

**PROJEKTOWANIE I PLANOWANIE  
KIERUNKÓW ROZWOJU INNOWACJI  
PROCESOWYCH I PRODUKTOWYCH  
W PROCESIE WYTWARZANIA  
WYBRANEJ GRUPY KOMPOZYTÓW  
MAGNETYCZNYCH**

Dorota Klimecka-Tatar



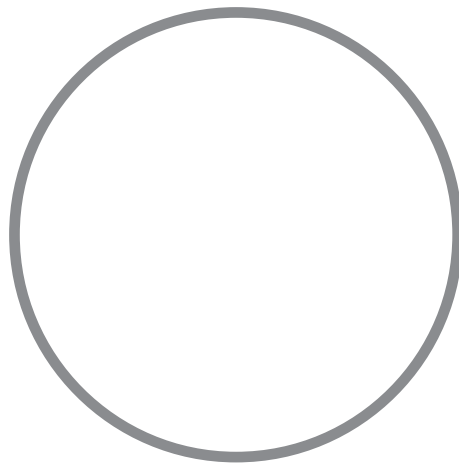
Kraków 2019



Politechnika Krakowska  
im. Tadeusza Kościuszki

# PROJEKTOWANIE I PLANOWANIE KIERUNKÓW ROZWOJU INNOWACJI PROCESOWYCH I PRODUKTOWYCH W PROCESIE WYTWARZANIA WYBRANEJ GRUPY KOMPOZYTÓW MAGNETYCZNYCH

Dorota Klimecka-Tatar



Kraków 2019

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tadeusz Tatara

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTW NAUKOWYCH

Józef Gawlik

REDAKTOR SERII  
Wydział Mechaniczny

Andrzej Sobczyk

REDAKTOR NAUKOWY

Jacek Pietraszek

RECENZENCI

Norbert Radek

Andrzej Pacana

SEKRETARZ SEKCJI

Marta Wlazło

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Aleksandra Urzędowska

KOREKTA

Małgorzata Sikora

SKŁAD I ŁAMANIE

Anna Pawlik

PROJEKT OKŁADKI

Karolina Szafran

© Copyright by Politechnika Krakowska

© Copyright by Dorota Klimecka-Tatar

ISBN 978-83-65991-69-0

e-ISBN 978-83-65991-72-0

Wydawnictwo PK, ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków; tel.: 012 628 37 25, fax: 012 628 37 60

e-mail: [wydawnictwo@pk.edu.pl](mailto:wydawnictwo@pk.edu.pl) □ [www.wydawnictwo.pk.edu.pl](http://www.wydawnictwo.pk.edu.pl)

Adres do korespondencji: ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

---

Druk i oprawę wykonano w Dziale Poligrafii Politechniki Krakowskiej

## SPIS TREŚCI

Wprowadzenie .....	5
Zakres, założenia i główne cele pracy .....	7
1. Organizacja procesów produkcyjnych i technologicznych w świetle zmian w przemyśle .....	11
1.1. Struktura i elementy tradycyjnego systemu produkcyjnego.....	11
1.2. Organizacja systemów produkcyjnych.....	14
1.3. Organizacja procesów produkcyjnych.....	19
1.3.1. Kryteria organizacji procesów produkcyjnych z uwzględnieniem potrzeb klienta .....	20
1.3.2. Techniki dostosowania zmienności systemów i procesów produkcyjnych do potrzeb inżynierii produkcji .....	23
1.4. Elementy doskonalenia w planowaniu i projektowaniu produkcji.....	25
2. Parametry użytkowe dla wyrobów z materiałów magnetycznie trwałych na bazie pierwiastków ziem rzadkich .....	29
2.1. Właściwości użytkowe i aspekt ekonomiczny materiałów na bazie pierwiastków ziem rzadkich (RE) w świetle rozwoju nowoczesnych technologii.....	29
2.2. Tendencje i rozwój w technologiach produkcji materiałów na magnesy ..	35
2.3. Chemia materiałów typu Nd-Fe-B.....	36
2.3.1. Skład chemiczny i strukturalny stopów Nd-Fe-B.....	36
2.3.2. Modyfikacja chemiczna poprzez dodatki stopowe, powłoki i warstwy ochronne .....	37
2.4. Zmienność procesów technologicznych w produkcji magnesów trwałych .....	40
3. Kryteria jakości dla kompozytów magnetycznych jako wyrobów .....	45
3.1. Uwarunkowania w projektowaniu nowych wyrobów .....	45
3.2. Zarządzania jakością w projektowaniu nowych produktów.....	46
3.3. Inżynieria jakości w projektowaniu kompozytów magnetycznych .....	48
4. Projektowanie procesu produkcyjnego w oparciu o narzędzia doskonalenia procesów – <i>Value Stream Design</i> .....	53
4.1. Charakterystyka strumienia wartości.....	53
4.1.1. Wpływ koncepcji <i>Lean Production</i> na projektowanie i planowanie procesów produkcyjnych.....	53

4.1.2. Znaczenie operacji dodających i niedodających wartości w strumieniu wartości .....	56
4.1.3. Czynniki wpływające na kreowanie i przepływ strumienia wartości.....	58
4.2. Metoda tworzenia map procesu w odniesieniu do narzędzi <i>Value Stream         Mapping</i> .....	59
4.3. Mapowanie strumienia wartości dla procesu produkcji kompozytów wiązanych .....	64
5. Kreowanie innowacji produktowej i procesowej w branży kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B.....	71
5.1. Opracowanie parametrów wytwarzania powłok ochronnych na powierzchni cząstek proszku ze stopu RE-M-B.....	74
5.2. Ocena zmian procesu na podstawie analizy właściwości technicznych wyrobu – inżynieria jakości w procesach specjalnych .....	90
5.3. Kryteria zgodności z wymaganiami – właściwości użytkowe wyrobów z kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B po bien- kapsulacji.....	96
5.3.1. Badania magnetyczne.....	96
5.3.2. Właściwości mechaniczne .....	98
5.3.3. Badanie odporności na działanie mediów korozyjnych.....	99
5.3.4. Analiza parametrów chropowatości powierzchni gotowych kompozytów z proszku Nd-Fe,Co-B.....	103
5.4. Innowacje procesowe w procesie wytwórczym kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe-B po bienkapsulacji.....	105
5.4.1. Innowacje procesowe – rozwój i realizacja .....	105
5.4.2. Przygotowanie prototypu urządzenia do zautomatyzowanego procesu enkapsulacji proszku materiałem spoiwa.....	107
5.4.3. Ocena możliwości wdrożenia innowacji procesowej na podstawie statystycznej kontroli procesu.....	110
Podsumowanie.....	129
Bibliografia .....	135
Streszczenie .....	153
Abstract.....	155
Zusammenfassung.....	157

## WPROWADZENIE

Firmy produkcyjne, które pragną odnieść sukces na rynku globalnym, powinny dysponować systemami produkcyjnymi gotowymi na zmiany. Już pod koniec XX wieku w międzynarodowym raporcie National Research Council (1998) zaznaczono, że rozwój przemysłu przed 2020 rokiem powinien się opierać zarówno na możliwościach i ograniczeniach innowacji technologicznych, jak i zatarciu granic między przemysłem wytwórczym a usługowym [1]. Według raportu zmienność postrzegania procesów szczególnie ważna będzie w zakresie produkcji obejmującej innowacyjne procesy produkcji materiałów stanowiących fundament do rozwoju cywilizacji XXI wieku. Należy zauważyć, że obecnie przedsiębiorstwa produkcyjne stoją wobec wyzwania zmienności specyfiki przemysłu, tj. rewolucji przemysłowej [2]. Przemysł 3.0, którego podstawą są komputery i automatyzacja produkcji, staje wobec nadchodzącego wyzwania, czyli zdominowania przez systemy cyber-fizyczne (CPS) [3]. Obecnie tworzenie wartości przemysłowej we wczesnych krajach uprzemysłowionych kształtowane jest przez rozwój w kierunku czwartego etapu industrializacji, tak zwanego Przemysłu 4.0. Rozwój ten zapewnia ogromne możliwości w zakresie realizacji zrównoważonej produkcji [4]. Systemy produkcyjne w myśl rewolucyjnego Przemysłu 4.0 będą się opierały na kombinacji i wzajemnym działaniu urządzeń, oprogramowania w ramach jednego systemu. Pełne przekształcenie zagadnień zmiany w zakresie inżynierii produkcji wymaga jednak gruntownego przygotowania, systematyzacji i standaryzacji procesów [5]. Bazując na paradygmatach Przemysłu 4.0, procesy produkcyjne będą planowane i organizowane w odniesieniu do symulacji, a wyniki eksperymentalne będą prezentowały zadowalającą wydajność [6–8].

Już pod koniec XX wieku zakładano, że w pierwszych dwóch dekadach nowego stulecia produkcja ulegnie zmianie pod względem zapotrzebowania konsumenckiego, innowacyjności w zakresie produktów i technologii, wzrostu bio- i nanotechnologii, konieczności symulacji, modelowania i projektowania produkcji w perspektywie bezodpadowego innowacyjnego przetwarzania [9, 10]. Wprowadzanie na rynek światowy nowoczesnych technologii znacząco zależy od możliwości technologicznych układów, które będą odpowiedzialne za generowanie, przechowywanie i przetwarzanie danych. W związku z powyższym duży nacisk nakłada się na rozwój materiałów i urządzeń, które umożliwią przejście branży produkcyjnej na kolejny poziom industrializacji.

