, jak również doposażenie istniejących instalacji recyklingu metali w separatory wraz z niezbędnym oprzyrządowaniem.

## Gospodarowanie odpadami komunalnymi gminach

Wśród innych czynników wpływających na system gospodarowania odpadami stałymi literatura przedmiotu wymienia m.in. stosunek do marnotrawstwa lokalnej ludności, uwarunkowania prawne, poziom świadomości ekologicznej, infrastrukturę transportową i wiele innych (Agyeiwaah 2020). Jednym z mierników wydajności określających stopień dobrego zarządzania odpadami komunalnymi na danym obszarze jest ogólny stan środowiska miejskiego w ujęciu społecznym, ekonomicznym oraz zdrowie publiczne (Khan i in. 2022). Gospodarka odpadami przyczynia się do osiągnięcia wielu celów Zrównoważonego Rozwoju, takich jak: dobre zdrowie i samopoczucie, zrównoważone miasta i społeczności oraz odpowiedzialna konsumpcja i produkcja. Szacuje się, że do 2025 roku ilość stałych odpadów komunalnych (MSW) wzrośnie do „1,42 kg/osobę/dzień (2,2 mld ton rocznie) generowanych przez 4,3 mld mieszkańców miast na świecie”. Gospodarka odpadami stałymi w kontekście miejskim stała się ogromnym wyzwaniem dla władz lokalnych w krajach rozwijających się, przede wszystkim ze względu na rosnącą ilość MSW, trudności w zarządzaniu wyższymi kosztami MSW w ramach budżetu gminy, brak naukowego zrozumienia technicznych aspektów związanych z różnymi etapami zarządzania MSW i poziom wsparcia ze strony społeczeństwa.

Z danych literaturowych wynika, że najbardziej preferowanymi sposobami na minimalizację ilości odpadów komunalnych jest koncepcja „10R”, obejmująca działania: odmówić, przemyśleć, zmniejszyć, ponownie wykorzystać, naprawić, odnowić, przerobić, zmienić przeznaczenie, recykling i odzyskiwanie. Zintegrowany system MSWM (ang. *Municipal Solid Waste Management*) składa się z kluczowych procesów od momentu powstania odpadu do momentu unieszkodliwiania odpadu końcowego. Na efektywność systemu gospodarki odpadami największy wpływ ma złe planowanie tras, brak pojazdów, niewłaściwy sposób odbioru, słaba i ciasna sieć dróg oraz nieregularne planowanie odbioru odpadów (Saja 2021).

Gospodarowanie odpadami komunalnymi w Polsce stanowi ogromne wyzwanie, zarówno z punktu widzenia środowiskowego, jak i gospodarczego. Poziomy recyklingu odpadów komunalnych w Polsce znacząco odbiegają od najwyższych poziomów europejskich. Potrzeba lepszego gospodarowania odpadami komunalnymi wiąże się także z wymaganiami prawa europejskiego (*Mapa drogowa...* 2019). Gospodarka odpadami obejmuje cały szereg czynności związanych z postępowaniem z odpadami, począwszy od ich wytwarzania po zagospodarowanie poprzez odzysk surowców wtórnych oraz bezpieczne dla środowiska i człowieka unieszkodliwianie. Problematyka gospodarki odpadami ze względu na ich ilość, zróżnicowany skład i właściwości jest bardzo złożona (Khan i in. 2022). Wynika

to głównie z dwóch aspektów ściśle ze sobą powiązanych. Pierwszy dotyczy wzrostu masy odpadów wraz ze zwiększającą się liczbą ludności, rozwojem gospodarczym, a także wzrostem dobrobytu społeczeństwa. Drugi zaś jest związany z uciążliwością i zagrożeniem ze strony odpadów, szczególnie niebezpiecznych dla środowiska, a tym samym dla człowieka. Dlatego należy dążyć do ustanowienia szczegółowych i precyzyjnych zasad prawnych i organizacyjnych postępowania z różnymi rodzajami odpadów, co powinno mieć również przełożenie na zastosowanie tych przepisów w praktyce (Zębek 2018).

## Czynniki determinujące właściwe gospodarowanie odpadami w gminach

Wśród wielu czynników decydujących o sprawnym systemie zarządzania odpadami w gminach decydują przede wszystkim stawki za odpady oraz edukacja ekologiczna. Odpowiedni wybór metody ustalenia opłaty i wysokości stawki stanowi kluczowe znaczenie dla systemu gospodarowania odpadami komunalnymi w gminach. Rady gmin dokonują metody ustalenia opłaty za gospodarowanie odpadami komunalnymi od właścicieli nieruchomości zamieszkiwanej przez ludność gminy. Dopuszcza się stosowanie więcej niż jednej metody ustalenia opłat na obszarze gminy. Dla nieruchomości jednorodzinnych może obowiązywać inna metoda naliczania stawki opłaty niż dla nieruchomości wielorodzinnych. Do określenia stawki opłaty za gospodarowanie odpadami komunalnymi bierze się pod uwagę:

- liczbę mieszkańców zamieszkujących daną nieruchomość,
- ilość zużytej wody w danej nieruchomości,
- powierzchnię lokalu mieszkalnego oraz stawki opłaty,
- stawki opłaty od gospodarstwa domowego.
- Wysokość stawki może być uzależniona od takich czynników, jak:
  - powierzchnia lokalu mieszkalnego,
  - liczba mieszkańców zamieszkująca daną nieruchomość,
  - odbiór odpadów z terenów wiejskich lub miejskich,
  - rodzaj zabudowy.

Rada gminy może stosować łącznie różne kryteria różnicujące stawki opłaty. Udział gmin (na podstawie 302 gmin miejskich), na których obowiązuje metoda stawki opłaty opartej na liczbie mieszkańców zamieszkujących daną nieruchomość na przestrzeni lat 2014-2018 wynosi 86%, natomiast opartej na ilości zużytej wody udział gmin stanowi zaledwie 4%. Pomimo że metoda opłaty od osoby nie jest najuczciwsza, jest jednak najczęściej stosowana w gminach miejskich, co wynika z badań rynku w latach 2014-2019. Ze względu na wybór takiej metody przez gminę, z roku na rok, w związku z podwyżkami opłat za odpady komunalne, odnotowuje się drastyczny spadek osób zadeklarowanych. Jest to działanie niezgodne i nieuczciwe w stosunku do osób, które systematycznie wnoszą opłaty za odpady (den Boer i in. 2019). Drugim istotnym czynnikiem mającym wpływ na

właściwe zarządzanie odpadami w gminach i powodzenie transformacji w kierunku GOZ ma edukacja ekologiczna mieszkańców. Z badań dotyczących zrównoważonej konsumpcji wynika, że poziom wiedzy konsumenckiej Polaków jest bardzo niski. Polacy nie zdają sobie również sprawy z wpływu ich zachowań jako konsumentów na środowisko naturalne, a w konsekwencji na jakość życia obecnych i przyszłych pokoleń. Badania świadomości ekologicznej dowodzą, że Polacy z jednej strony są świadomi zagrożeń wynikających z nadmiernego wykorzystywania zasobów naturalnych, a z drugiej nie znają praktycznych sposobów zapobiegania temu zjawisku. Jako konsumenci kierują się ceną, a nie względami środowiskowymi. Dlatego też niezwykle istotne jest przeprowadzenie wśród wszystkich grup społecznych i wiekowych działań edukacyjnych ukierunkowanych przede wszystkim na zmianę zachowań konsumenckich. Wiedza na temat kupowanych produktów i ich producentów pod kątem wpływu środowiskowego może mieć ogromne znaczenie w budowaniu świadomości oraz zmianie sposobu myślenia i nawyków konsumenckich (*Mapa drogowa...* 2019).

## Gospodarka odpadami komunalnymi w gminie Gorzkowice i Częstochowa

Gmina Gorzkowice to gmina wiejska położona w południowej części powiatu piotrkowskiego, w województwie łódzkim. Siedziba władz gminy to Gorzkowice. Gmina zajmuje obszar 102,29 km<sup>2</sup>. Według danych z 31 grudnia 2021 roku gminę zamieszkiwało 8359 mieszkańców. Do 2009 roku na terenie gminy Gorzkowice, w miejscowości Krzemieniewice, funkcjonowało składowisko śmieci, które zostało rekultywowane. Powierzchnia wysypiska wynosiła 0,75 ha, natomiast pojemność 13 000 m<sup>3</sup>. Z danych statystycznych wynika, że na przestrzeni lat 1991-1998 składowano na tym wysypisku od 400 do 750 m<sup>3</sup> odpadów rocznie. Na podstawie umowy przetargowej odbiór odpadów komunalnych od mieszkańców gminy Gorzkowice i ich zagospodarowanie prowadzi firma Remondis Sp. z o.o. posiadająca oddział w Częstochowie oraz zakład w Radomsku. Na terenie gminy Gorzkowice stawka opłaty za odpady komunalne uzależniona jest od ilości i rodzaju odebranych odpadów oraz liczby mieszkańców zamieszkujących daną nieruchomość. Liczba zadeklarowanych osób na dzień 4 czerwca 2020 roku wynosiła 7358. Wysokość stawki opłaty dla mieszkańców prowadzących zbiórkę selektywną wynosi od 1 października 2020 roku 24,00 zł od osoby, natomiast koszt za odpady niesegregowane to 72,00 zł od osoby. Obecna stawka za odbiór odpadów komunalnych w gminie Gorzkowice nie pokrywa jednak całości kosztów (wysokość wpłat otrzymanych od mieszkańców nie pozwala na zapłatę wynagrodzenia firmie wyłonionej w drodze przetargu publicznego). W związku z powyższym Rada Gminy Gorzkowice podjęła decyzję o poniesieniu brakującej kwoty z budżetu gminy, aby nie podnosić opłat za odpady komunalne. W 2020 roku Gmina Gorzkowice dopłaciła kwotę blisko 600 tys. zł. Dodatkowo właściciele nieruchomości jednorodzinnych, którzy kompostują bioodpady

stanowiące odpady komunalne w kompostowniku przydomowym, mogą być częściowo zwolnieni z opłaty. Stawka za odpady segregowane w przypadku posiadania kompostownika może być zmniejszona o 2,00 zł od jednego mieszkańca na miesiąc.

Harmonogram wywozu odpadów przekazywany jest gminie przez firmę wywozową. Odpady odbierane są z podziałem na poszczególne frakcje z terenu zabudowy jednorodzinnej raz w miesiącu, natomiast z terenu zabudowy wielorodzinnej dwa razy w miesiącu. Dodatkowo w sezonie wiosennym oraz jesiennym organizowana jest zbiórka odpadów wielkogabarytowych, zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego sprzed posesji. W zabudowie jednorodzinnej bioodpady kompostować można w specjalnym kompostowniku przydomowym. W przypadku skorzystania z ulgi za kompostowanie bioodpady nie są odbierane spod nieruchomości przez firmę odbierającą odpady komunalne. Organy administracyjne w gminie podjęły decyzję selektywnego zbierania popiołu, z uwagi na poszukiwanie rozwiązań obniżenia kosztów za śmieci. Jednym z pomysłów jest składowanie go w wyrobiskach kopalnianych, wówczas Gmina nie ponosiłaby kosztów jego składowania. Krzywdzący jest fakt, że dla mieszkańców posiadających bezodpadowe systemy grzewcze nie przysługuje żadna ulga z tego względu. Jedną z form zachęt do selektywnego zbierania odpadów stosowaną w gminie Gorzkowice są darmowe worki. Za każdy wystawiony worek firmie wywozowej otrzymuje się worek zamienny. Każdy z mieszkańców może ubiegać się o dodatkową liczbę worków w Urzędzie Gminy. Zużyte baterie (małe) odbierane są z czterech punktów. W ramach uiszczenia comiesięcznej opłaty za śmieci odpady takie jak niebezpieczne odpady, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, odpady wielkogabarytowe, odpady budowlano-rozbiórkowe, zużyte opony, opakowania po środkach ochrony roślin i nawozach można oddawać do Gminnego Punktu Selektywnej Zbiórki Odpadów Komunalnych (PSZOK), zlokalizowanego w Gorzkowicach, w każdą pierwszą środę miesiąca w wyznaczonych godzinach.

Gmina Częstochowa jest gminą miejską w powiecie częstochowskim w południowej części województwa śląskiego. Siedziba władz gminy to Częstochowa. Gmina zajmuje powierzchnię 159,71 km<sup>2</sup>. W skład gminy wchodzi trzy gminy miejsko-wiejskie oraz trzynaście gmin wiejskich. Według danych z 31 grudnia 2021 roku gminę zamieszkiwało 207 467 osób. Składowisko odpadów Częstochowa znajduje się w gminie Poczesna w miejscowości Sobuczyna. Powierzchnia wysypiska śmieci wynosi 128 ha. Na podstawie umowy przetargowej odbiór odpadów komunalnych od mieszkańców gminy Częstochowa i ich zagospodarowanie prowadzi firma Remondis Sp. z o.o. Na terenie gminy stawka opłat za odpady komunalne uzależniona jest od ilości zużytej wody i rodzaju odebranych odpadów oraz liczby mieszkańców zamieszkujących daną nieruchomość. Wysokość stawki opłaty dla mieszkańców prowadzących zbiórkę selektywną wynosi na podstawie uchwały z dnia 27 grudnia 2021 roku 9,60 zł za 1 m<sup>3</sup> zużytej wody (zabudowa wielorodzinna) oraz w wysokości 29,00 zł od każdego mieszkańca zamieszkującego daną nieruchomość. Ustalono również stawkę za odpady niesegregowane

19,20 zł za 1 m<sup>3</sup> (zabudowa wielorodzinna) zużytej wody oraz w wysokości 58,00 zł od osoby zamieszkującą daną nieruchomość.