Gwałtowny wzrost właściwości magnetycznych dla materiałów na magnesy, jaki został odnotowany na przełomie wieków, przyczynił się właśnie do rozwoju kompu-

teryzacji, cyfryzacji, cyberprzemysłu itp. – gwałtowny rozwój technologii spowodowany jest miniaturyzacją układów magnetycznych o wysokiej efektywności. Zmiany w podejściu do procesów produkcji i przetwarzania materiałów magnetycznych (głównie na bazie metali ziem rzadkich) stwarzają również możliwości w poszukiwaniu nowych zastosowań. Dlatego też dostępność i handel metalami ziem rzadkich stały się determinantami w dalszym rozwoju cywilizacji.

Globalne ograniczenia handlowe oraz zapisy z inicjatywy materiałowej dalszy rozwój w branży materiałów magnetycznych kierują w stronę doskonalenia i modyfikowania istniejących technologii produkcji i przetwarzania, a dodatkowo kładą duży nacisk na wykorzystywanie surowców, które już są na rynku – postawiono na ograniczenie powstawania marnotrawstwa w procesach technologicznych.

Zatem w aspekcie globalnej konkurencji firmy produkcyjne muszą reagować na szybko zmieniające się potrzeby klientów, równie szybko zmieniając możliwości rynkowe i rozwijając technologie procesowe i produktowe [11]. Jako że sektor wytwórczy odgrywa istotną rolę we wspieraniu wzrostu gospodarczego i dobrobytu społecznego, jego rozwój opiera się głównie na innowacyjnych rozwiązaniach dla wielkich wyzwań na płaszczyźnie technicznej i społecznej. Poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań jest czynnikiem sukcesu w odniesieniu do zasad przewodnich zbliżających się zmian ujętych jako wizja 2030 dla przemysłu wytwórczego i przetwórczego [12].

## ZAKRES, ZAŁOŻENIA I GŁÓWNE CELE PRACY

Monografia dotyczy opracowania innowacji produktowych i procesowych w odniesieniu do branży materiałów magnetycznych (kompozytowych magnesów na bazie metali ziem rzadkich). W pracy zaprezentowano etapy projektowania procesu produkcyjnego na podstawie szeregu metod wynikających z zasad inżynierii produkcji. Kolejno zostały przedstawione etapy tworzenia projektu koncepcyjnego dla systemu produkcyjnego, analiza przebiegu operacji w całym procesie produkcyjnym z uwzględnieniem obszarów, które są krytyczne dla powodzenia procesu. Jednym z bardzo istotnych elementów opisanych w pracy był dobór kryteriów jakości, które były podstawą działań w zakresie badań i rozwoju (produktu) – innowacja produktowa. Na podstawie wyników testów wyznaczono optymalne parametry przebiegu procesów specjalnych, a na potrzeby kontrolowania wybranej grupy operacji przedstawiono propozycję innowacji procesowej w wyżej omówionym procesie produkcyjnym. Podsumowanie pracy odnosi się do statystycznej kontroli procesu, na podstawie której określono jego przewidywalność.

Aby zapewnić komplementarność informacji niezbędnych do projektowania procesu produkcyjnego, treść pracy odnosi się do problemów związanych z:

1. Organizacją procesów produkcyjnych i technologicznych w świetle potrzeb i zmian przemysłu;
2. Usystematyzowaniem parametrów użytkowych dla wyrobów z materiałów magnetycznie trwałych na bazie pierwiastków ziem rzadkich – w odniesieniu do zmienności technik produkcji;
3. Tworzenie modeli i planów doboru kryteriów jakości dla wybranej grupy produktów – w procesie produkcji wyrobów z kompozytów magnetycznych;
4. Projektowaniem procesu produkcyjnego z wykorzystaniem narzędzi *lean production* – planowanie przepływu strumienia wartości na podstawie szerokiego zakresu danych dotyczących technik produkcji i doskonalenia wyrobów z kompozytów magnetycznych;
5. Kreowaniem innowacji produktowej i procesowej w branży kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B w odniesieniu do ekonomii i potrzeb rynku.

Rozwiązania wymienionych problemów należy doszukiwać się w wielopoziomym współdziałaniu w otoczeniu operacyjnym, w którym przedsiębiorstwa muszą dostosowywać swoje działanie do zmieniającej się sytuacji na rynku.



W świetle przeglądu literaturowego oraz znajomości podstaw projektowania, w myśl założeń inżynierii produkcji wspartej koncepcjami Lean i Kaizen założono, że głównym celem pracy jest wskazanie kierunków rozwoju innowacji produktowej i procesowej w procesach wytwórczych kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B. Na podstawie wytycznych i informacji na temat dostępnych technologii produkcji podjęto próbę zaprojektowania procesu, w którym kolejność następujących po sobie operacji technologicznych pozwoli na przywrócenie pierwotnych cech materiału proszkowego (rewitalizacja surowca) oraz wprowadzenie operacji, dzięki którym zapewniona będzie stabilność właściwości surowca na wszystkich etapach przetwarzania. Wszystkie działania w projektowaniu procesu oparto na celach szczegółowych:

1. Zmniejszyć straty materiałowe (ograniczyć marnotrawstwo) w obszarze składowania i magazynowania.
2. Zminimalizować utlenianie się proszków magnetycznych na etapie magazynowania i przetwarzania – zastosować wieloetapowy układ zabezpieczeń.
3. Zwiększyć homogenizację kompozycji proszkowej.
4. Ograniczyć degradację materiału kompozytowego podczas eksploatacji (bez zmiany obszaru zastosowania).
5. Wprowadzić zmiany w technologii produkcji bez straty dla najważniejszych właściwości, czyli właściwości magnetycznych.

Cały proces zaawansowanego projektowania i planowania jakości produktu opiera się na pięciu etapach, które stanowią również bardzo ważne źródła informacji zwrotnej.

**Etap 1** Planowanie i definiowanie efektu końcowego procesu – dopasowanie planu projektu i kontroli parametrów do zdefiniowanych wymagań – wytyczenie kryteriów jakościowych.

**Etap 2** Projektowanie i rozwój produktu – przedstawienie projektu wstępnego (konceptyjnego) wraz z zestawem potencjalnych problemów, które mogą pojawić się w toku produkcji. Na tym etapie wykonalność jest określana na podstawie parametrów technicznych produktu (jakości produktu).

**Etap 3** Projektowanie i rozwój procesu – ocena i weryfikacja procesu produkcyjnego w odniesieniu do standardowych procedur operacyjnych.

**Etap 4** Walidacja wyrobu i procesu – ocena i weryfikacja procesu w odniesieniu do działań pilotażowych – tworzenie serii próbnych, linii prototypowych.

Aby potwierdzić zasadność przeprowadzonych zmian w przebiegu procesu, zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych na etapie badań i rozwoju produktu. Rozwój procesu i produktu opierał się na zestawie kryteriów jakości i to na ich podstawie potwierdzono korzystne działanie nowych operacji technologicznych na właściwości eksploatacyjne wyrobów gotowych, jakimi są kompozyty magnetyczne na bazie proszku Nd-Fe,Co-B ( $\text{Nd}_{12}\text{Fe}_{77}\text{Co}_5\text{B}_6$ ). Ważne elementy w projektowaniu

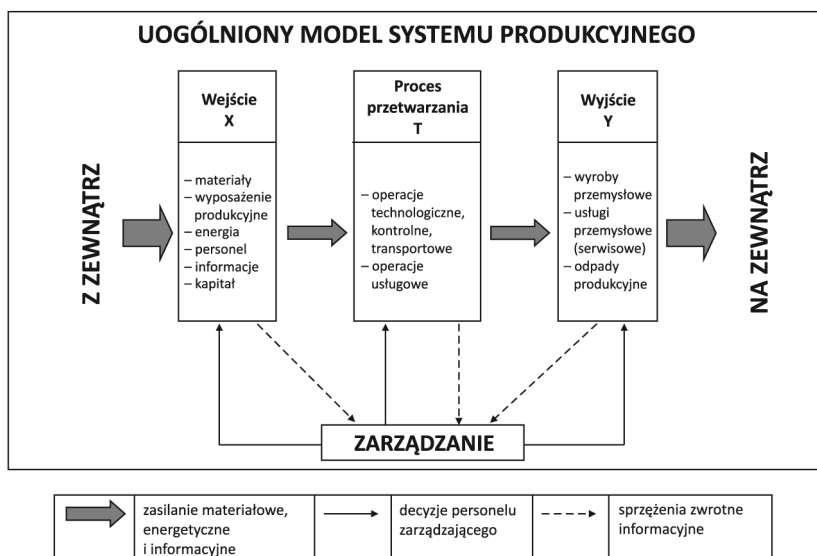
omawianego procesu stanowią również zaprezentowane w pracy modele postępowania podczas tworzenia schematu procesu technologicznego, mapy przepływu strumienia wartości. W ramach walidacji i przygotowania do komercjalizacji procesu wykonano prototyp urządzenia, tj. oscylacyjnego mieszalnika do mieszania mas o wysokiej lepkości. A na podstawie statystycznej kontroli procesu ocenie została poddana jego stabilność.



# 1. ORGANIZACJA PROCESÓW PRODUKCYJNYCH I TECHNOLOGICZNYCH W ŚWIETLE ZMIAN W PRZEMYSŁE

## 1.1. Struktura i elementy tradycyjnego systemu produkcyjnego

System produkcyjny jest to celowo zorganizowany, zaplanowany układ materialny, energetyczny i informacyjny eksploatowany przez człowieka w celu zaspokojenia potrzeb konsumenta [13, 14]. Zatem system produkcyjny wykorzystuje materiały, kapitał, infrastrukturę i siłę roboczą do wytworzenia wymaganej wydajności w postaci towarów. Projekt systemu produkcyjnego obejmuje połączony zestaw szeroko zakrojonych działań i problemy wspólne dla różnych obszarów i sytuacji, niezależnie od stosowanej technologii i procesu. Oczywistą konsekwencją projektowania systemu produkcyjnego, jako odpowiedź na konkretne potrzeby, są powstające koncepcje, techniki i procedury [15]. Przy szczegółowym rozpatrzeniu systemu produkcyjnego można zauważyć, że podstawowymi jego składowymi są dwa ogólne podsystemy: przetwarzania lub produkcji, oraz podsystem zarządzania wraz ze sprzężeniami informacyjnymi (Rys. 1.1) [16].



Rys. 1.1. Uogólniony model systemu produkcyjnego

Pierwszy z podsystemów, podsystem przetwarzania lub produkcji, można podzielić na trzy obszary:

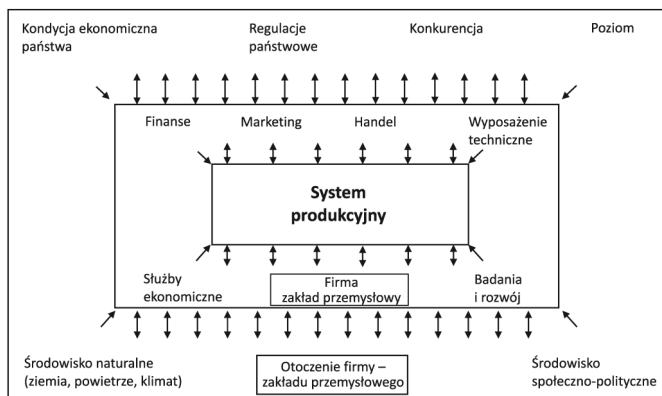
1. Wektor wejścia  $X$  (*Input*), w skład którego wchodzi wszystkie czynniki produkcji;
2. Wektor wyjścia  $Y$  (*Output*), w skład którego wchodzi wyroby, usługi, a także szkodliwe odpady produkcyjne zanieczyszczające środowisko;
3. Procesy przetwarzania wektora wejścia w wektor wyjścia (*Transformation* –  $T$ ). Natomiast do podsystemu zarządzania należy przypisać:

1. Proces zarządzania systemem;
2. Sprzężenia materialne, energetyczne i informacyjne pomiędzy wyżej wymienionymi elementami składowymi systemu produkcyjnego.

Dane zawarte w wektorze wejścia obejmują między innymi: środki trwałe, surowce, maszyny, informacje, instrukcje, standardy i inne. Proces przetwarzania obejmuje operacje (rzeczywisty proces produkcji). Do tej grupy operacji zaliczane są wszelkie operacje ręczne, mechaniczne lub chemiczne. Główną cechą operacji jest fakt, że ich przeprowadzenie ma na celu przekształcenie danych wejściowych na dane wyjściowe. Proces przetwarzania obejmuje także działania wspierające, które pomagają w procesie produkcyjnym. Działania wspierające obejmują: planowanie i organizację produkcji, zakupy surowców, magazynowanie materiałów i wyrobów, kontrolę jakości itp. Do elementów wektora wyjścia procesów zalicza się gotowe produkty i usługi, pozyskane przychody, ale również powstałe podczas przetwarzania odpady i straty [16, 17].

Ze względu na wzajemne oddziaływanie elementów systemu i ich integralny charakter trzeba pamiętać, że każdy z tych elementów może stanowić podrzędny system w zależności od przyjętej hierarchii i poziomu złożoności systemowej. W warunkach gospodarki rynkowej system produkcyjny będzie miał postać bardziej rozbudowaną, natomiast w gospodarce planowanej system produkcyjny utożsamiany może być z procesem produkcyjnym. Zatem systemy produkcyjne mogą być wyodrębnione zarówno w obrębie przedsiębiorstwa, zakładu, jak i oddziału w zależności od celów, którym ma służyć takie wyodrębnienie systemowe.

Granice systemu można zaznaczyć na różnych poziomach, a wszystko poza granicami systemu można uznać za otoczenie zewnętrzne (Rys. 1.2). Cechą otoczenia systemowego jest to, że wpływa ono na cele systemu, ale system nie powinien wpływać na otoczenie [18]. Na podstawie tego, jak otoczenie wpływa na system, można wyodrębnić otoczenie aktywne (pierwszego stopnia), które bezpośrednio wpływa na system, oraz otoczenie pasywne (drugiego stopnia), które ma z pozoru niewielki wpływ na system [19, 20]. Podczas planowania i projektowania systemów produkcyjnych należy uwzględnić oddziaływanie oraz ryzyko wynikające z oddziaływania otoczenia bliższego i dalszego.



Rys. 1.2. Otoczenie systemu produkcyjnego na podstawie [19]

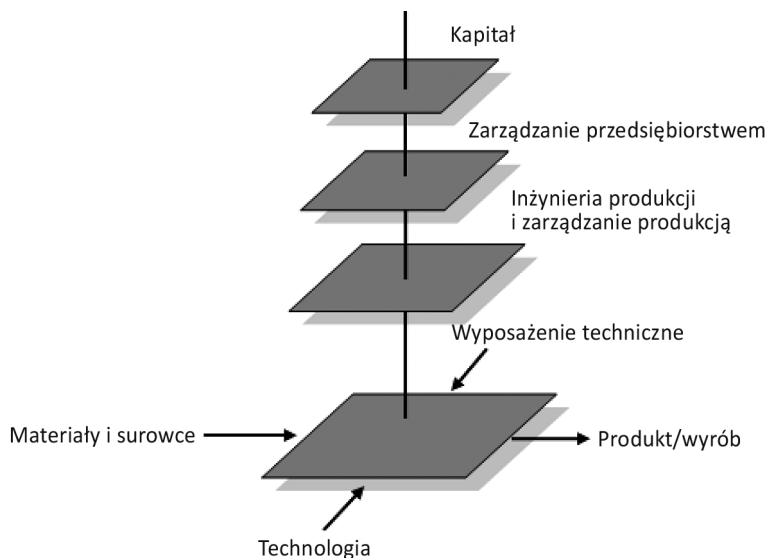
Czynniki z otoczenia stopnia pierwszego i drugiego mają istotny wpływ na efektywność funkcjonowania systemu produkcyjnego. Określone są trzy tezy dotyczące systemu i jego otoczenia:

- porównanie zbliżonych systemów produkcyjnych może doprowadzić do sformułowania błędnych ocen i wniosków, jeśli nie weźmie się pod uwagę podwójnego otoczenia tych systemów;
- sprawne działanie systemów produkcyjnych odbywa się tylko wtedy, gdy funkcjonują one w identycznym lub podobnym otoczeniu systemowym;
- otoczenia bliższego i dalszego stopnia powinny być podobne w parametrach swojego funkcjonowania, aby otrzymać pożądany efekt produkcyjny w obszarze analizowanego systemu.

Bardzo często systemy produkcyjne wyodrębniane są na podstawie struktury produkowanych wyrobów lub usług. W zależności od stopnia agregacji mogą występować mniej lub bardziej złożone systemy produkcyjne. Za niezależny system produkcyjny można uznać cały zakład przemysłowy, jak również pojedyncze stanowisko robocze.

Zatem system produkcyjny składa się z wielu elementów, pomiędzy którymi istnieją wzajemne relacje. Jeszcze inny wymiar można dodać do definiowania systemu produkcyjnego – proces decyzyjny. Proces decyzyjny dotyczący systemu produkcji uwzględnia zarządzanie kapitałem (właściciele), zarządzanie przedsiębiorstwem i zarządzanie produkcją (Rys. 1.3) [21].

Dane wejściowe (uważane za elementy aktywizujące proces), rzeczywisty przepływ procesu i wymagane zasoby, a także dane wyjściowe (wynik), są podstawowymi parametrami definiującymi proces. Co bardzo istotne, procesy definiowane są jako terminowe, a pod względem treści jako zakończona sekwencja działań [22, 23].