Harmonogram wywozu odpadów komunalnych przekazywany jest Częstochowie przez firmę wywozową. Odpady odbierane są z podziałem na poszczególne frakcje z terenu zabudowy jednorodzinnej średnio dwa razy w miesiącu, natomiast z terenu zabudowy wielorodzinnej trzynastcie razy w miesiącu. Dodatkowo firma wywozowa organizuje zbiórkę odpadów wielkogabarytowych i zbiórki elektroodpadów.

**Tabela 39.1. Porównywanie analizowanych gmin wiejskiej i miejskiej**

	<b>Gmina Gorzkowice</b>	<b>Gmina Częstochowa</b>
Położenie	Polska	Polska
Powiat	piotrkowski	Częstochowa
Województwo	łódzkie	śląskie
Gmina	wiejska	miejska
Siedziba władz gminy	Gorzkowice	Częstochowa
Obszar	102,29 km <sup>2</sup>	159,71 km <sup>2</sup>
Ludność	8359	207 467
Firma wywozowa	Remondis Sp. z o.o.	Remondis Sp. z o.o.
Metoda stawki	zabudowa jednorodzinna	
	za osobę	za osobę
	zabudowa wielorodzinna	
	za osobę	za m <sup>3</sup> zużytej wody
Wysokość stawki za odpady segregowane [zł]	zabudowa jednorodzinna	
	24,00	29,00
	zabudowa wielorodzinna	
	24,00	9,60
Wysokość stawki za odpady niesegregowane [zł]	zabudowa jednorodzinna	
	72,00	58,00
	zabudowa wielorodzinna	
	72,00	19,20
Składowisko odpadów	Jadwinów	Sobuczyna
Częstotliwość odbioru odpadów	zabudowa jednorodzinna	
	raz w miesiącu	dwa razy w miesiącu
	zabudowa wielorodzinna	
	dwa razy w miesiącu	osiem razy w miesiącu

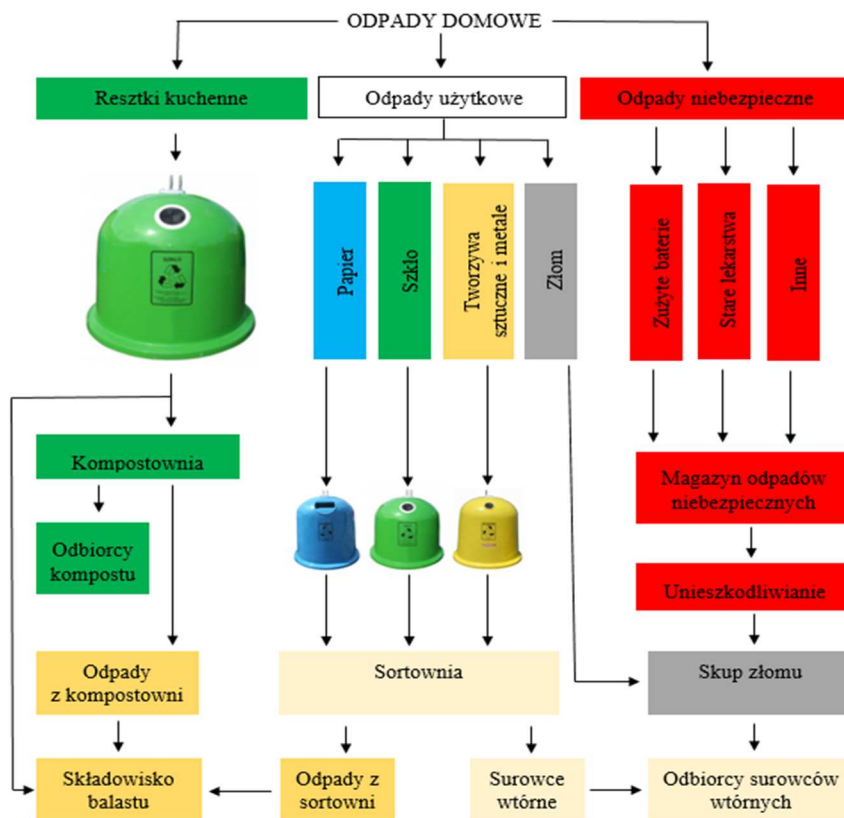
Źródło: (Dygudaj, Krasoń 2022)

W Częstochowie funkcjonuje osiem Punktów Selektywnego Zbierania Odpadów Komunalnych (TOPSZOK), rozmieszczonych na terenie całego miasta. Punkty te dedykowane są i składają się z trzech pojemników, w których zbierane są różne frakcje odpadów. Stacjonarny Punkt Selektywnego Zbierania Odpadów Komunalnych został wybudowany przy Częstochowskim Przedsiębiorstwie



Komunalnym Sp. z o.o. w Sobuczynie. SPSZOK to kompleksowo wyposażony obiekt przystosowany do zbierania i czasowego magazynowania odpadów komunalnych, a mianowicie niebezpiecznych, poremontowych oraz wielkogabarytowych, dostarczanych przez mieszkańców miasta Częstochowy. Punkt działa w trybie samoobsługowym, a do specjalnych kontenerów i pojemników można wyrzucić odpady komunalne selektywnie zbierane.

W *tab. 39.1* zestawiono najważniejsze informacje dotyczące analizowanych gmin w kontekście gospodarowania odpadami komunalnymi, natomiast *rys. 39.1* stanowi ogólny schemat postępowania z odpadami komunalnymi w analizowanych gminach.



**Rysunek 39.1.** Rodzaje odpadów komunalnych i sposoby ich zagospodarowania w gminach Częstochowa oraz Gorzkwice

Źródło: (Dygudaj, Krasoń 2022)

Jak wynika z dokumentów: Plan gospodarki odpadami dla województwa łódzkiego na lata 2019-2025 z uwzględnieniem lat 2026-2031 (Załącznik do Uchwały Nr XXXVI/466/21 2021) oraz Plan gospodarki odpadami dla województwa śląskiego na lata 2016-2022 (Załącznik do Uchwały Nr V/37/7/2017 2017),

jednym z głównych problemów powodujących zagrożenia dla środowiska jest niewłaściwy system gospodarowania odpadami, a w szczególności:

- niewystarczająca liczba PSZOK, do których wszyscy mieszkańcy mieliby łatwy i nieograniczony dostęp w zakresie przekazywania określonych frakcji odpadów komunalnych;
- niewystarczające działania kontrolne instalacji do przetwarzania odpadów, zwłaszcza w zakresie spełniania warunków określonych w przepisach prawa;
- brak aktualnych badań w zakresie składu morfologicznego oraz właściwości fizycznych i chemicznych odpadów;
- zbyt duży udział odpadów zmieszanych w całym strumieniu wytwarzanych odpadów komunalnych;
- składowanie odpadów ulegających biodegradacji selektywnie zbieranych;
- składowanie odpadów zmieszanych zawierających odpady niebezpieczne z gospodarstw domowych, w tym przeterminowane leki;
- wciąż zbyt niska świadomość społeczeństwa w przedmiocie nowoczesnej gospodarki odpadami komunalnymi – brak znajomości wymagań prawnych, potrzeby ograniczania ilości wytwarzanych odpadów, zasad selektywnego zbierania odpadów i ponownego użycia;
- niewystarczająco skuteczne działania w celu wyeliminowania nielegalnego gromadzenia odpadów.

Zarówno Plan gospodarki odpadami dla województwa śląskiego na lata 2016-2022, jak i Plan gospodarki odpadami dla województwa łódzkiego na lata 2019-2025 z uwzględnieniem lat 2026-2031 wyznaczają cel rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym. Strategia rozwoju zakłada również rekultywację zamkniętych składowisk odpadów komunalnych, likwidację miejsc nielegalnego składowania odpadów oraz likwidację szkodliwego azbestu.

Jednym z priorytetów samorządu województwa śląskiego jest zapewnienie efektywnej gospodarki odpadami poprzez m.in. podniesienie świadomości ekologicznej mieszkańców. Działania edukacyjne obejmują przede wszystkim druk ulotek, cykliczne spotkania „Sprzątanie Świata”, ogłoszenia w mediach społecznościowych, ogłoszenia prasowe, a także spotkania oraz konferencje naukowe. Podejmowane są również liczne inicjatywy w zakresie marnotrawstwa żywności. Na terenie całego województwa działają punkty „Banki Żywności” oraz punkty odbioru zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Podobne działania podejmowane są przez samorządy województwa łódzkiego, które oprócz ww. inicjatyw propagują ideę kompostowania bioodpadów w kompostownikach przydomowych. Ponadto, z uwagi na to, że minimalizacja wytwarzania odpadów jest najbardziej efektywną strategią w gospodarce odpadami, w województwie łódzkim planuje się utworzenie punktów napraw i ponownego użycia produktów. Zaproponowane rozwiązanie może wpłynąć na zmniejszenie ilości odpadów wytwarzanych przez mieszkańców, a tym samym na obniżenie kosztów ich zagospodarowania. Powstanie takich miejsc częściowo przyczyniłoby się do realizacji celu rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym. Stworzenie sprawnej sieci

punktów napraw i przygotowanie do ponownego użycia to duże wyzwanie dla gmin. Z założeń wynika, że początkowo takie punkty będą powstawać przy funkcjonujących punktach selektywnego zbierania odpadów komunalnych.

## Podsumowanie

Każdy system gospodarki odpadami komunalnymi, prowadzony według narzuconych ustawą zasad oraz stosowany w poszczególnych gminach, posiada zalety i wady. Szczególną uwagę należy zwrócić na metodę ustalenia opłaty oraz stawkę za odpady. Zarówno na terenie gminy Gorzkowice, jak i na terenie gminy Częstochowa obowiązują metody stawki opłaty ustalonej na podstawie liczby mieszkańców zamieszkujących daną nieruchomość jednorodzinna. Opłata zależna jest od specyfiki danej gminy, a w tym od zamożności mieszkańców oraz rodzaju zabudowy. Dobrym rozwiązaniem zastosowanym w gminie Gorzkowice jest ustalenie wysokiej stawki za odpady niesegregowane. Ma to na celu zmuszenie mieszkańców do selektywnego zbierania odpadów. Jedną z form zachęt są również darmowe worki dla właścicieli nieruchomości. System naliczania opłat w zabudowie wielorodzinnej według ilości zużytej wody w gminie Częstochowa wzbudza ciągle kontrowersje, czego dowodem są liczne skargi mieszkańców. Osoba zamieszkująca blok zużywająca dużą ilość wody musi liczyć się z bardzo wysokimi kosztami za śmieci. Obawy mieszkańców zabudowy wielorodzinnej wzbudza również fakt niedokładności pomiarowych wpływających na wysokość stawki. Uzależnienie wysokości opłaty za wywóz śmieci od zużycia wody, gdy dojdzie do awarii, wycieku wody w mieszkaniu lub na terenie części wspólnej, jest również bardzo krzywdzące, ponieważ nie odnosi się to w żaden sposób do ilości wytworzonych odpadów. Biorąc pod uwagę system logistyczny, a tym samym częstotliwość odbioru odpadów komunalnych na terenach analizowanych gmin, gmina Częstochowa powinna stać się przykładem dla gminy wiejskiej. W gminie Gorzkowice przeszkodami są jednak możliwości techniczne oraz organizacyjne w zakresie gospodarowania odpadami komunalnymi, z którymi boryka się gmina. Bez względu na długość okresu publikacji ogłoszenia do przetargu niezmiennie od kilku lat przystępuje tylko jedna firma. Fakt braku zainteresowania ze strony innych firm do świadczenia przedmiotowej usługi na terenie gminy wiejskiej nie pozwala na podjęcie pewnych decyzji, gdyż wizja braku odbioru odpadów jest przerażająca. Wsparcie płynące z gminy dotyczące dopłacania do systemu gospodarowania odpadami jest jednak dominującą zaletą i rekompensuje wady w systemie.

## Literatura

1. Agyeiwaah E. (2020), *The Contribution of Small Accommodation Enterprises to Sustainable Solid Waste Management*, „Journal of Hospitality and Tourism Management”, 44, s. 1-9.