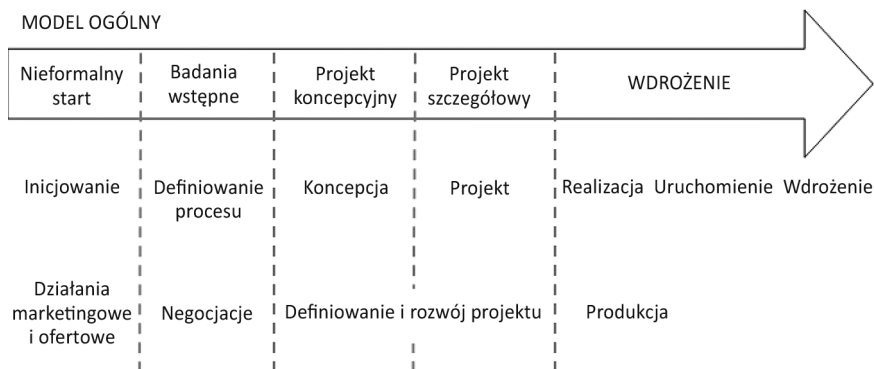


Rys. 1.3. Model systemu produkcyjnego uwzględniający procesy decyzyjne na różnych płaszczyznach operacyjnych

Bez względu na zmiany zachodzące w globalnym podejściu do przemysłu oraz zmieniających się zasad projektowania systemów produkcyjnych w oparciu o zasady i wizje Przemysłu 4.0 [11] punktem wyjścia do analizy ekonomicznej, efektywności i projektowania jest tradycyjny model systemu produkcyjnego. Wydajna i elastyczna produkcja towarów zakłada jednak, że wszystkie podsystemy produkcyjne muszą być w stanie komunikować się i współdziałać na wszystkich poziomach modelu, w otoczeniu operacyjnym, monitorować stan zużycia surowców i materiałów i samodzielnie dostosowywać swoje działanie do zmieniającej się sytuacji na rynku.

## 1.2. Organizacja systemów produkcyjnych

Projektowanie systemu produkcyjnego jest złożone i wymaga integracji różnych dyscyplin na różnych poziomach organizacyjnych przez różne strony, co podczas projektowania systemu produkcyjnego stwarza konieczność brania pod uwagę wysokiego stopnia niepewności, głównie ze względu na nowość w zakresie produktów, technologii produkcji oraz ciągłe zmiany w projekcie [24]. Wobec potrzeby radzenia sobie ze zmianami i stworzenia łatwego do ulepszenia procesu, etap projektowania i organizacji wymaga wykorzystania systematycznego modelu projektu składający się z kilku etapów – na Rys. 1.4 zaprezentowano model projektowania systemu produkcyjnego [25], w którym uwzględniono również różne scenariusze.



Rys. 1.4. Model projektowania systemu produkcyjnego

Do kroków w projektowaniu systemu zalicza się: nieformalny start, badania wstępne, opracowanie projektu koncepcyjnego i opracowanie projektu szczegółowego. Wytyczono szereg elementów koniecznych do realizowania kolejnych kroków w projektowaniu procesów produkcyjnych. Działania, wyzwania i taktyki w procesie projektowania systemu produkcyjnego zostały zaprezentowane na Rys. 1.5–1.7.

Nieformalny start jest zazwyczaj konsekwencją rozwoju produktu lub zmian wymagań stawianych przez rynek. O jego inicjowaniu decyduje kierownictwo, pozostając w zgodzie ze strategią produkcyjną. Może być również dyktowany przez zmiany produkcyjne w celu osiągnięcia znacznej poprawy wydajności przedsiębiorstwa. Chociaż zapotrzebowanie na projekt systemu produkcyjnego jest zazwyczaj znane, a personel produkcyjny może przydzielony do udziału w nowych projektach rozwoju produktu, zazwyczaj brakuje czasu i zasobów do pracy w formalnych projektach systemów we wczesnej fazie. Decyzje, a także szacowanie kosztów i czasu projektu podejmowane są na poziomie zarządzania. Personel produkcyjny rzadko uczestniczy w tych szacunkach. Dobrze, gdyby szacowania te opierały się na doświadczeniu. Wszystkie pomysły wygenerowane na tak wczesnym etapie stają się podstawą do podjęcia kolejnego kroku, jakim są badania wstępne.

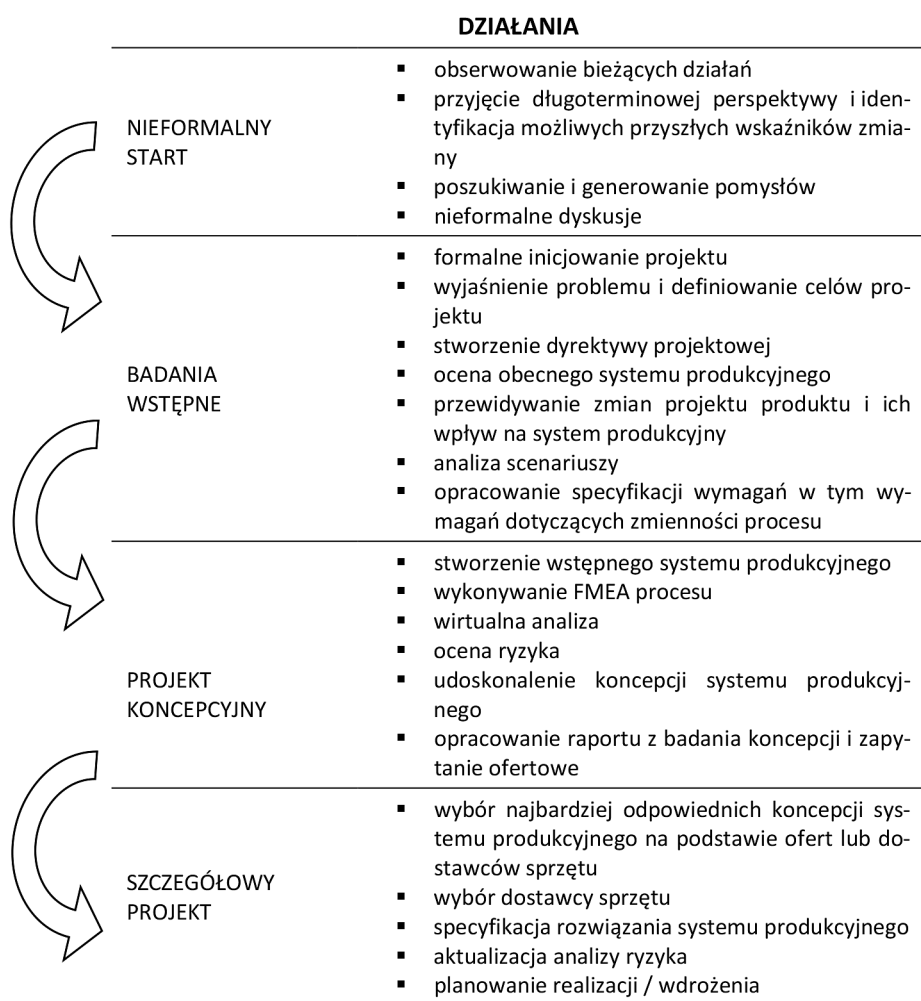
Badania wstępne są określane jako pierwsza oficjalna faza procesu projektowania systemu produkcyjnego. W większości przypadków wyznacza się wtedy formalną organizację projektu obejmującą komitet sterujący, kierownika projektu i grupę projektową z osobami o różnych kompetencjach. Na tym etapie zwraca się uwagę na poprawność zrozumienia problemu i wyjaśnienie celów, które należy osiągnąć.

Określanie pomysłów zwykle odbywa się poprzez bardziej szczegółowe badanie obecnej konfiguracji produkcji. Na etapie badań wstępnych kluczowym jest przewidywanie zmienności projektu końcowego i wpływ na stosowane rozwiązania, a także myślenie o przyszłych generacjach produktów. Kluczowym działaniem w ramach






wstępnego badania jest opracowanie specyfikacji wymagań, aby pomóc w zdefiniowaniu dalszych działań.




System produkcyjny jest złożony i obejmuje nie tylko technologię produkcji, ale wymaga wyraźnego współdziałania między systemem transportu materiałów, systemem ludzi, systemem informatycznym, systemem technicznym, budynkiem i lokalem. Przy projektowaniu systemu produkcji holistyczna perspektywa ma kluczowe znaczenie nie tylko w celu uniknięcia suboptymalizacji, ale także z uwagi na konieczność przyjęcia długoterminowej perspektywy [26].



Rys. 1.5. Działania w projektowaniu systemów produkcyjnych

<b>WYZWANIA</b>	
 NIEFORMALNY START	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ brak zaangażowania pracowników produkcyjnych</li> <li>▪ nie podejmuje się decyzji, które decydują o zakresie projektu</li> <li>▪ brak całościowej perspektywy, decyzje podejmowane przez wąskie grono osób</li> </ul>
 BADANIA WSTĘPNE	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ brak udokumentowanego projektu systemu produkcyjnego w odniesieniu do projektu produktu</li> <li>▪ brak perspektywy długoterminowej</li> <li>▪ brak całościowej perspektywy</li> <li>▪ rozdrobnione i niejawne potrzeby i wymagania dotyczące zmienności procesów i produktów</li> <li>▪ konieczność określenia wymagań i przewidzenia problemów przed wdrożeniem projektu</li> </ul>
 PROJEKT KONCEPCYJNY	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ bardzo ograniczona wiedza o zmienności procesu</li> <li>▪ bardzo ograniczona wiedza o rzeczywistym przepływie strumieni</li> </ul>
 SZCZEGÓŁOWY PROJEKT	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ brak działań w poprzednich fazach przynosi powoduje dużą liczbę niewiadomych</li> <li>▪ utrzymanie zaangażowania i komunikacji pomiędzy różnymi poziomami funkcjonowania systemu</li> <li>▪ ścisła i jasna współpraca z dostawcami sprzętu</li> </ul>

Rys. 1.6. Wyzwania w projektowaniu systemów produkcyjnych

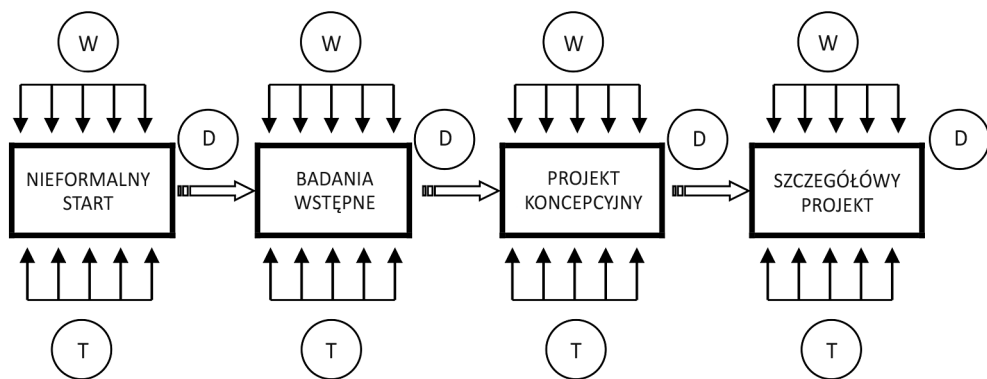
<b>TAKTYKA</b>	
 NIEFORMALNY START	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ stosuj rozwiązania zapewniające elastyczność</li> <li>▪ zaangażuj pracowników produkcyjnych</li> <li>▪ zabezpiecz czas</li> <li>▪ otwórz się na nowe rozwiązania i niekoniecznie trzymaj się istniejących rozwiązań</li> </ul>
 BADANIA WSTĘPNE	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ stwórz zespół wykwalifikowanych projektantów</li> <li>▪ wybierz lidera projektu</li> <li>▪ zabezpiecz umiejętności w zakresie zmienności systemu i procesów</li> </ul>
 PROJEKT KONCEPCYJNY	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ stwórz wirtualne modele, w których można testować aspekty zmienności przed dokonaniem inwestycji</li> </ul>
 SZCZEGÓŁOWY PROJEKT	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ testuj i weryfikuj w wirtualnych modelach systemu produkcyjnego</li> </ul>

Rys. 1.7. Taktyki w projektowaniu systemów produkcyjnych

Specyfikacja wymagań służy jako materiał wejściowy do stworzenia wstępnej koncepcji systemu produkcyjnego. Aby zapewnić lepsze dopasowanie rozwiązania systemu produkcyjnego do przyszłego klienta, szczególny nacisk nakładany jest na różne parametry systemu produkcyjnego. Kluczowym zadaniem, na tym etapie, jest ocena powstałej koncepcji systemu produkcyjnego i określenie związanego z nią ryzyka, analiza trybu i skutków awarii procesu, weryfikacja wirtualna (symulacja) i analiza ryzyka funkcjonalnego. Analiza ryzyka koncentrować powinna się na luce między obecnie dostępnymi możliwościami a wymaganiami dla proponowanego rozwiązania systemowego [24].

Kończącą fazą jest szczegółowy projekt. Wynik szczegółowego projektu zależy w dużej mierze od działań podjętych w poprzednich fazach. Problemy organizacyjne często występujące w szczegółowym projekcie zazwyczaj są konsekwencją niewłaściwie zaplanowanego projektu w ramach wstępnego badania. Jeśli projekt koncepcyjny nie zostanie starannie opracowany, mogą pojawić się również trudności spowodowane wzrostem kosztów. W szczegółowym projekcie zespół projektowy powinien mieć wyraźny pogląd na potrzebę ewentualną zmiany systemu.

Zmienność w systemie obejmuje nie tylko wyposażenie techniczne, ale także, między innymi, gotowość operatorów, struktury organizacyjne, system obsługi materiałów i system informacyjny [27]. Model współzależności pomiędzy wyzwaniem, taktyką i działaniem na każdym etapie projektowania systemu produkcyjnego zaprezentowano na Rys. 1.8 [25, 28, 29].



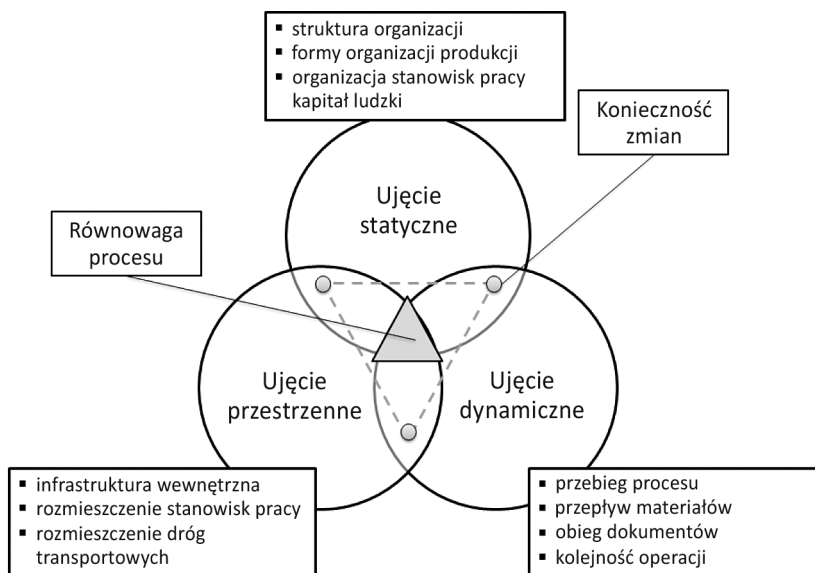
Rys. 1.8. Model współzależności pomiędzy wyzwaniem, taktyką i działaniem na każdym etapie projektowania systemu produkcyjnego (T – taktyka, W – wyzwania, D – działania)

W procesie projektowania głównym założeniem powinno być zachowanie równowagi pomiędzy wyzwaniami a zastosowaną (przeciwstawną) taktyką, tak by zachować możliwość realizowania zamierzonych działań.

### 1.3. Organizacja procesów produkcyjnych

Przystępując do organizacji procesów produkcyjnych, należy pamiętać o trzech płaszczyznach, których znaczenie jest równoważne dla całego systemu, a ich wzajemne oddziaływanie powinno być synergiczne (w rzeczywistości bardzo trudno utrzymać synergię w tym zakresie). Każdej z tych płaszczyzn należy odpowiednio przypisać: ujęcie statyczne, ujęcie dynamiczne i ujęcie przestrzenne (Rys. 1.9) [30].

Każde ze wskazanych ujęć odnosi się do innych obszarów działalności przedsiębiorstwa i przebiegu procesów produkcyjnych. Organizacja procesu produkcyjnego w ujęciu statycznym, zwanym również ujęciem strukturalnym, odnosi się do struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa, a co za tym idzie do struktury zarządzania i funkcjonowania poszczególnych wydziałów przedsiębiorstwa. Podział strukturalny przedsiębiorstwa skutkuje w określonych formach organizacji produkcji, organizacji stanowisk pracy oraz w doborze personelu itp.



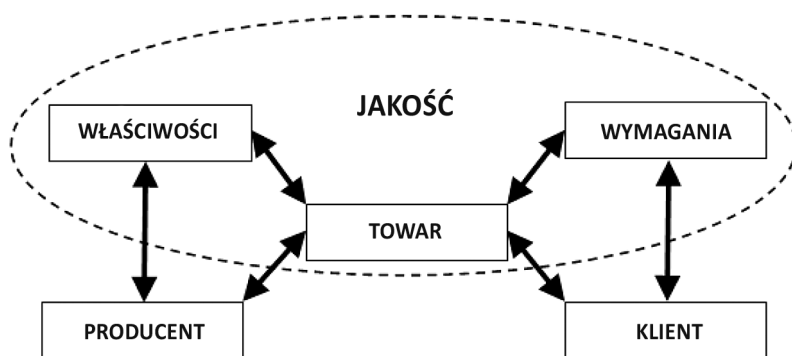
Rys. 1.9. Trzy ujęcia organizacji produkcji na podstawie [30]

Ujęcie dynamiczne do procesów produkcyjnych odnosi się głównie do przepływów materiałów, informacji i dokumentów. Jest to najbardziej aktywne ujęcie procesu, gdyż odnosi się do materialnych i niematerialnych przepływów, które decydują o sprawności realizacji operacji i zadań. Trzecie ujęcie w organizacji procesu produkcyjnego to ujęcie przestrzenne, które ściśle związane jest z wewnętrzną infrastrukturą przedsiębiorstwa – rozmieszczenie i liczebność stanowisk pracy, jak również dostępność dróg transportowych [30, 31].