2. Albin A. (2018), *Gmina w systemie gospodarowania odpadami komunalnymi*, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
3. Awasthi M., Awasthi S., Binod P., Chaturvedi P., Kumar V., Pandey A., Sarsaiya S., Sindhu R., Zhang Z. (2022), *Processing of Municipal Solid Waste Resources for a Circular Economy in China: An Overview*, „Fuel”, 317, 123478.
4. den Boer E., Jędrzak A., Kamińska-Borak J., Krzyśków A., Szpadt R., Wielgosiński G. (2019), *Gospodarka odpadami komunalnymi w Polsce. Analiza kosztów gospodarki odpadami komunalnymi*, Instytut Ochrony Środowiska Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
5. Czaczyk-Medeksa K. (2014), *Zarządzanie gospodarką odpadami komunalnymi. Badanie na gminach województwa kujawsko-pomorskiego*, Forum Ochrony Środowiska, Bydgoszcz.
6. Rożej A., Stolarski J., Deja M., Stochaj J. (2012), *Organizowanie i monitorowanie przepływu zasobów i informacji w jednostkach administracyjnych*, WSiP, Warszawa.
7. Dygudaj K., Krasoń P. (2022), *The Advantages and Disadvantages of the Municipal Waste Management System in Poland with an Example of Selected Communes*, „Advances in Thermal Processes and Energy Transformation”, 5, s. 1-7.
8. Graczykowski C. (2010), *Moje Gorzkowice*, Gminna Biblioteka Publiczna w Gorzkowicach, Gorzkowice.
9. Saja A., Junaideen S., Zimar A. (2021), *Municipal Solid Waste Management Practices and Challenges in the Southeastern Coastal Cities of Sri Lanka*, „Sustainability”, 13, 4556. <https://doi.org/10.3390/su13084556> (dostęp: 30.04.2022).
10. Khan A., Sharholy M., Pervez N., Al-Mansour A., Ahmad K., Alam P., Kamal M., Alam S., Naddeo V. (2022), *Evaluation of Cost Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Management Systems*, „Journal of King Saud University – Science”, 34, 4, 101997.
11. Kozerska M., Smolnik P. (2017), *Procesy logistyczne w gospodarowaniu odpadami komunalnymi w wybranym przedsiębiorstwie*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, 12, s. 1614-1621.
12. Kozłowski W. (2018), *Ocena inwestycji w infrastrukturę gospodarki odpadami komunalnymi na przykładzie ZGOK Olsztyn*, „Gospodarka w Praktyce i Teorii”, 3.
13. Kundariya N., Mohanty S., Varjani S., Ngo H., Wong J., Taherzadeh M., Chang J., Ng H., Kim S., Bui X., (2021), *A Review on Integrated approaches for Municipal Solid Waste for Environmental and Economical relevance: Monitoring Tools, Technologies, and Strategic Innovations*, „Bioresource Technology”, 342, 125982.
14. *Mapa drogowa transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym* (2019), <https://gozwpraktyce.pl/wp-content/uploads/2020/05/Mapa-drogowa-GOZ.pdf> (dostęp: 30.04.2022).
15. Matysiak W., Mizerska-Błasiak E., Stochaj J., Śliżewska J., Śliżewski P. (2015), *Organizowanie i monitorowanie przepływu zasobów i informacji w jednostkach gospodarczych*, WSiP, Warszawa.
16. Singh A. (2019), *Managing the Uncertainty Problems of Municipal Solid Waste Disposal*, „Journal of Environmental Management”, 240, s. 259-265.
17. Stowarzyszenie Technologii Ekologicznych SILESIA (2010), *Sprawdzone metody gospodarowania odpadami komunalnymi*, SILESIA, Opole, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/podrecznik.pdf>(dostęp: 30.04.2022).
18. Wąsowicz K., Famielec S., Chełkowski M. (2018), *Gospodarka odpadami komunalnymi we współczesnych miastach*, Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Kraków.
19. Załącznik do Uchwały Nr XXXVI/466/21 Sejmiku Województwa Łódzkiego z dnia 28 września 2021 r., *Plan gospodarki opadami dla województwa łódzkiego na lata 2019-2025 z uwzględnieniem lat 2026-2031*, Łódź.

20. Załącznik do Uchwały Nr V/37/7/2017 *Sejmiku Województwa Śląskiego z dnia 24 kwietnia 2017 roku, Planu gospodarki odpadami dla województwa śląskiego na lata 2016-2022*, Katowice.
21. Zębek E. (2018), *Zasady gospodarki odpadami w ujęciu prawnym i środowiskowym*, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.
22. <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/metadane/cechy/3586> (dostęp: 30.04.2022).
23. Spiller J. (2020), *Projekt KPGO 2022. Resort wskazuje nowe potrzeby inwestycyjne w zakresie gospodarki odpadami*, <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/kpgo-2022-projekt-luka-inwestycyjna-9696.html> (dostęp: 15.04.2022).

## The Analysis of Determining Factors of Appropriate Municipal Waste Management on the Example of Selected Communes in Poland

**Abstract:** By joining the European Union, Poland adopted the objectives of the Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste, declaring at the same time a reduction in the amount of waste deposited in landfills, e.g. for recycling. However, despite numerous initiatives undertaken both at the regional and national level, the ecological awareness of Poles is still low, and, additionally, the growing costs of disposal are not conducive to proper waste management. The chapter presents a comparative analysis of the advantages and disadvantages of the municipal waste management system in selected communes of the Śląskie and Łódzkie voivodships. Based on statistical data for 2020 for the communes of Częstochowa and Gorzkowice, the existing solutions aimed at minimizing and proper handling of waste were analyzed. The advantages and disadvantages of the introduced system of incentives and penalties have been demonstrated, in particular with regard to the rates charged by the communes for waste disposal. As a result of the analysis, solutions were proposed to improve the municipal waste management system in the analyzed communes, and in particular to raise the ecological awareness of the inhabitants, which will translate into an increase in the level of recycling and recovery of selectively collected waste in the analyzed communes.

**Keywords:** environmental awareness, management, municipal solid waste (MSW), recycling, segregation

## Rozdział 40

# Analiza właściwości fizykochemicznych materiału z biomasy w formie pelletu z łupiny orzecha włoskiego

Michał Nabiątczyk, Dorota Musiał, Agnieszka Bala-Litwiniak

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

**Streszczenie:** W rozdziale zaprezentowano możliwość wykorzystania materiału z biomasy w formie łupiny orzecha włoskiego do produkcji paliwa stałego w postaci granulatu. Celem badania było wytworzenie pelletu i sprawdzenie jego właściwości fizykochemicznych. Przeprowadzone badania obejmują określenie zawartości popiołu, części lotnych, wilgoci, gęstości nasypowej oraz ciepła spalania wytworzonego paliwa. Otrzymane wyniki pozwoliły na ustalenie przydatności łupiny orzecha w przemyśle energetycznym i określenie jakości wytworzonego paliwa.

**Słowa kluczowe:** łupina orzecha włoskiego, materiały z biomasy, paliwa alternatywne, właściwości fizykochemiczne

## Wprowadzenie

Dynamicznie zmieniająca się rzeczywistość na rynku paliw kopalnych, spowodowana wybuchem wojny w Ukrainie, sankcjami Unii Europejskiej oraz skutkami niedawnej pandemii, doprowadziła do niedoborów węgla kamiennego. Ten surowiec energetyczny służył jako źródło energii nie tylko w elektrowniach i ciepłowniach, ale także w gospodarstwach domowych oraz małych przedsiębiorstwach. Według danych GUS z 2021 roku około 35% wykorzystanego w Polsce węgla przypadało na dwie ostatnie grupy (Berent-Kowalska i in. 2022, s. 12-13). Z powodu coraz trudniejszej sytuacji wielu przedstawicieli wymienionych grup zdecydowało się na wykorzystanie zamiennika w postaci paliw wytwarzanych z biomasy. Także rozporządzenia i dyrektywy unijne w znaczący sposób wpłynęły na decyzję o zmianie paliw kopalnych na alternatywne źródła (Regulation (EU) 2021..., s. 5). Zgodnie z dyrektywami państwa Unii mają ograniczyć do 2023 roku emisję CO<sub>2</sub> o co najmniej 55% w porównaniu z poziomami z roku 1990. Chociaż paliwa stałe z biomasy nie stanowią jedynej alternatywy dla paliw

kopalnych, są one dobrym i tanim zamiennikiem, a ich duża dostępność skłania do ich użytkowania. Pellety z takich materiałów jak rośliny szybko rosnące, drewno oraz niektóre biomasy odpadowe stanowią ekonomicznie opłacalne i ekologiczne zastępstwo dla węgla kamiennego ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne i niższe od pozostałych paliw opodatkowanie, (Dz.U. 2004 nr 54 poz. 535; Niedziółka, Zuchniarz 2006, s. 1; Kowalczyk-Juško, Cybulski 2012, s. 155). Jednakże zwiększone z powodu ostatnich wydarzeń zainteresowanie ludności może przyczynić się do niedoboru oraz wzrostu cen biomasy. Aby temu przeciwdziałać, należy szukać dodatkowych źródeł biomasy, które można wykorzystać do produkcji paliw. Część materiałów z biomasy, zwłaszcza odpadowej, wciąż można wykorzystać do produkcji paliw stałych, które są łatwe i czyste w użytkowaniu, wykazując przy tym lepsze od nieprzetworzonej biomasy właściwości energetyczne (Zajemska, Musiał 2013, s. 108).

### **Energetyczne wykorzystanie materiałów z biomasy rolniczo-spożywczej**

Łupina orzecha włoskiego to materiał z biomasy odpadowej, który nadaje się do wykorzystania w przemyśle energetycznym. Światową produkcję orzecha włoskiego szacuje się na około 2-3 mln ton rocznie, z czego Polska dostarcza niemal 7 tys. ton (Bogumił i in. 2022, s. 43). Orzech włoski znajduje zastosowanie głównie w przemyśle spożywczym jako dodatek do produktów takich jak batony i maśła orzechowe. Można z niego otrzymać także olej, który wykorzystuje się zarówno do produkcji lakierów i farb, jak i w przemyśle spożywczym (Wroniak i in. 2016, s. 45). Wykorzystaniu ulega jednak tylko nasiono, nie zaś jego skorupka, która stanowi połowę masy orzecha włoskiego (Matin i in. 2023, s. 1). W związku z tym przemysł przyczynia się do znacznej produkcji odpadu w postaci łupiny. Skorupka znajduje zastosowanie w małych ilościach jako ściółka dla zwierząt, natomiast jej znaczna część jest spalana na polach i ogrodach (Gürdil i in. 2016, s. 162). Łupina może być także potencjalnie wykorzystana jako dodatek do kompozytów cementowych i betonów w celu poprawy ich właściwości mechanicznych (Łasica, Małek 2021, s. 2). Łupina orzecha włoskiego posiada jednak jeszcze jedno zastosowanie – jako materiał dla przemysłu energetycznego, w formie niedrogiego, ekologicznego i odnawialnego źródła energii. W celu użycia łupiny w energetyce należy zwrócić szczególną uwagę na właściwości fizykochemiczne paliwa, określone w odpowiednich normach i przepisach unijnych (PN-EN ISO 17225-6 (2021), s. 5). To dzięki nim będzie można otrzymać paliwo spełniające wymagania jakościowe, niebędące zagrożeniem dla środowiska naturalnego oraz zdrowia i życia człowieka. Z biomasy można wytwarzać paliwo stałe w postaci pelletu, które będzie łatwe i czyste w użyciu. Przed przystąpieniem do pelletyzacji materiał należy najpierw poddać procesowi suszenia i rozdrabniania. Suszenie przyczyni się do zwiększenia wartości opałowej materiału, pozwoli na

jego bezpieczne magazynowanie i nie dopuści do gnicia składowanego pelletu. Przygotowany pellet należy poddać szeregowi badań mających na celu ustalenie jego właściwości fizykochemicznych zgodnie z obowiązującymi normami.

## Metodyka badawcza

Do przeprowadzenia badań zostały użyte orzechy włoskie z własnej plantacji z 2022 roku. Wszystkie orzechy zostały zebrane i składowane przez okres trzech miesięcy w zaciemnionym i zadaszonym pomieszczeniu, gdzie były poddane procesowi suszenia. Wszystkie orzechy zostały rozdzielone i oczyszczone ręcznie przed przystąpieniem do następných procesów. Przed dalszym przetwarzaniem materiału zbadano wartość gęstości nasypowej dla nieprzetworzonej biomasy. Oczyszczone i wysuszone łupiny zostały rozdrobnione przy pomocy laboratoryjnego młynka nożowego FAEL PSM – 1SRP i przesiane przez sito o średnicy otworów 1 mm. Po rozdrobnieniu biomasy został przeprowadzony proces pelletyzacji przy pomocy pelletarki przemysłowej ZLSP 150B o mocy 4 kW. W jego wyniku otrzymano paliwo stałe w postaci granulatu (*rys. 40.1*) o średnicy 6 mm i długości około  $3,15 \pm 40$  mm.



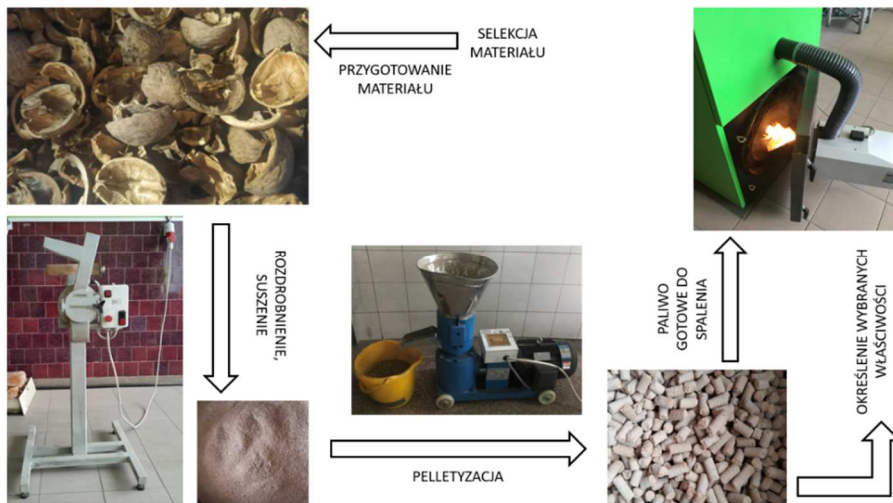
**Rysunek 40.1.** Pellety z łupiny orzecha włoskiego

Źródło: Opracowanie własne

W procesie użyty został lignosulfonian wapnia w formie lepiszcza w ilości około 2% (Kulig i in. 2010, s. 33) oraz woda. Wyprodukowany pellet w ilości około 30 kg został ponownie osuszony do stanu powietrzno-suchego przez okres dwóch tygodni. Następnie część pelletów zmielono w młynku i przeprowadzono szereg badań, do których można zaliczyć oznaczanie zawartości popiołu,



zawartości części lotnych, wilgoci oraz wartości ciepła spalania paliwa. Dla wytworzonego pelletu określono także wartość gęstości nasypowej. Rezultaty wszystkich badań zostały przedstawione w *tab. 40.1*. Przebieg procesu peletyzacji przedstawiono na *rys. 40.2*.