### 1.3.1. Kryteria organizacji procesów produkcyjnych z uwzględnieniem potrzeb klienta

Techniki organizacji produkcji to ukierunkowane na cel, zajmujące się rozwiązywaniem problemów, bardzo szerokie zagadnienie, które stara się wykorzystywać technologie i materiały w celu spełnienia wymagań użytkowników, biorąc pod uwagę technologiczne, prawne czy też środowiskowe ograniczenia. Głównym celem planowania i organizacji procesów jest dążenie do optymalizacji uzyskiwanych wyników (ale w ramach dostępnej przestrzeni rozwiązania), napędzanie badań w kierunku rozwiązań innowacyjnych wobec nowych wyzwań, którymi są oczekiwania i wymagania klienta [32]. W tym kontekście organizacja produkcji wymaga wnikliwej i rygorystycznej analizy czynników wywierających wpływ na efektywność działań produkcyjnych [33–35].

Gwałtowny rozwój gospodarki w sferze produkcyjnej i usługowej spowodował powstanie znacznej konkurencji na każdej płaszczyźnie biznesu, dlatego też przedsiębiorcy, chcąc utrzymać przewagę nad konkurencją, powinni skupiać się na budowaniu dobrego wizerunku z punktu widzenia jakości [36]. Jakość w ujęciu rynkowym to nic innego jak zakres (stopień) zgodności właściwości produktu z postawionymi wymaganiami klienta. Ze względu na zróżnicowane zasoby środków finansowych różne grupy społeczne będą poszukiwały wyrobów o zmiennym natężeniu cech charakterystycznych. W celu zaspokojenia klientów z różnych grup należy opracować strategię rozwoju przedsiębiorstwa na bazie wyrobów o zmiennych parametrach zaspokajających potrzeby i oczekiwania każdego klienta [37]. W tym zakresie producenci mogą dowolnie sterować właściwościami i cechami wyrobów, ułatwiając decyzję klientów (Rys. 1.10).



Rys. 1.10. Model relacji i zależności w systemie rynkowym. Opracowano na podstawie [38]

Planowanie i organizacja procesów mają charakter wielopoziomowy, co spowodowane jest wzajemnym oddziaływaniem na siebie elementów procesu. Zatem planowanie i organizacja produkcji w głównej mierze powinny opierać się na analizie

sprzężenia zwrotnego uporządkowanych informacji związanych z opracowywaniem procesu, jak i produktu [39], czego wynikiem powinien być cykliczny i wielopoziomowy model rozwoju i doskonalenia procesu.

Zmiany w organizacji procesu mogą pojawiać się w miarę upływu czasu, a podstawą do zmian jest zestaw zgromadzonych informacji na temat potrzeb, wymagań, problemów, potencjalnych wyników i rozwiązań wraz z uwzględnieniem rynku docelowego. Oznacza to konieczność stosowania podejścia otwartego, w którym żadne koncepcje ani idee nie są odrzucane tylko dlatego, że nie pasują do wcześniej opracowanego modelu rozwiązania [40]. Wymaga to ustanowienia solidnej bazy technicznej (w tym kontekście do szerokich badań wstępnych) przy jednoczesnym zrozumieniu ryzyka i porażki w zakresie wprowadzania zmian oraz dostarczeniu narzędzi umożliwiających analizę niepowodzeń. Pierwszym kryterium organizacji procesów produkcyjnych jest kryterium techniczno-ekonomiczne (Tabele 1.1 i 1.2).

Tabela 1.1

Forma organizacji produkcji i charakter przepływu wyrobów według kryterium techniczno-ekonomicznego – produkcja niepotokowa. Opracowano na podstawie [41]

Forma organizacji produkcji i charakter przepływu wyrobów	
<b>PRODUKCJA NIEPOTOKOWA</b>	
Produkcja niepowtarzalna wyrobów pojedynczych lub w krótkich seriach	
W komórkach technologicznych	W komórkach przedmiotowych
1. PRODUKCJA JEDNOSTKOWA	
Jednostkowa technologiczna niepowtarzalna	Jednostkowa przedmiotowa niepowtarzalna
2. PRODUKCJA MAŁOSERYJNA	
Małoseryjna technologiczna niepowtarzalna	Małoseryjna przedmiotowa niepowtarzalna

Według kryterium techniczno-ekonomicznego złożone procesy produkcyjne należy dzielić na pojedyncze operacje lub mniejsze zestawy operacji (układ kilku konsekwentnie postępujących po sobie operacji), które mogą być realizowane przez personel o niskich kwalifikacjach. Taki sposób podziału operacji oraz niski poziom kwalifikacji personelu umożliwia wprowadzenie niższych stawek wynagrodzenia dla załogi. Produkcja potokowa korzystnie wpływa na przepływ materiału i przebieg prac, zwiększając przyrost wartości dodanej i szybsze tempo realizacji prac. Produkcja oparta na tym kryterium niestety wiąże się z uprzedmiotowieniem pracowników, małą elastycznością procesów, brakiem możliwości szybkiego przeorganizowania procesu, wobec dynamiki zmian rynku i wymagań klienta.

Drugim kryterium organizacji systemu produkcyjnego jest kryterium zadowolenia społecznego (czyli kryterium socjologiczno-psychologiczne). W kryterium tym produkcja również jest oceniana pod względem produktywności procesów.

Tabela 1.2

Forma organizacji produkcji i charakter przepływu wyrobów według kryterium techniczno-ekonomicznego – produkcja potokowa.  
Opracowano na podstawie [41]

Forma organizacji produkcji i charakter przepływu wyrobów ( <i>według kryterium techniczno-ekonomicznego</i> )						
<b>PRODUKCJA POTOKOWA</b>						
Synchroniczny przepływ wyrobów produkowanych wielkoseryjnie i masowo						
W komórkach przedmiotowych						
Asynchroniczny powtarzalny przepływ wyrobów	Gniazda przedmiotowe	Linie produkcyjne	Potoki asynchroniczne	Potoki z synchronizacją naturalną	Potoki z przymusowym taktiem	Potoki zautomatyzowane
<b>1. PRODUKCJA JEDNOSTKOWA</b>						
Jednostkowa technologiczna powtarzalna	Jednostkowa grupowa					
<b>2. PRODUKCJA MAŁOSERYJNA</b>						
Małoseryjna technologiczna powtarzalna	Małoseryjna grupowa	Małoseryjna liniowa				
<b>3. PRODUKCJA ŚREDNIOSEERYJNA</b>						
Średnioseryjna technologiczna powtarzalna	Średnioseryjna grupowa	Średnioseryjna liniowa	Potok złożony			
<b>4. PRODUKCJA WIELKOSERYJNA</b>						
	Wielkoseryjna grupowa	Wielkoseryjna liniowa	Potok zmienny asynchroniczny	Potok zmienny zsynchronizowany z naturalną synchronizacją	Potok z przymusowym taktiem	Potok zmienny zautomatyzowany
<b>5. PRODUKCJA MASOWA</b>						
		Masowa liniowa	Potok stały asynchroniczny	Potok stały zsynchronizowany z naturalną synchronizacją	Potok stały z przymusowym taktiem	Potok stały zautomatyzowany

Znacząca różnica wynika z faktu zatrudnienia i zaangażowania w realizację procesu osób o odpowiednich kwalifikacjach. Zakłada się bowiem, że pracownik jest najważniejszym elementem składowym procesu i jego zadowolenie oraz zaspokojenie jego potrzeb materialnych korzystnie wpływa na realizację zadań. Mimo wprowadzanych zmian organizacyjnych system produkcyjny w dalszym ciągu jest za mało elastyczny do reagowania na zmienność potrzeb oczekiwanych przez klientów.

Ostatnim kryterium określającym organizację systemu produkcyjnego jest kryterium zaawansowanej techniki produkcji AMT (*Advanced Manufacturing Technology*) i wysokiej techniki HT (*High Technology*) opartej na rozwoju informatyki i techniki komputerowej. Według tego kryterium wykorzystuje się najnowsze osiągnięcia techniki i informatyki. Produkcja oparta jest na pracy wspomaganych komputerowo nowoczesnych maszyn, a produkcja zazwyczaj ma charakter wielkoseryjny [42, 43].

### 1.3.2. Techniki dostosowania zmienności systemów i procesów produkcyjnych do potrzeb inżynierii produkcji

Jak w każdej gałęzi przemysłu również w przemyśle produkcyjnym istnieje bardzo silna konkurencja, która zobowiązana jest do stawiania czoła wobec coraz większych wymagań jakościowych, środowiskowych i ekonomicznych. Cechą charakterystyczną dla szybko rozwijających się technologii są przypisane im systemy produkcyjne gotowe do wytwarzania grupy wyrobów o stosunkowo niskim koszcie produkcji [44]. W związku z tym wymagany jest doskonały projekt systemu produkcyjnego z uwzględnieniem wizji przyszłości.