**Rysunek 40.2.** Schemat przetwarzania łupiny orzecha w paliwo do celów energetycznych

Źródło: Opracowanie własne

Do badania zawartości wilgoci przygotowane zostały trzy próbki w szklanych pojemnikach zgodnie z normą PN-EN ISO 18134-1. Do każdego z wstępnie wygrzanych pojemników odważono 1 g próbki z dokładnością do 0,0001 g. Próbki z naważkami umieszczono w nagrzanym do 105°C suszarce laboratoryjnej FN 055 i utrzymywano w tej temperaturze przez godzinę. Wyjęte próbki ostudzono do temperatury pokojowej w ekcykatorze i dokonano pomiarów masy na wadze laboratoryjnej. Zważone próbki ponownie umieszczono w ekcykatorze, a następnego dnia powtórzono proces suszenia, aż do uzyskania stałej masy. Przyjęte wyniki użyto do obliczenia procentowej zawartości wilgoci.

Badanie zawartości popiołu przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 18122. Do wygrzanych w temperaturze 550°C tygli ceramicznych odważono 1 g biomasy z dokładnością do 0,001 g. Następnie próbki umieszczono w piecu muflowym i stopniowo, przez okres 40 min, podnoszono temperaturę do 250°C. W tej temperaturze próbki były utrzymane przez godzinę, żeby pozwolić na ulotnienie się części lotnych przed zapłonem materiału. Następnie przez pół godziny podnoszono temperaturę do 550°C i utrzymywano w niej próbki przez 120 min. Po upływie tego czasu próbki ostudzono i umieszczono w ekcykatorze. Po osiągnięciu temperatury pokojowej ponownie zważono próbki i obliczono zawartość popiołu.

Do przeprowadzenia badania zawartości części lotnych skorzystano z normy PN-EN ISO 18123. Do wygrzanych w temperaturze 900°C tygli ceramicznych odważono 1 g materiału na wadze laboratoryjnej z dokładnością do 0,001 g i wsadzono do pieca rozgrzanego do temperatury 900°C na okres 7 min. Po upływie czasu tygle wyciągnięto i ochładzano na powietrzu przez 10 min, po czym umieszczono je w ekzykatorze na pół godziny. Ostudzone do temperatury pokojowej tygle zważono na wadze laboratoryjnej, a na ich podstawie obliczono zawartość części lotnych.

Przeprowadzono oznaczanie ciepła spalania przy użyciu kalorymetru KL-12Mn2 wyposażonego w bombę tlenową, zgodnie z normą PN-EN 14918. Do próbki odważono 1 g biomasy z dokładnością do 0,0001 g. Po zważeniu próbkę odpowiednio spreparowano i umieszczono wewnątrz bomby tlenowej. Bombę napełniono sprężonym tlenem pod ciśnieniem 40 atm, umieszczono w kalorymetrze i uruchomiono program badawczy. Próbę przeprowadzono pięć razy, odrzucając dwa najbardziej skrajne wyniki. Następnie otrzymane wartości ciepła spalania, zawartości popiołu, części lotnych i wilgoci użyto w programie komputerowym do obliczenia wartości opałowej paliwa.

## Wyniki badań

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w *tab. 40.1*.

**Tabela 40.1. Wyniki badań wybranych właściwości fizykochemicznych dla pelletu z łupiny orzecha włoskiego**

Wybrana właściwość fizykochemiczna	Wyniki badań	Wartości według normy PN-EN ISO 17225-6	Wartości według normy PN-EN ISO 17225
Gęstość nasypowa łupiny orzecha (g/dm <sup>3</sup> )	226,09	≥ 550	≥ 600
Gęstość nasypowa pelletu (g/dm <sup>3</sup> )	441,10	≥ 550	≥ 600
Średnia zawartość wilgoci (%)	8,25	≤ 15	≤ 10
Średnia zawartość popiołu (%)	1,31	≤ 10	≤ 2
Średnia zawartość części lotnych (%)	77,72	-	-
Średnie ciepło spalania analityczne Q <sub>sa</sub> (MJ/kg)	18,17	-	-
Średnia wartość opałowa analityczna Q <sub>ia</sub> (MJ/kg)	16,90	≥ 14,5	≥ 16,5

Źródło: Opracowanie własne, PN-EN ISO 17225-6 (2021), PN-EN ISO 17225 (2014)

Analizując otrzymane wyniki, można zauważyć, że średnia wilgoc dla otrzymanego pelletu wynosi 8,25% i mieści się w normie zarówno dla pelletów nie-drzewnych, jak i drzewnych. Podobnie zawartość popiołu osiąga średnią wartość 1,31% i tym samym spełnia wymagania obu norm. Zjawisko to jest pozytywne

i świadczy o wysokiej jakości wytworzonego paliwa oraz użyteczności biomasy w postaci łupiny orzecha włoskiego dla zastosowań energetycznych. Zawartość części lotnych w pelletach wynosi średnio 77,72%. Dzięki temu paliwo charakteryzuje się większą reaktywnością w porównaniu z paliwami tradycyjnymi, kompensując to zmniejszoną wartością opałową, która wynosi średnio około 16,9 MJ/kg. Wartość opałowa, podobnie jak pozostałe właściwości fizykochemiczne, spełnia wymagania zarówno dla pelletów nieдрzewnych, jak i drzewnych. Relatywnie niska wartość opałowa paliwa w porównaniu z paliwami kopalnymi może zostać zredukowana poprzez stworzenie pelletu z mieszanki kilku różnych rodzajów biomasy. Alternatywnie możliwe jest zastosowanie pelletu z łupiny w procesie współspalania, choć ze względu na kryzys na rynku paliw kopalnych nie jest to rozwiązanie pewne i opłacalne. Gęstość nasypowa zarówno przed, jak i po pelletyzacji jest niska i nie spełnia wymagań określonych w normach. Główną przyczyną jest kruchość wytworzonego pelletu, mogąca mieć podłoże w niewłaściwie dobranych proporcjach wody do biomasy w mieszaninie przeznaczonej do pelletyzacji. Inną prawdopodobną przyczyną jest niska jakość oraz długi okres eksploatacji pelletearki. Można zauważyć niemal dwukrotny wzrost gęstości nasypowej granulatu w porównaniu z nieprzetworzonym materiałem, a co za tym idzie, wzrost wartości gęstości nasypowej świadczy o pozytywnym wpływie przetwarzania materiału z biomasy na pellety.

Otrzymane wyniki pozwalają na zweryfikowanie przydatności paliwa i jego jakości, ale nie pozwalają na dogłębne sprawdzenie jego wpływu na środowisko naturalne oraz kotły, w których będzie ono spalane. Aby się tego dowiedzieć, należy przeprowadzić właściwe badania, które pozwolą w sposób dokładniejszy określić poziom jakości otrzymanego paliwa.

## Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że paliwo stałe w postaci pelletu z analizowanej biomasy spełnia większość wymagań obecnych w normach unijnych. Co więcej, wyniki mieszczą się nie tylko w normie określającej wymagania dla pelletów nieдрzewnych, ale także dla pelletów drzewnych. Świadczy to o wysokiej jakości wytworzonego paliwa. Wartość opałowa wynosząca 16,9 MJ/kg pozwala na wykorzystanie pelletu z łupiny orzecha włoskiego w celach energetycznych. Niska zawartość popiołu wynosząca 1,31% pozytywnie świadczy o wytwarzanym paliwie z punktu widzenia ekologicznego, natomiast wartość wilgoci na poziomie 8,25% pozwala na bezpieczne składowanie i eksploatację paliwa. Łupina orzecha włoskiego jest zatem materiałem, który nadaje się do produkcji paliw w celach energetycznych dla gospodarstw domowych i małych przedsiębiorstw.

Niska gęstość nasypowa może mieć przyczynę w niewłaściwych proporcjach wody w stosunku do biomasy lub w niskiej jakości i zużyciu sprzętu laboratoryjnego w postaci pelletearki. Usprawnienie procesu pelletyzacji poprzez wymianę

sprzętu lub dobór właściwych proporcji może w znaczący sposób wpłynąć na zwiększenie wartości gęstości nasypowej. Wykonanie paliwa będącego mieszanką różnych rodzajów biomasy również może wpłynąć na zwiększenie gęstości nasypowej.

Stosunkowo niska, choć wystarczająca z punktu widzenia normy prawnej wartość opałowa, może zostać zwiększona poprzez zastosowanie procesu współspalania z paliwami konwencjonalnymi lub wytworzenia pelletu będącego mieszaniną różnych rodzajów biomasy odpadowej.

Brak danych dotyczących wpływu spalania materiału w kotłach na ich elementy stalowe oraz wpływ na środowisko rodzi potrzebę przeprowadzenia badań w tym zakresie. Przeprowadzenie chromatografii gazowej pozwoliłoby na wykrycie potencjalnie szkodliwych związków w spalinach i umożliwiłoby dokładniejsze określenie przydatności paliwa pod względem ekologicznym.

## Literatura

1. Berent-Kowalska G., Peryt S., Kacprowska J., Boczek-Gizińska R., Żarek E., Brasse J. (2022), *Zużycie paliw i nośników energii w 2021 r.*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
2. Bogumił A., Borychowska H., Dach-Oleszek I., Dziejowska I., Dziergowska A., Floriańczyk Z., Grabowska A., Kuliś M., Majcher A., Miziołek D., Obarowski A., Orzanowska A., Przypaśniak J., Pytkowska R., Rafa W., Tylkowska-Siek A., Wasilewska K., Wojciechowski M., Wróblewska A., Zaremba Ł., Zbrzeska E. (2022), *Rolnictwo w 2021 r.*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
3. Gürdil G., Demirel B., Baz Y., Demirel Ç. (2016), *Pelleting Hazelnut Husk Residues for Biofuel*, Proceeding of 6<sup>th</sup> International Conference on Trends in Agricultural Engineering 2016, s. 162-165, <http://2016.tae-conference.cz/proceeding/TAE2016-025-G-Gurdil.pdf> (dostęp: 26.02.2023).
4. Kowalczyk-Juśko A., Cybulski J. (2012), *Biomasa drzewna jako surowiec dla energetyki*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, 13, 10, s. 155-158.
5. Kulig R., Skonecki S., Gawłowski S., Zdybel A., Łysiak G. (2013), *Oddziaływanie ciśnienia na efektywność zageszczania trocin wybranego drewna miękkiego*, „Acta Scientiarum Polonorum. Technica Agraria”, 12(1-2) 2013, s. 31-40.
6. Łasica W., Małek M. (2021), *Wpływ dodatku odpadowych granulowanych lupin orzecha oraz kolb kukurydzy na właściwości mechaniczne kompozytów cementowych i betonów*, [w:] Jędrzejewska J., Danielewska A., *Nauki ścisłe i przyrodnicze – przegląd wybranych zagadnień*, s. 158-177, Wydawnictwo Naukowe Tygiel, Lublin.
8. Matin A., Brandić I., Voća N., Bilandžija N., Matin B., Jurišić V., Špelić K., Antonović A., Grubor M., Krička T. (2023), *Influence of Conduction Drying on the Physical and Combustion Properties of Hazelnut Shell*, „Energies”, 16, 3, 1297.
9. Niedziółka I., Zuchniarz A. (2006), *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*, „Motrol”, 8A, s. 232-237, <https://pdf4pro.com/view/analiza-energetyczna-wybranych-rodzaj-211-w-257104.html> (dostęp: 20.02.2023).
10. PN-EN 14918 (2010), *Biopaliwa Stałe – Oznaczenie wartości opałowej*, PKN, Warszawa.
11. PN-EN ISO 17225 (2014), *Biopaliwa Stałe – Specyfikacja paliw i klasy, Część 2: Klasy peletów drzewnych*, PKN, Warszawa.

12. PN-EN ISO 17225-6 (2021), Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy, Część 6: Klasy peletów nieдрzewnych, PKN, Warszawa.
13. PN-EN ISO 18122 (2015), Biopaliwa Stałe – Oznaczanie zawartości popiołu, PKN, Warszawa.
14. PN-EN ISO 18123 (2015), Biopaliwa Stałe – Oznaczanie zawartości części lotnych, PKN, Warszawa.
15. PN-EN ISO 18134-1 (2015), Biopaliwa Stałe – Oznaczanie zawartości wilgoci metodą suszarkową, Część 1: Wilgoć całkowita Metoda referencyjna, PKN, Warszawa.
16. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law') (2021), „Official Journal of the European Union”, 243.
17. *Światowa produkcja orzecha włoskiego według kraju*, AtlasBig.com, <https://www.atlasbig.com/pl/kraje-wedlug-produkcji-orzecha-wloskiego#:~:text=%C5%9Awiatowa%20produkcja%20orzecha%20w%C5%82oskiego%20wed%C5%82ug%20kraju%20Chiny%20jest,jest%20trzecim%20co%20do%20wielko%C5%9Bci%20producentem%20orzecha%20w%C5%82oskiego> (dostęp: 05.03.2023).
18. Ustawa z dnia 11 marca 2004 r. o podatku od towarów i usług (Dz.U. 2004 nr 54 poz. 535).
19. Wroniak M., Parzychowska J., Rękas A. (2016), *Charakterystyka i porównanie wartości żywieniowej orzechów i otrzymanych z nich olejów*, „Postępy Nauki i Technologii Przemysłu Rolno-Spożywczego” 71, 3, s. 44-58.
20. Zajemska M., Musiał D. (2013), *Energetyczne wykorzystanie biomasy z produkcji rolniczej w procesie współspalania*, „Problemy Inżynierii Rolniczej”, 21, 4, s. 107-118.

## Analysis of Physicochemical Properties of Pellets Made from Walnut Shells

**Abstract:** The chapter presents the possibility of using biomass material in the form of walnut shells for the production of solid fuel in the form of granules. The aim of the study was to produce a pellet and check its physicochemical properties. The tests carried out include the content of ash, volatile parts, moisture, bulk density and heat of combustion of the produced fuel. The obtained results made it possible to determine the usefulness of walnut shells in the energy industry and to determine the quality of the produced fuel.

**Keywords:** alternative fuels, biomass materials, physicochemical properties, walnut shell

## Rozdział 41

# Zachowania proekologiczne konsumentów względem opakowań w kształtowaniu jakości produktów z sektora FMCG

Alicja Kulik<sup>1</sup>, Maciej Jaworek<sup>1</sup>, Ewa Biazik<sup>2</sup>

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

<sup>1</sup>SKN Zarządzania Bezpieczeństwem w Organizacji

<sup>2</sup>Wydział Inżynierii Produkcji

**Streszczenie:** Opakowania produktów z sektora FMCG (produkty szybkozbywalne), do którego zalicza się wyroby spożywcze, farmaceutyczne i kosmetyczne, powinny odznaczać się możliwością zachowania wysokiej jakości opakowanych w nie wyrobów, jak również gwarantować wygodę użytkownika konsumentom. Coraz większe znaczenie zyskuje ekologiczność w opakowalnictwie z jednej strony ze względu na ilość wytwarzanych odpadów, z drugiej ze względu na wzrost zainteresowania społeczeństwa rozwiązaniami ukierunkowanymi na ograniczenie degradacji środowiska. Celem rozdziału była analiza zachowań proekologicznych konsumentów względem opakowań dóbr szybkozbywalnych, mogących mieć wpływ na postrzeganą jakość produktów przez konsumentów. Badanie zostało przeprowadzone w kwietniu 2023 roku w grupie 71 młodych respondentów. Wyniki badania wskazują, że większość respondentów deklaruje, że rodzaj opakowania ma znaczenie przy wyborze produktów FMCG. Do najczęściej wymienianych przez respondentów zachowań proekologicznych zaliczyć można używanie opakowań wielokrotnego użytku oraz segregację zużytych opakowań. Ponadto większość respondentów opowiada się za wprowadzeniem systemu kaucyjnego w przypadku jednorazowych opakowań metalowych oraz opakowań PET.

**Słowa kluczowe:** zachowania proekologiczne, opakowania, sektor FMCG

## Wprowadzenie

Podejście Polaków do kwestii opakowań na rynku FMCG jest związane z ich nawykami zakupowymi. Polski konsument wyróżnia się spośród konsumentów innych krajów UE bardzo dużą wrażliwością cenową. Dane opublikowane przez Portal Spożywczy wskazują, iż wskaźnik elastyczności cenowej dla Europy Środkowo-Wschodniej wynosi 2,6, podczas gdy dla Ameryki Płn. 1,1 (PortalSpozywczy.pl 2014). Polacy wykazują szczególnie wysoką wrażliwość na cenę

promocyjną. Mówi się nawet, że Polak jest dużo bardziej lojalny wobec promocji niż wobec marki czy sieci handlowej (PortalSpozywczy.pl 2014). Polscy konsumenci deklarują, że opakowanie ma dla nich mniejsze znaczenie niż marka, cena i jakość (Ratajczyk 2016). Natomiast warto podkreślić, że mają za to bardzo konkretne oczekiwania wobec opakowań. Niektórzy autorzy (Nowogródzka i in. 2014) wskazują, iż walory opakowania często mogą być decydującym czynnikiem wpływającym na zainteresowanie produktem. Ponadto opakowanie staje się coraz częściej skutecznym sposobem komunikowania się firmy z otoczeniem. Opakowanie przyszłości w przypadku artykułów szybkozbywalnych, jak m.in. żywności, powinno zdaniem konsumentów być „ekologiczne, atrakcyjne wizualnie, inteligentne, bezpieczne, wygodne, a do tego innowacyjne, przemawiające do wszystkich zmysłów i po prostu funkcjonalne, nowoczesne i oryginalne” (PortalSpozywczy.pl 2015; Ratajczyk 2016). Obecnie w systemach produkcyjnych widoczny jest duży nacisk na wdrażanie idei zrównoważonego rozwoju, które powinny być stosowane również w przypadku branży opakowań. Zrównoważony rozwój dotyczy wielu aspektów m.in. ekonomicznych, społecznych i ekologicznych (Sadowski 2008). Wcześniejsze badania nad zrównoważonym rozwojem produktów wykazały, że wpływ zrównoważonej produkcji wyrobów na postrzeganą jakość tych wyrobów jest ogólnie pozytywna (Lee i in. 2013).

Dzisiejszy konsument jest bardziej świadomy swoich wyborów produktowych i ich wpływu na środowisko niż konsument zaledwie pięć lat temu (Jain, Hudnurkar 2022). Również A. Kowalska (2017) wskazuje, iż wzrasta zainteresowanie konsumentów kwestią ekologiczności opakowań produktów szybkozbywalnych. Ekologiczność opakowań w branży FMCG jest związana z wykorzystaniem surowców do stworzenia opakowania, ich wpływem na proces transportowy oraz zagospodarowaniem zużytych opakowań (Pezala, Truszczyński 2016). Celem pracy było analiza zachowań proekologicznych konsumentów względem opakowań dóbr z sektora FMCG.

## Metodyka

Autorski kwestionariusz ankiety został rozpowszechniony w grupie studenckiej drogą elektroniczną (metoda CAWI). Badanie ankietowe przeprowadzono w kwietniu 2023 roku i zastosowano w nim nielosowy dobór próby według A. Kowalskiej (2010). Pytania ankietowe odnosiły się do częstotliwości zakupów produktów opakowanych w wybrane rodzaje opakowań, znajomości opakowań biodegradowalnych oraz zachowań proekologicznych względem opakowań dóbr szybkozbywalnych, takich jak m.in. żywność czy kosmetyki. Grupę badaną stanowiło 71 respondentów w wieku od 19 do 28 lat, zróżnicowanych pod względem płci, miejsca zamieszkania, poziomu wykształcenia oraz wysokości dochodu (*tab. 41.1*).



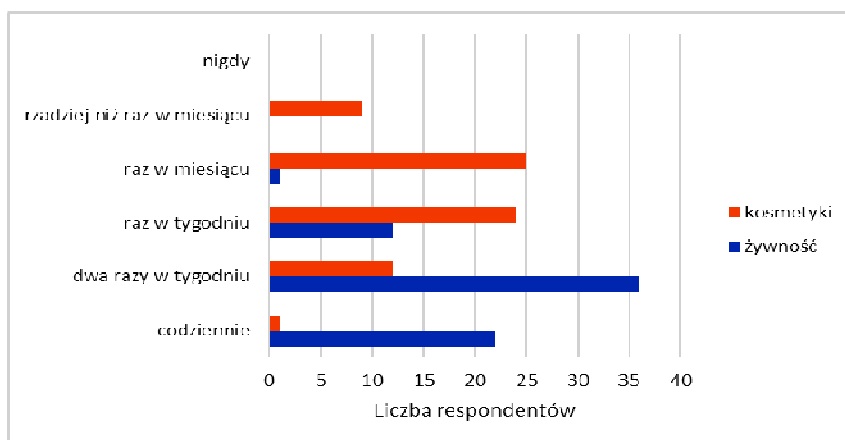
**Tabela 41.1. Charakterystyka grupy badanej**

	Liczba respondentów	% respondentów
<b>Wiek</b> 19-28 lat	71	100%
Mężczyźni	29	41%
Kobiety	42	59%
<b>Wykształcenie</b> Średnie	25	35,2%
Wyższe	46	52,1%
Brak odpowiedzi	9	12,7%
<b>Miejsce zamieszkania</b> Wieś	11	15%
Miasto	60	85%
<b>Dochód</b> Poniżej średniej krajowej	31	43,7%
Średnia krajowa i więcej	13	18,3%
Nie chcą odpowiadać na to pytanie	27	38%

Źródło: Opracowanie własne

## Opis wyników

Pierwsze pytanie ankiety dotyczyło częstotliwości dokonywania zakupów dóbr z sektora FMCG (rys. 41.1). Uzyskane wyniki wskazują, iż respondenci dokonują zakupu artykułów żywnościowych najczęściej dwa razy w tygodniu (50% odpowiedzi). Z kolei większość respondentów dokonuje zakupu artykułów kosmetycznych raz w miesiącu (35% odpowiedzi) lub raz w tygodniu (33% odpowiedzi).

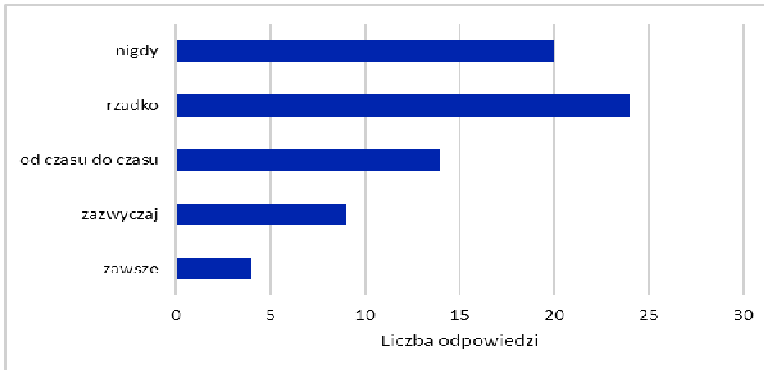


**Rysunek 41.1.** Częstotliwość dokonywania zakupów dóbr z sektora FMCG

Źródło: Opracowanie własne



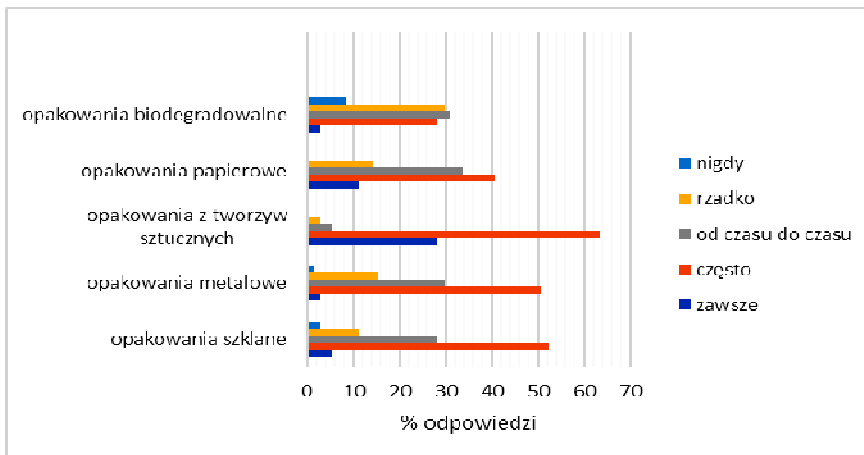
Kolejne pytanie dotyczyło częstotliwości wykorzystania toreb jednorazowych podczas zakupów produktów z sektora FMCG (*rys. 41.2*). Respondenci odpowiedzieli, iż rzadko pakują zakupione produkty w torby jednorazowe (33% odpowiedzi). Około 28% respondentów nigdy ich nie pakują w torby jednorazowe, używają toreb wielorazowych. Wśród tej grupy przeważają kobiety.



**Rysunek 41.2.** Częstotliwość wykorzystania toreb jednorazowych podczas pakowania zakupów przez respondentów

Źródło: Opracowanie własne

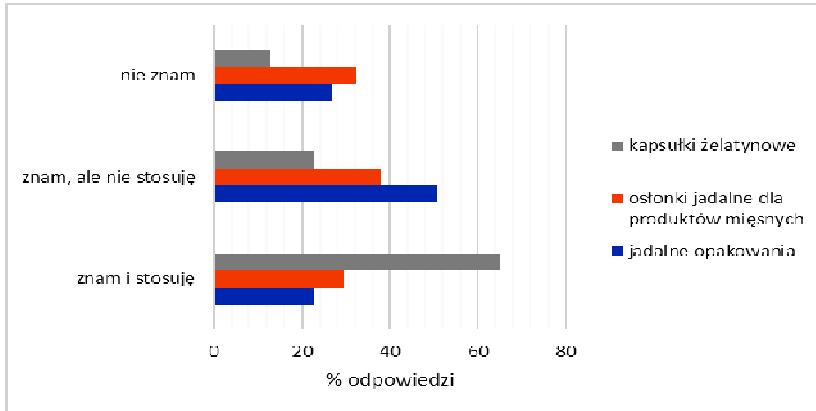
Respondenci najczęściej kupują produkty opakowane w tworzywa sztuczne, w dalszej kolejności papier czy szkło. Zdecydowanie rzadziej wybierane są opakowania metalowe i biodegradowalne. Na *rys. 41.3* przedstawiono preferowane przez respondentów typy opakowań podzielonych ze względu na zastosowany materiał opakowaniowy.