Rekonfigurowalne systemy produkcyjne (*Reconfigurable Manufacturing Systems – RMS*) posiadają zalety zarówno produkcji seryjnej, jak i elastycznych systemów produkcyjnych. Pojęcie RMS wprowadzono już w latach 90. XX wieku w celu sprostania wyzwaniom stawianym przez konkurencję i globalizację [45, 46]. Pod koniec XX wieku, wobec dynamicznie zmieniającego się rynku (wzrost popytu na produkty i konieczność wprowadzanie nowych produktów), firmy produkcyjne rozpoczęły intensywne zmiany w zakresie organizacji produkcji. To sprawiło, że projektowanie systemów produkcyjnych dla nowych przedsiębiorstw było dużym wyzwaniem. Głównym celem RMS jest zwiększenie zdolności reagowania systemów produkcyjnych na nieprzewidziane zmiany popytu na produkty [47]. Głównym założeniem projektowania systemów produkcyjnych (również RMS) jest zapewnienie jak największej produktywności i trwałości procesu, a co za tym idzie efektywności kosztowej. Ze względu na znaczną zależność procesów od przepływu strumieni każdy projekt takiego systemu stanowi bardzo duże wyzwanie [48]. Rekonfigurowalność takiego systemu odnosić powinna się do możliwości restrukturyzacji systemu lub do całkowitego jego *Re-engineeringu*. W tym ujęciu rekonfigurowalność systemu to

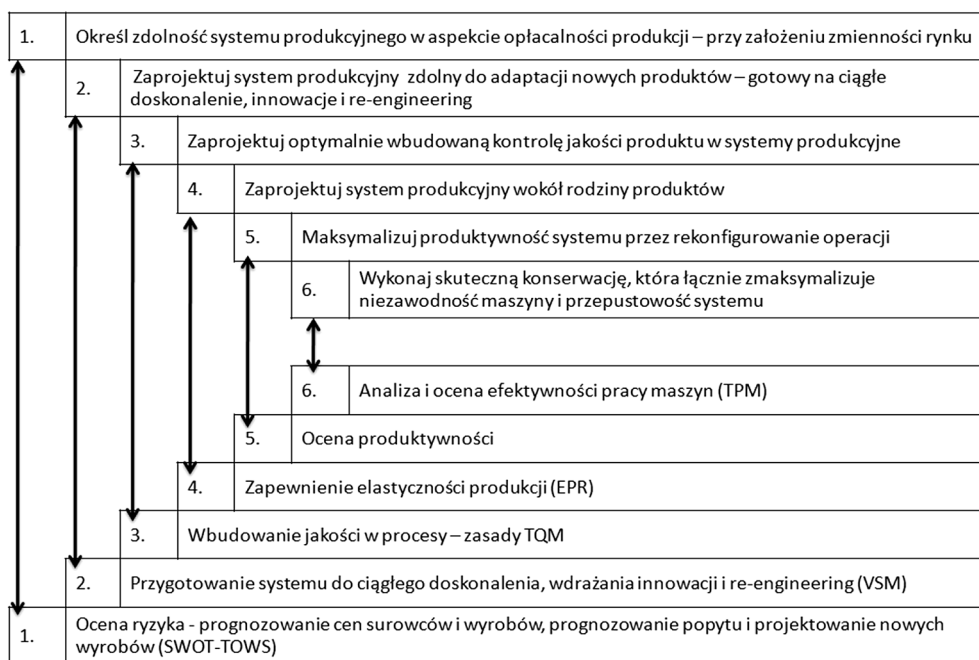


zdolności do restrukturyzacji systemu produkcyjnego przez możliwości dodawania, usuwania składowych lub zmianę struktury systemu produkcji [49].

W zależności od celów biznesowych przedsiębiorstwa produkcyjnego przy wyborze konfiguracji systemu należy wziąć pod uwagę cztery główne wskaźniki wydajności:

- 1) koszty inwestycji,
- 2) szybkość przepływów strumieni wartości: wydajność parku maszynowego – efektywność pracy maszyn, organizacja przepływu informacji,
- 3) szybkość reagowania na popyt (np. zwiększenie przepustowości w celu dopasowania do przyszłych wyzwań),
- 4) poziom spójności pomiędzy jakością produktu a wymaganiami klienta.

Jak wskazuje literatura [50, 51], istnieje sześć podstawowych kroków w projektowaniu systemu produkcyjnego, który zapewni odpowiednią zdolność reagowania na zmiany. Na podstawie podstawowych cech RMS sformułowano zasady projektowania systemów produkcyjnych, natomiast obowiązki wynikające z przestrzegania ww. zasad zaprezentowano na Rys. 1.11.



Rys. 1.11. Sześć podstawowych cech projektowania systemu produkcyjnego przy założeniu zwiększonej jego rekonfigurowalności i responsywności

1. Określ zdolność systemu produkcyjnego w aspekcie opłacalności produkcji – przy założeniu zmienności rynku.
2. Zaprojektuj system produkcyjny zdolny do adaptacji nowych produktów – gotowy na ciągłe doskonalenie, innowacje i *re-engineering*.
3. Zaprojektuj optymalnie wbudowaną kontrolę jakości produktu w systemy produkcyjne.
4. Zaprojektuj system produkcyjny wokół rodziny produktów.
5. Maksymalizuj produktywność systemu przez rekonfigurowanie operacji.
6. Wykonaj skuteczną konserwację, która łącznie zmaksymalizuje niezawodność maszyny i przepustowość systemu.

Aby wesprzeć projektowanie rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych i sprostać zidentyfikowanym wyzwaniom, należy odnosić się do potrzeb rynku, wymagań, specyfikacji i opracowanych już rozwiązań. Projekt musi charakteryzować się znaczną funkcjonalnością i klarownością, co ułatwi współpracę z kooperantami (dostawcami surowców, materiałów i urządzeń). W projekcie konieczne jest usystematyzowanie i sprecyzowanie roli podsystemów: podsystemu zarządzania zasobami ludzkimi, podsystemu zarządzania zasobami technicznymi, podsystemu informacyjnego [25, 46].

#### 1.4. Elementy doskonalenia w planowaniu i projektowaniu produkcji

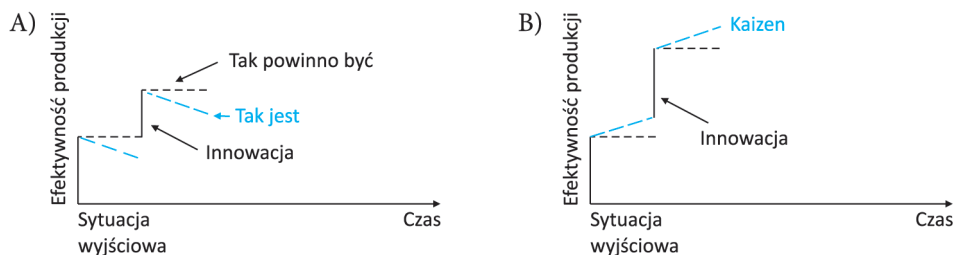
Każde przedsiębiorstwo, które dąży do utrzymania wysokiego poziomu konkurencyjności, stoi przed niełatwym zadaniem ciągłego usprawniania swoich procesów w najszerszym tego słowa znaczeniu – od zarządzania, projektowania i modelowania procesów głównych po metody operacyjne (pracy) stanowiące bazę jego funkcjonowania. W większości przypadków, w przedsiębiorstwach, które nie są w stanie usystematyzować procesów, wszystkie próby ulepszeń między różnymi poziomami nie są metodycznie powiązane [52]. Niewłaściwe podejście do doskonalenia wynika z braku wymiany informacji i danych pomiędzy jednostkami. Zazwyczaj pojawiają się dwa podstawowe pytania [53]:

1. W jaki sposób można z pożytkiem połączyć różne próby ulepszeń na różnych poziomach strumienia wartości?
2. W jaki sposób strumienie wartości mogą być zarządzane, projektowane i ulepszone w uporządkowany i powtarzający się sposób?

Z szerokiej gamy koncepcji i metod doskonalenia strumienia wartości odpowiednie podejście stanowią: systemowe zarządzanie procesami, mapowanie strumienia wartości i procedury do zarządzania i ulepszania procesów [54].

Proces, który kiedyś osiągnął pewien poziom wydajności, prawdopodobnie utraci go w naturalny sposób. Udoskonalenia w zakresie przekazywania procesów

do wyższego poziomu wydajności można osiągnąć dzięki wdrożeniu innowacji (znaczące zmiany) i ciągłemu doskonaleniu (ciągłe, małe zmiany – Kaizen) – Rys. 1.12 [52, 55, 56].



Rys. 1.12. Tempo zmian w kontekście wdrażania innowacji a doskonalenia Kaizen.  
Opracowano na podstawie [57]

Innowacja oznacza zwykle radykalną poprawę wraz z zasadniczymi zmianami. Skoki innowacji są nieciągłe, często inicjowane decyzjami strategicznymi i zwykle są bardzo złożone i interdyscyplinarne. Wdrożenie innowacyjnych rozwiązań tylko w początkowej fazie przynosi znaczące efekty. Aby uniknąć zjawiska nagłego zastoj w rozwoju procesu i wypełnić luki pomiędzy etapami wdrażania innowacji, należy stosować filozofię Kaizen [14]. Ciągłe doskonalenie z warunków bieżących do warunku docelowego charakteryzuje się wieloma małymi, krótko-cyklicznymi (jednozmiennymi) krokami usprawniającymi określone procesy. Te dwie zasady zmienności procesów są w różny sposób rozplanowane w czasie, jednak współbieżnie powinny być wykorzystywane w organizacjach [58, 59].