**Rysunek 41.3.** Preferowane podczas zakupu typy opakowań według respondentów

Źródło: Opracowanie własne

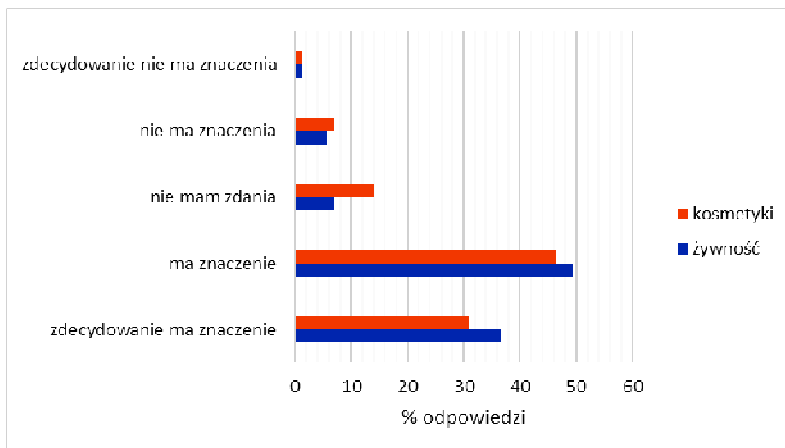
Kolejne pytanie dotyczyło zakupu produktów pakowanych w opakowania jadalne. Większość respondentów odpowiedziała, iż nie wybiera produktów opakowanych w opakowania jadalne, takich jak osłonki jadalne z polimerów naturalnych w przypadku wyrobów mięsnych czy jadalnych opakowań na posiłki. Najczęściej wybieranymi opakowaniami jadalnymi są kapsułki żelatynowe stosowane w lekach i suplementach diety (rys. 41.4).



**Rysunek 41.4.** Opinia respondentów na temat opakowań jadalnych

Źródło: Opracowanie własne

Większość respondentów (blisko 90%) wskazała, iż rodzaj opakowania ma znaczenie przy wyborze dóbr szybkozbywalnych. Nieznacznie większą uwagę respondenci zwracają na opakowania produktów żywnościowych (rys. 41.5).

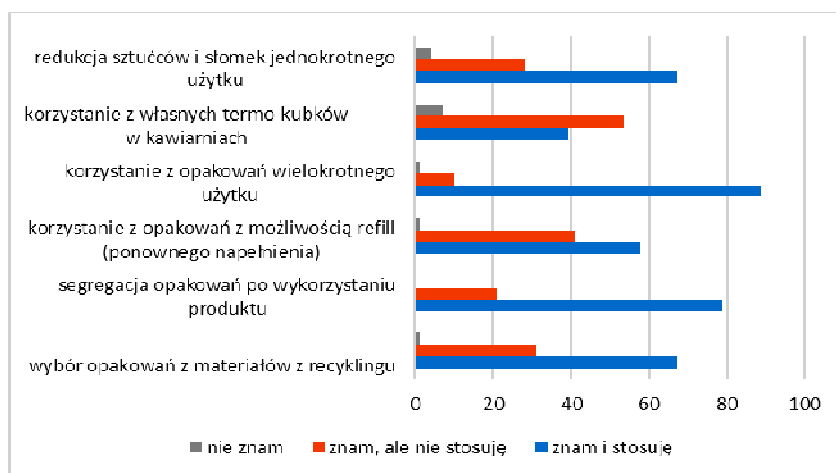


**Rysunek 41.5.** Znaczenie opakowania przy wyborze produktów z sektora FMCG według respondentów

Źródło: Opracowanie własne

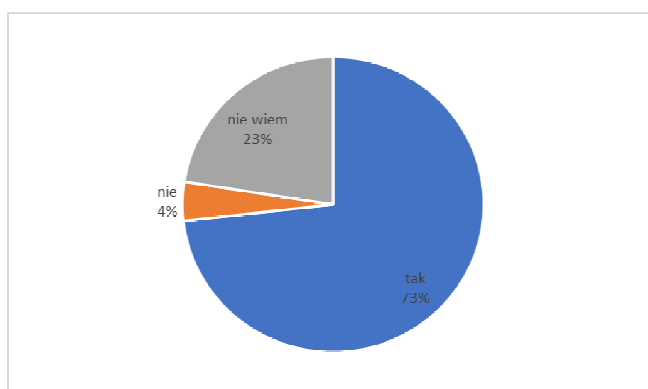
Do najczęściej wskazywanych przez respondentów zachowań proekologicznych zaliczyć można korzystanie z opakowań wielokrotnego użytku (blisko 90% odpowiedzi) oraz segregację odpadów opakowaniowych po wykorzystaniu produktu (blisko 80% respondentów stosuje to rozwiązanie). Najrzadziej wskazywanym rozwiązaniem proekologicznym było korzystanie z własnych kubków termicznych w kawiarniach i korzystanie z opakowań umożliwiających ponowne napełnienie (rys. 41.6).

Blisko 1/3 respondentów popiera rozwiązanie proekologiczne oparte na wprowadzeniu system kaucyjnego dla opakowań jednorazowych metalowych i wyprodukowanych z poli(teraftalanu etyleny) (PET). Tylko 4% respondentów była zdecydowanie przeciwna takiemu rozwiązaniu (rys. 41.7).



**Rysunek 41.6.** Zachowania proekologiczne względem opakowań wskazywane przez respondentów

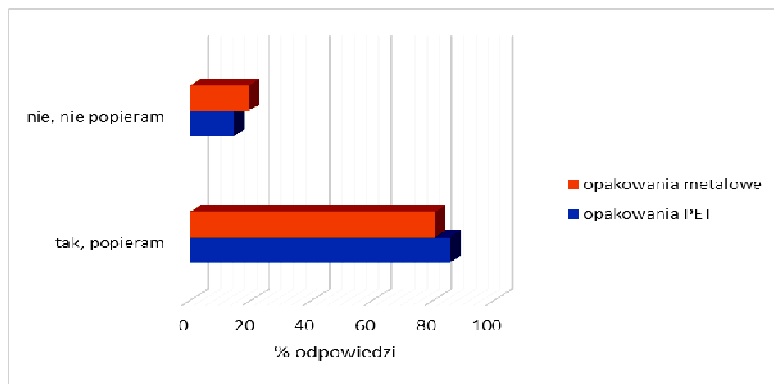
Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 41.7.** Odpowiedzi na pytanie: Czy uważasz, że wprowadzenie systemu kaucyjnego za opakowania PET (plastikowe) i metalowe korzystnie wpłynie na środowisko?

Źródło: Opracowanie własne

Ostatnie pytanie dotyczyło poparcia wprowadzenia systemu kaucyjnego na opakowania jednorazowe, pomimo wzrostu ceny zakupywanego produktu. Większość respondentów (ponad 80% badanych) popiera wprowadzenie systemu kaucyjnego na opakowania jednorazowego użytku PET i opakowania jednorazowego użytku metalowe, mimo możliwego podniesienia ceny finalnej produktów w nie zapakowanych (rys. 41.8).



**Rysunek 41.8.** Odpowiedzi na pytanie: Czy popierasz wprowadzenie systemu kaucyjnego za opakowania jednorazowego użytku, pomimo wzrostu cen produktów w nie pakowanych?

Źródło: Opracowanie własne

## Podsumowanie

Niniejszy rozdział uzupełnia literaturę na temat zachowań proekologicznych wśród polskich konsumentów i postrzeganie przez nich opakowań produktów szybkozbywalnych. Przeprowadzone badania wskazują, iż w grupie młodych konsumentów rośnie świadomość zagrożeń związanych z tego typu odpadami oraz poszukiwanie produktów w opakowaniach przyjaznych dla środowiska, za które są skłonni więcej zapłacić. Znaczna część badanych młodych osób zna i stosuje również rozwiązania proekologiczne ukierunkowane na redukcję odpadów trafiających do środowiska. Z kolei firmy wytwarzające produkty szybkozbywalne powinny uwzględniać w swoich praktykach produkcyjnych i marketingowych rozwiązania proekologiczne.

## Literatura

1. Jain P., Hudnurkar M. (2022), *Sustainable Packaging in the FMCG Industry*, „Cleaner and Responsible Consumption”, 7, 100075.
2. Kowalska A. (2010), *Zwyczaje żywieniowe studentów Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, „Roczniki Państwowego Zakładu Higieny”, 61, 3, s. 277-282.

3. Kowalska A. (2017), *Analiza oczekiwań konsumentów w stosunku do opakowań produktów codziennego użytku*, „Towaroznawcze Problemy Jakości”, 1, s. 49-57.
4. Lee W.C.J., Shimizu M., Kniffin K.M., Wansink B. (2013), *You Taste What You See: Do Organic Labels Bias Taste Perceptions?*, „Food Quality and Preference”, 29, 1, s. 33-39.
5. Nowogródzka T., Pieniak-Lendzion K., Nyszk W. (2014), *Wzrost znaczenia opakowań w procesie komunikacji rynkowej przedsiębiorstw*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach. Administracja i Zarządzanie”, 103, s. 67-85.
6. Pezala A., Truszczyński M. (2016), *Opakowania w branży FMCG a ekologia*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie”, 71, s. 191-202.
7. PortalSpozywczy.pl (2014), *FRSiH: Polak robi zakupy „na teraz” i jest bardzo wrażliwy cenowo*, <https://www.portalspozywczy.pl/handel/wiadomosci/frsih-polak-robi-zakupy-quot-na-teraz-quot-i-jest-bardzo-wrazliwy-cenowo,106703.html> (dostęp: 27.04.2023).
8. PortalSpozywczy.pl (2015), *Konsumenci mają duże wymagania wobec opakowań do żywności*, <https://www.portalspozywczy.pl/technologie/wiadomosci/konsumenci-maja-duze-wymagania-wobec-opakowan-do-zywnosci,119354.html> (dostęp: 27.04.2023).
9. Ratajczyk M. (2016), *Znaczenie warstw opakowania jednostkowego dla konsumentów na rynku FMCG*, „Handel Wewnętrzny”, 364, 5, s. 247-257.
10. Sadowski A. (2008), *Zrównoważony rozwój z perspektywy logistyki zwrotnej*, „Problemy Ekorozwoju”, 3, 2, s. 129-132.

## Consumer Pro-Ecological Behaviour: Packaging and Its Role in Maintaining Product Quality in the FMCG Sector

**Abstract:** The packaging of products in the FMCG (fast-moving consumer goods) sector, which includes food, pharmaceutical and cosmetic products, should be characterised by the ability to maintain a high quality of packaged products as well as guarantee convenience of use for consumers. Environmental friendliness in packaging is gaining in importance due to the amount of waste generated and due to increased public interest in solutions aimed at reducing environmental degradation. The aim of the chapter was to analyse the pro-ecological behaviour of consumers towards the packaging of fast-moving goods that may affect the perceived quality of such products. The survey was conducted in April 2023 on a group of 71 young respondents. The results show that the majority of respondents declare that the type of packaging is important when choosing FMCG products. The pro-environmental behaviours most frequently listed by consumers are the use of reusable packaging and the segregation of packaging waste. In addition, most consumers support the introduction of a deposit-refund system in the case of single-use metal and PET packaging.

**Keywords:** pro-ecological behaviours, packaging, FMCG sector

## Rozdział 42

### Instalacja akwaponiczna w obiegu zamkniętym

Natalia Sołtysiak, Szymon Kupczyk, Daniel Śmigieński, Jakub Walentek  
Małgorzata Worwąg

Politechnika Częstochowska  
Wydział Infrastruktury i Środowiska

**Streszczenie:** Ciągłe zwiększanie się populacji na świecie oraz degradacja dostępnych gruntów uprawowych stawia przed nami wyzwanie zapewnienia odpowiedniej ilości żywności dla społeczeństwa. Tradycyjne formy rolnictwa mogą zostać zastąpione w przyszłości nowoczesnymi farmami akwaponicznymi. Są to systemy, które łączą tradycyjną hodowlę zwierząt wodnych i uprawę roślin w symbiotycznym środowisku. Ryby w wyniku przemiany materii wytwarzają odchody będące nawozem dla roślin. Dostarczany w ten sposób azot maksymalizuje wydajność hodowli roślin i zwierząt wodnych oraz minimalizuje odpady z systemu. Akwaponika oferuje rozwiązanie kilku problemów związanych ze zrównoważonym rozwojem, takich jak ograniczona dostępność wody, zanieczyszczenie środowiska, rosnące koszty nawozów i wyczerpywanie się żyznych gleb. W rozdziale przedstawiono przegląd systemów wertykalnych, w szczególności farm akwaponicznych.

**Słowa kluczowe:** akwaponika, farmy wertykalne, hodowla ryb, obieg zamknięty, uprawa roślin

### Wprowadzenie

Według Światowej Organizacji Zdrowia do 2025 roku połowa ludzi na świecie będzie mieszkać na obszarach dotkniętych niedostatkami wody. W dobie coraz częściej powtarzających się susz każdy litr wody jest na wagę złota. Jest ona ważnym elementem Zielonego Ładu – europejskiej strategii, której najważniejszym celem jest uzyskanie neutralności dla klimatu w Europie do 2050 roku. Jednym z programów strategii Zielonego Ładu jest właśnie gospodarowanie wodą pitną, a także ściekami i odpadami komunalnymi w kierunku obiegu zamkniętego. Aby gospodarka obiegowa była skuteczna, wymagane są nowoczesne, kompleksowe i sprawdzone technologie. Polska coraz mocniej odczuwa niedobór wody i dlatego niezbędna jest nowa polityka w zakresie gospodarki wodnej, aby zapobiegać zjawisku narastania suszy, a także stymulować dostosowanie się przedsiębiorstw do skutków zmian klimatycznych. W ten sposób ograniczymy wpływ tych

niekorzystnych czynników hydrologicznych na funkcjonowanie i rozwój przedsiębiorstw produkcyjnych i usługowych oraz gospodarstw domowych (Ochrona... 2020). Produkcja żywności jest jednym z najbardziej wodochłonnych sektorów gospodarki, zwłaszcza rolnictwo w tradycyjnej formie, zużywając około 70% zasobów wody słodkiej. Zagrożenia dla rolnictwa w związku z kryzysem klimatycznym przyczyniają się do poszukiwania nowoczesnych form upraw, hodowli żywności zarówno roślin, jak i zwierząt (UN-Water 2021).

Zamknięty obieg wody od lat wykorzystuje się w rolnictwie ekologicznym. W obszarze tym obowiązuje zasada ograniczania stosowania środków zewnętrznych, ewentualnie ograniczanie ich do środków pochodzących z produkcji ekologicznej, substancji naturalnych lub substancji będących ich pochodnymi bądź wolno rozpuszczalnych nawozów mineralnych. Zamknięcie obiegu substancji odżywczych w rolnictwie pozwoliłoby na powrót do gleby pod postacią kompostu takich składników jak azot, fosfor i potas, skutecznie przechwytyjąc węgiel i poprawiając odporność upraw oraz zdolność gleby do zatrzymywania wody (Wdowin 2021). Rozwiązaniem problemów, z jakimi spotyka się konwencjonalne rolnictwo, może być rolnictwo wertykalne.

## Rolnictwo wertykalne

Rolnictwo wertykalne (*rys. 42.1*) to sposób uprawy roślin polegający na produkcji w pionowo ułożonych warstwach, często w kontrolowanym środowisku i przy maksymalnej optymalizacji rozwoju roślin, używając przy tym bezglebowych technik rolniczych (Sabry 2021). Koncepcja pionowych farm została opracowana w celu zaradzenia kryzysowi związanemu z zagospodarowaniem przestrzeni. Ich projekt, układ i konfiguracja zapewniają optymalną ekspozycję na światło, precyzyjnie odmierzone składniki odżywcze dla każdej rośliny oraz możliwość wzrostu w kontrolowanym, zamkniętym środowisku. Farmy wertykalne dodatkowo eliminują potrzebę stosowania szkodliwych herbicydów i pestycydów, maksymalizują wartość odżywczą i zwiększają wartość żywności w produktach. Pionowe uprawy w chronionych strukturach poprawiają również smak, aby zaspokoić preferencje konsumentów. W uprawach ogrodniczych, takich jak jagody, warzywa liściaste, szpinak i niektóre krzyżówki, technika ta została już przyjęta. Zapewnia ona ogromne plony, lepszą jakość i trwałą zdolność produkcyjną (Al-Kodmany 2018).

Rolnictwo pionowe nie jest całkowicie nową perspektywą. Pierwsze doniesienia na temat pionowych upraw można spotkać już w starożytności. Jeden z siedmiu cudów Starożytnego Świata – Wiszące ogrody Babilonu – powstał około 600. roku p.n.e. Termin „pionowe rolnictwo” (w bezpośrednim tłumaczeniu) zostało wprowadzone przez G.E. Bailey’a w 1915 roku w książce zatytułowanej *Vertical Farming*. Na początku lat 30. W.F. Gericke z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley był pionierem hydroponiki i stał się ojcem tej technologii. W latach 80. szwedzki rolnik ekologiczny A. Olsson również zaproponował rolnictwo pionowe

jako sposób na produkcję świeżych warzyw w miastach. Jest on znany jako wynalazca systemu szyn w kształcie spirali do uprawy roślin (Corvalan i in. 2005; Despommier 2009; Despommier 2010; Despommier 2011; Despommier 2013). Naukowcy wciąż modyfikują technologie, stopień zaawansowania systemów i ich zautomatyzowania. Farmy wertykalne mogą wzmocnić rolnictwo ekologiczne przy jednoczesnej poprawie zdrowia gleby i zrównoważonym rolnictwie.



**Rysunek 42.1.** Farma wertykalna japońskiego przedsiębiorstwa Spread

Źródło: (Spread 2022)

## Rodzaje systemów wertykalnych

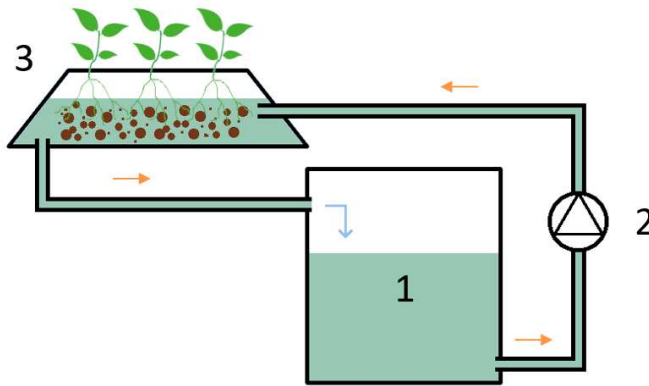
Istnieją trzy główne sposoby uprawy roślin metodą wertykalną. Zaliczamy do nich akwaponikę, hydroponikę oraz aeroponikę. Cechą wspólną tych metod jest wyeliminowanie gleby jako ośrodka, w którym rozwijają się korzenie. W akwaponice oraz hydroponice jako podłoże stosuje się materiały mineralne, takie jak keramzyt ogrodniczy lub pumeks, oraz materiały organiczne, np. gąbczak walcowaty.

Uprawy hydroponiczne polegają na hodowli roślin bez gleby, gdzie korzenie roślin uprawianych są ciągle zanurzone w płynach zawierających wiele makroelementów takich jak wapń, fosfor, azot, potas, magnez, a także pierwiastki śladowe, np. żelazo, chlor, mangan (*rys. 42.2*). Substytutem gleby mogą być podłoża takie jak żwir, piasek, trociny. System ten zmniejsza zużycie wody przy zwiększonej produkcji roślin. Hydroponika została zdefiniowana jako „...produkcja roślin w medium bezglebowym, w którym wszystkie składniki odżywcze dostarczane do uprawy są rozpuszczone w wodzie” (Hu i in. 2015).

Farmy akwaponiczne stanowią jedną z najbardziej postępowych form nowoczesnego rolnictwa, łącząc uprawy zarówno ryb, jak i roślin w obrębie tego samego systemu. Produkty przemiany materii ryb stanowi nawóz dla roślin. Ścieki filtrowane są w biofiltrze, gdzie amoniak przekształcany jest w azotany. Dodatkowo rośliny w procesie fotosyntezy zużywają dwutlenek węgla generowany



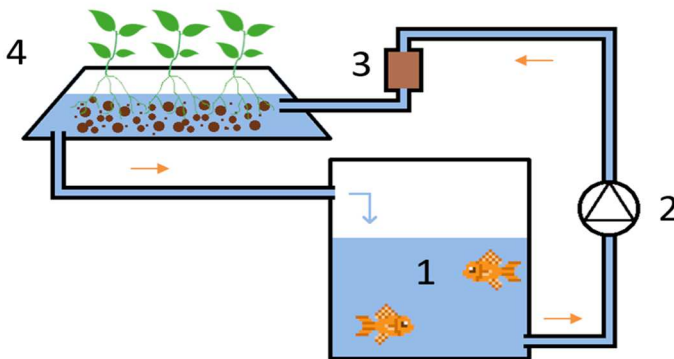
przez ryby. Systemy korzeniowe roślin podtrzymywane są w pojemnikach wypełnionych inertnymi kształtkami lub substancjami mineralnymi albo organicznymi (rys. 42.3).



1. Zbiornik z płynem, 2. Pompa obiegowa, 3. System rur z podłożem

**Rysunek 42.2.** Przykładowy schemat instalacji hydroponicznej

Źródło: Opracowanie własne



1. Zbiornik z rybami, 2. Pompa obiegowa, 3. Biofiltr, 4. System rur z podłożem

**Rysunek 42.3.** Przykładowy schemat instalacji akwaponicznej

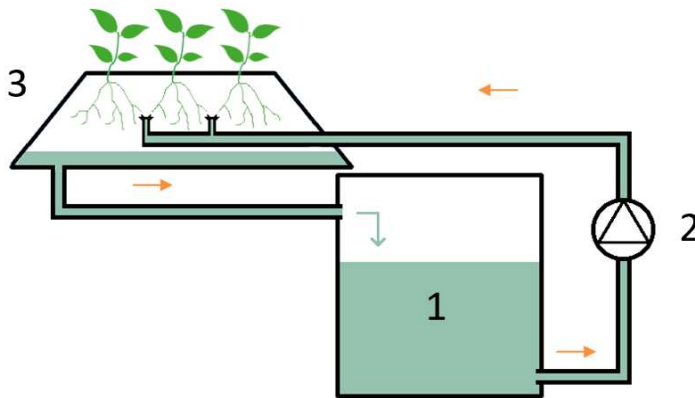
Źródło: Opracowanie własne

Systemy akwaponiczne są w stanie ograniczyć zużycie wody do produkcji żywności nawet o 90%. Współczesne systemy akwaponiczne przyjęły na ogół formę recykulacyjnych systemów akwakultury. W ramach tych systemów odpady produkowane przez organizmy wodne są filtrowane przez zbiorniki z naturalnie występującymi mikroorganizmami, które rozkładają związki organiczne i udostępniają je do pobrania przez rośliny. Główną przemianą składników odżywczych jest przekształcenie amoniaku ( $\text{NH}_3^+$ ) w azotany ( $\text{NO}_3^-$ ) przez bakterie

nitryfikacyjne. Ścieki z akwakultury, pełne składników odżywczych, są następnie filtrowane do systemu hydroponicznego, gdzie korzenie roślin i mikroby są nawożone. Woda jest następnie zwracana do zbiorników hodowlanych, oczyszczona z nagromadzonych składników odżywczych. Ten skonstruowany ekosystem o obiegu zamkniętym w ostatnich latach wzbudza coraz większe zainteresowanie, ponieważ łagodzi kilka problemów rozwijających się w rolnictwie konwencjonalnym (Yep, Zheng 2019).

Farmy akwaponiczne są na szeroką skalę zakładane w Emiratach Arabskich. Akwaponika jest przedmiotem szczególnego zainteresowania w krajach, które mają problem z ograniczeniem zasobów wodnych. Akwaponika umożliwia połączenie białka zwierzęcego i roślin na niewielkiej przestrzeni i przy dość ograniczonym dostępie do wody (Yep, Zheng 2019).

System aeroponiczny w przeciwieństwie do dwóch pozostałych systemów nie wymaga stałego ani płynnego podłoża do produkcji roślin. Rośliny są zawieszane w taki sposób, że ich system korzeniowy znajduje się w przestrzeni powietrznej. Jako nawóz stosowany jest aerozol roztworu zawierającego znaczne ilości składników odżywczych, który jest rozprowadzany na korzenie. Uprawy prowadzone w ten sposób umożliwiają szybszy rozwój roślin, ponadto brak gleby zmniejsza możliwość skażenia upraw wywołanego przez korzystanie ze środków ochrony roślin oraz pestycydów. Brak gleby oznacza również brak ryzyka dostania się do systemu metali ciężkich (rys. 42.4).



1. Zbiornik z płynem, 2. Pompa obiegowa, 3. System rozprawdzający aerozol

**Rysunek 42.4.** Przykładowy schemat instalacji aeroponicznej

Źródło: Opracowanie własne

Aeroponika jest formą techniki hydroponicznej i rodzajem rolnictwa piono-wego. Słowo *aeroponic* pochodzi od łacińskich słów *aero* (powietrze) i *ponic* (praca). Ten system uprawy daje producentowi możliwość precyzyjnego kontrolowania składników odżywczych w strefie korzeniowej, reżimu wodnego

i warunków środowiskowych oraz pełnego dostępu do korzeni przez cały okres uprawy. Rolnictwo aeroponiczne jest lepsze niż konwencjonalne metody rozmnażania pod względem doskonałego napowietrzania, efektywności wykorzystania wody, mniejszych wymagań czasowych i przestrzennych, niezależności sezonowej, rozmnażania roślin wolnych od chorób, produkcji roślin na dużą skalę itp. (Kumari, Kumar 2019).

Systemy te pozwalają na zaoszczędzenie miejsca potrzebnego na uprawy oraz umożliwiają uprawę roślin w miejscach, gdzie jakość gleby na to nie pozwala. Takie instalacje mogą pracować poza normalnym sezonem kwitnienia i owocowania roślin.

## Rośliny do filtra akwaponicznego

Akwaponika, jako połączenie środowiska wodnego i roślinnego w jedną wzajemnie uzupełniającą się całość, jest świetnym przykładem korelacji pomiędzy filtrującą działalnością roślin a szkodliwymi lub zanieczyszczającymi substancjami zawartymi w środowisku wodnym, które stanowią dla tych pierwszych źródło substancji odżywczych. Prawie wszystkie rośliny mogą być uprawiane w systemie akwaponicznym. Jednak różne rośliny mają różne potrzeby i rozwijają się w różnych warunkach. Dobór roślin do uprawy w systemie akwaponicznym wymaga dostosowania warunków do indywidualnych potrzeb. Taki system nie zawsze w każdej sytuacji działa prawidłowo, tak więc jedną z kwestii, o jaką należy zadbać, jest prawidłowy dobór roślin, ponieważ nie wszystkie będą tolerować stały poziom wilgoci utrzymujący się przez dłuższy czas.

Najważniejszym warunkiem, jaki musi być spełniony, aby dana roślina nadawała się do hodowli hydroponicznej, jest jej zdolność do życia w wodzie, gdzie jedynym substratem jest obojętne podłoże typu keramzyt. Jak się okazuje, do takiego rodzaju uprawy nadaje się wiele roślin doniczkowych czy warzyw, ale do najbardziej popularnych gatunków należą m.in.: difenbachia, aglaonema, monstera, zielistka. Rośliny, które najlepiej rosną w systemach akwaponicznych, to warzywa, zielenina, małe warzywa korzeniowe, rośliny owocowe, zioła i kwiaty. Niektórym, bardziej doświadczonym pasjonatom ogrodnictwa udaje się przystosować do takich warunków nawet aloes i paproć (Love i in. 2015; Searchinger i in. 2018).

W systemie akwaponicznym, gdzie istotną kwestią jest zdolność do pochłaniania niepożądanych substancji, najlepiej sprawdzą się jednak odmiany o dosyć mocno rozbudowanym systemie korzeniowym, czyli dużej powierzchni chłonnej. Wielkość liści również odgrywa tutaj dosyć ważną rolę, gdyż tam mogą się skumulować uprzednio wspomniane zanieczyszczenia. Co ciekawe, wybierając takie gatunki jak skrzydłokwiat czy zielistka, nasz system dodatkowo zostaje wzbogacony o funkcję oczyszczania nie tylko wody, ale też powietrza, gdyż wymienione wcześniej rodzaje kwiatów świetnie radzą sobie z pochłanianiem takich związków jak formaldehydy, metale ciężkie, aceton, ksylen czy amoniak. Bardzo ważne jest

odpowiednie przygotowanie i postępowanie z roślinami. Rośliny stosowane w systemach akwaponicznych wymagają dokładnego oczyszczenia korzenia w celu uniknięcia zakażeń ze strony grzybów oraz usunięcia nadgniętych czy uschniętych liści. Rośliny nie wymagają dodatkowego nawożenia, gdyż to w głównej mierze związki azotu oraz inne substancje kierowane ze zbiornika wodnego na system hydroponiczny stanowią pożywkę. Dodatkowo zdolność asymilacji toksycznych związków chemicznych pozwala zastosować roślinność jako naturalny filtr biologiczny.

## Ryby do instalacji akwaponicznej

W instalacjach akwaponicznych wykorzystuje się gatunki ryb charakteryzujących się szybkim wzrostem oraz odpornością na trudne warunki środowiskowe. Najczęściej hodowane zwierzęta wodne to: tilapia (69%), ryby ozdobne (43%), sum (25%), inne zwierzęta wodne (18%), okoń (16%), bluegill (15%), pstrąg (10%) i okoń (7%). Pozostałymi popularnymi gatunkami są: węgorz, dorsz, sandacz, karp, golec polarny lub labraks. W zależności od wielkości instalacji systemy te mogą wykorzystywać nawet gatunki typowo akwariowe, takie jak neon innesa, karaś chiński. Dobór gatunków opiera się na podstawie temperatury wody, wielkości zbiornika, stopnia natlenienia oraz szybkości wzrostu populacji. W systemach akwaponicznych, aby uzyskać wysoką wydajność hodowli, ważne jest dopasowanie gatunków ryb do zastosowanych roślin (Love i in. 2015; Searchinger i in. 2018).

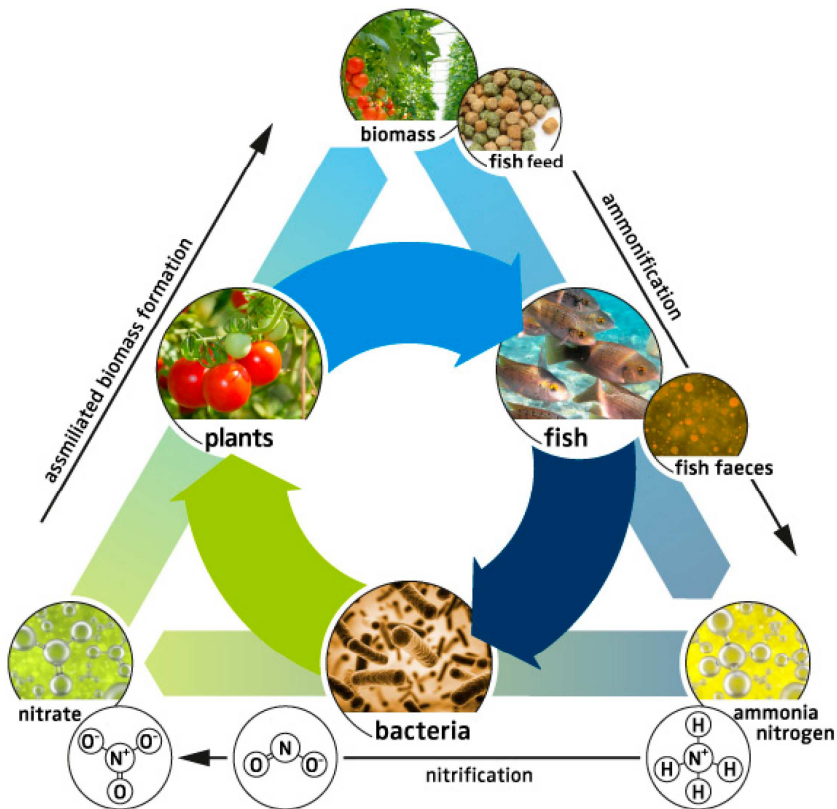
## Podsumowanie

Farmy akwaponiczne, w których hoduje się zarówno zwierzęta, jak i rośliny, przy zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań technologicznych, stanowią obiecującą alternatywę do zrównoważonej produkcji żywności, szczególnie w mięście. Dodatkową wartością dla takich farm jest zastosowanie systemu obiegu zamkniętego z zastosowaniem oczyszczania wody deszczowej. Dzięki temu będzie możliwa produkcja żywności zdrowej, bez dodatków antybiotyków i herbicydów, z ograniczeniem zużycia wody i negatywnego wpływu na środowisko.

Systemy akwaponiczne prowadzą do symbiozy pomiędzy rybami, mikroorganizmami i roślinami oraz zachęcają do zrównoważonego wykorzystania wody i składników odżywczych, w tym ich recyklingu (*rys. 42.5*). W ramach tej synergicznej interakcji odpowiednie słabości ekologiczne akwakultury i hydroponiki są przekształcane w mocne strony. To połączenie znacznie minimalizuje potrzebę wprowadzania składników odżywczych i odprowadzania odpadów, w przeciwieństwie do sytuacji, gdy są one prowadzone jako oddzielne systemy.

Aspektem akwaponiki, który wymaga przyszłych badań, jest rola mikroorganizmów promujących wzrost roślin w pobieraniu składników odżywczych. Mikroorganizmy promujące wzrost roślin przyczyniają się do ich wzrostu oraz wielkości

plonów przy mniejszej zawartości składników odżywczych. Farmy akwaponiczne mają potencjał do zrównoważonego uzupełnienia produkcji żywności przy minimalnym wpływie na środowisko, istnieje potrzeba lepszego scharakteryzowania złożonej interakcji pomiędzy różnymi komponentami (ryby, rośliny, mikrobiom) tych systemów w celu optymalizacji skali i wydajności. Wiedza na temat korzystnego i szkodliwego wpływu mikroorganizmów w odniesieniu do wydajności upraw pochodzi z badań nad mikrobiomem roślinnym uprawianym w glebie.



Rysunek 42.5. Symbiotyczny cykl akwaponiki

Źródło: (Goddek i in. 2015)

W Polsce akwaponika nie jest jeszcze popularna, jednak coraz więcej osób przekonuje się do tej metody uprawy. Choć nie należy ona do uniwersalnych i tanich metod upraw, może przynieść wymierne korzyści osobom, które są nastawione na ekologiczną produkcję rolną i zwierzęcą. Rolników mogą zniechęcić koszty rozpoczęcia i prowadzenia tego typu upraw, zwłaszcza że w Polsce koszty energii elektrycznej są stosunkowo wysokie. Z tych powodów akwaponika może być jedynie alternatywą dla tradycyjnego rolnictwa – przynajmniej w najbliższej przyszłości.

## Podziękowania

Publikacja rozdziału została sfinansowana ze środków Studenckiego Koła Naukowego EnviBioTeam przy Wydziale Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej.

## Literatura

1. Al-Kodmany K. (2018), *The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City*, „Buildings”, 8(2), 24, <https://doi.org/10.3390/buildings8020024> (dostęp: 05.05.2023).
2. Corvalan C., Hales S., McMichael A.J. i in. (2005), *Ecosystems and Human Well-Being: Health Synthesis*, World Health Organization, Geneva.
3. Despommier D. (2009), *The Rise of Vertical Farms*, „Scientific American”, 301, 5, s. 80-87.
4. Despommier D. (2010), *The Vertical Farm: Feeding the World in the 21<sup>st</sup> Century*, Thomas Dunne Books, New York.
5. Despommier D. (2011), *The Vertical Farm: Controlled Environment Agriculture Carried Out in Tall Buildings Would Create Greater Food Safety and Security for Large Urban Populations*, „Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit”, 6, 2, s. 233-236, <https://doi.org/10.1007/s00003-010-0654-3> (dostęp: 04.05.2023).
6. Despommier D. (2013), *Farming Up the City: The Rise of Urban Vertical Farms*, „Trends in Biotechnology”, 31, 7, s. 388-389.
7. Goddek S., Delaide B., Mankasingh U., Ragnarsdottir K.V., Jijakli H., Thorarinsdottir R. (2015), *Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics*, „Sustainability”, 7, 4, s. 4199-4224, <https://doi.org/10.3390/su7044199> (dostęp: 04.05.2023).
8. Hu Z., Lee J.W., Chandram K., Kim S., Brotto A.B., Khandal S.K. (2015), *Effect of Plant Species on Nitrogen Recovery in Aquaponics*, „Bioresource Technology”, 188, s. 92-98, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013> (dostęp: 01.05.2023).
9. Kumari R., Kumar R. (2019), *Aeroponics: A Review on Modern Agriculture Technology*, „Indian Farmer”, 6, 4, s. 286-292.
10. Love D.C., Fry J.P., Li X., Hill E.S., Genello L., Semmens K., Thompson R.E. (2015), *Commercial Aquaponics Production and Profitability: Findings from an International Survey*, „Aquaculture”, 435, s. 67-74.
11. *Ochrona zasobów wodnych* (2020), <https://seidel-przywecki.eu/2020/10/15/ochrona-zasobow-wodnych/> (dostęp: 06.05.2023).
12. Sabry F. (2021), *Rolnictwo Pionowe: Jak wyżywimy trzy kolejne miliardy ludzi do 2050 roku?*, Jeden Miliard Kompetentny.
13. Searchinger T., Waite R., Hanson C., Ranganathan J., Matthews E. (2018), *Creating a Sustainable Food Future: A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050*, World Resources Institute.
14. Spread (2022), *Largest FoodTech Deal in Japan: Vertical Farming Startup Spread Raises \$30 Million to Accelerate its Business*, [https://spread.co.jp/en/news-release\\_20220802/](https://spread.co.jp/en/news-release_20220802/) (dostęp: 04.05.2023).
15. UN-Water (2021), *Summary Progress Update 2021 – SDG 6 – Water and Sanitation for All. Version: July 2021*, Geneva, Switzerland, [https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2021/07/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021\\_Version-July-2021.pdf](https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2021/07/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021.pdf) (dostęp: 04.05.2023).
16. Wdowin M., Koneczna R., Cader J., Hanc E., Olczak P., Kunecki P. (2021), *Koncepcja wsparcia regionalne w zakresie realizacji GOZ w województwie wielkopolskim*,

Wielkopolskie Regionalne Obserwatorium Terytorialne, Poznań, <https://wrot.umww.pl/wp-content/uploads/2021/09/GOZ.pdf> (dostęp: 06.05.2023).

17. Yep B., Zheng Y. (2019), *Aquaponic Trends and Challenges – A Review*, „Journal of Cliner Production”, 228, s. 1586-1599, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290> (dostęp: 06.05.2023).

## Closed-Circuit Aquaponic Installation

**Abstract:** The continued increase in the world's population and the degradation of available arable land pose the challenge of providing enough food for society. Traditional forms of agriculture may be replaced in the future by modern aquaponic farms. These are systems that combine traditional aquatic animal husbandry and crop farming in a symbiotic environment. Fish, as a result of their metabolism, produce feces that are fertilizer for plants. The nitrogen thus supplied maximizes the efficiency of plant and aquatic animal farming and minimizes waste from the system. The chapter presents an overview of vertical systems in particular aquaponic farms.

**Keywords:** aquaponics, vertical farms, fish farming, closed loop, plant breeding