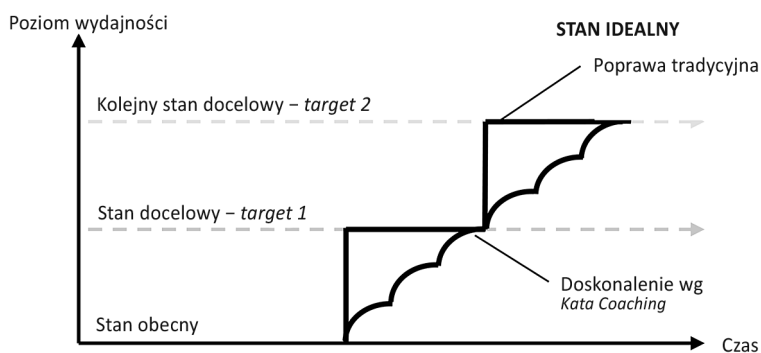
Procedura usprawniania krótko-cyklicznego proponuje, by proces poprawy rozpocząć od stanu bieżącego, aby posiadać określone wymagania stanu docelowego – stanu, który powinien zostać osiągnięty i jest ukierunkowany na idealny. Stan docelowy jest pewnego rodzaju punktem nawigacyjnym doskonalenia (*true north*) i pomocą w zdefiniowaniu docelowych warunków dla procesów. Jedną z metod wspierania tego rodzaju zarządzania przez ciągłe doskonalenie są narzędzia zarządzania wizualnego [60, 61]. Właściciel procesu jest odpowiedzialny zarówno za zdefiniowanie stanu docelowego, jak i warunków docelowych, a także za szkolenie pracowników podczas dążenia do osiągnięcia zamierzonych celów. Przykładowy zestaw parametrów opisujących stan idealny to: wartość dodana 100%, przepływ jednoczesny, zero wad, brak wypadków przy pracy. Konkretny warunek docelowy jest szczegółowo określony przez cele i parametry opisujące proces. Rzeczywiste i docelowe warunki procesu są określone na przykład za pomocą parametrów produktywności (np. pod względem jednostki czasu) lub poziomu jakości (np. udział procentowy wyrobów bez defektów).

Na tle zasad i procedur doskonalenia warto wprowadzić określoną rutynę „Kata” (*Kata-coaching*), która prezentuje wzór lub nawykowe myślenie i działanie. Te bardzo często powtarzające się rutyny ulepszeń i kata-coachingu mają fundamentalne znaczenie dla systematyzacji doskonalenia procesów. Na Rys. 1.13 zaprezentowano schemat kroków wspierających usprawnienia procesu:

1. Dąż do osiągnięcia stanu idealnego i określonych warunków docelowych.
2. Porównaj stan obecny ze stanem docelowym.
3. Systematycznie identyfikuj problemy i przeszkody.
4. Określ rodzaj działania i podejmij próbę rozwiązania problemu (hipoteza i eksperyment).
5. Interpretuj i oceniaj wyniki.

Aby sformułować warunki docelowe, dla wszystkich zaangażowanych pracowników muszą one być realne i możliwe do osiągnięcia.

Ze względu na złożoność i zmienność systemu i procesu niezwykle ważne jest ustanowienie systematycznych i stałych procedur poprawy. W celu ustanowienia i utrzymania krótko-cyklicznego procesu poprawy konieczne jest wdrożenie zorganizowanej procedury w ramach biznesowej struktury organizacyjnej. Krótkotrwała poprawa musi mieć miejsce z dużą częstotliwością, aby wdrożyć zmiany w procesach. W związku z tym stosowane podejście metodyczne eksperymentów jednozmiennych jest zakotwiczone jako zintegrowana rutyna w codziennej działalności firmy. Systematyczna rutyna usprawniająca procesy jest wprowadzana jako podstawa ciągłego doskonalenia, a także poszerza i konsoliduje już stosowane podejścia i koncepcje. Długotrwała, ciągła poprawa zazwyczaj prowadzi do zmniejszenia zmienności etapów procesu. Procedura doskonalenia poprzez wprowadzenie np. rutyny „Kata” (Rys. 1.13) z jednej strony zapewnia zgodność metod w systemach pracy (bez względu na zmienność załogi), z drugiej strony zapewnia, że wszystkie możliwe działania mające na celu poprawę w ramach procesu są faktycznie brane pod uwagę.



Rys. 1.13. Rutynowe usprawnianie procesów w oparciu o hipotezy i eksperymenty – rutyna „Kata”. Opracowano na podstawie [61]

Pomimo stosowania się do procedury działań doskonalących może się zdarzyć, że warunki docelowe nie mogą zostać zrealizowane w ramach granic procesu. Z jednej strony może to być powodem określenia zbyt krótkiego przedziału czasowego dla osiągnięcia celu, z drugiej strony nieosiągnięcie warunku docelowego występuje głównie wtedy, gdy nie jest możliwe zidentyfikowanie dużego, wciąż pojawiającego się problemu. W takim wypadku konieczne jest zainicjowanie skoku innowacyjnego, a tym samym zmiana granic procesowych i określenie nowego targetu o nowych warunkach docelowych [53].

## 2. PARAMETRY UŻYTKOWE DLA WYROBÓW Z MATERIAŁÓW MAGNETYCZNIE TRWAŁYCH NA BAZIE PIERWIASTKÓW ZIEM RZADKICH

### 2.1. Właściwości użytkowe i aspekt ekonomiczny materiałów na bazie pierwiastków ziem rzadkich (RE) w świetle rozwoju nowoczesnych technologii

Grupa materiałów zawierających pierwiastki ziem rzadkich (RE – *rare earth*) uważana jest za niezbędną i krytyczną w sektorze energetycznym – w szczególności w dobie dekarbonizacji branży energetycznej. Metale ziem rzadkich, takie jak: dysproz (Dy), europ (Eu), terb (Tb), itr (Y), prazeodym (Pr) czy też neodym (Nd), są powszechnie stosowane w elementach napędowych pojazdów elektrycznych i hybrydowych, niezbędne również w produkcji energii wiatrowej i słonecznej oraz oświetlenia niskoenergetycznego. Do najpopularniejszych wyrobów, których działanie zależy od materiałów na bazie neodymu (magnesów neodymowych), zalicza się: silniki krokowe stosowane np. w samochodach, twarde dyski komputerów, telefony komórkowe, turbiny wiatrowe, tomografy MRI, układy chłodnicze w lodówkach i klimatyzacji, kamery, odtwarzacze CD, drukarki, skanery itp. Unikatowe właściwości magnetyczne materiałów RE-M na bazie metali ziem rzadkich (RE) oraz metali przejściowych (M) – głównie magnesów na bazie Nd, Sm i Dy – są czynnikiem aktywizującym miniaturyzację wszelkiego rodzaju urządzeń. Nie sposób oczywiście nie wspomnieć o szerokim zastosowaniu tego typu materiałów w medycynie – głównie w medycynie odtwórczej i protetyce jako systemach retencyjnych (zaczepy magnetyczne dla implantów, protez, epitez i obturatorów), ale również w implantach ślimakowych i łącznikach kości.

Zatem szerokie zastosowanie tych materiałów oraz bardzo duże zapotrzebowanie rynku powodują, że ograniczony dostęp do tych surowców jest obciążony ryzykiem niedoborów podaży dla strategicznych sektorów gospodarki.

Ograniczenia eksportowe dotyczące metali i produktów mineralnych są szeroko stosowane w wielu krajach w celu zabezpieczenia dostaw krajowych i ograniczenia wyczerpywania się zasobów. Ze względu na narastające problemy z ograniczonymi możliwościami dostaw surowców Komisja Europejska wydała inicjatywę surowcową (*Raw Materials Initiative*), która podkreśla znaczenie zarówno surowców pier-

wotnych (wydobytych), jak i wtórnych (ponownie wykorzystanych, poddanych recyklingowi). Komplementarność między źródłami pierwotnymi i wtórnymi w celu spełnienia wymagań w zakresie dostaw jest szczególnie ważna w przypadku materiałów, które warunkują tempo rozwoju wielu branż – tak jest właśnie w przypadku pierwiastków ziem rzadkich.

Należy zaznaczyć, że pierwiastki metali ziem rzadkich (RE) wchodzą w skład materiałów, od których w dużej mierze zależy rozwój cywilizacji. Mówiąc o dostępności surowców na bazie metali ziem rzadkich, należy rozróżnić dwa typy złóż: ciężkie (H-RE) i lekkie (L-RE), przy czym złoża ciężkich pierwiastków ziem rzadkich są bardziej deficytowe i nie występują jako pojedyncze tlenki metali, ale jako złożone mieszaniny (np. *bastnäsite*) i są elementem krytycznym dla zaspokojenia potrzeb. Obecnie główne złoża bogate w H-RE to złoża glinki jonowymiennej na południu Chin [62–64].

Do roku 2011 udział chińskiego przywozu surowych ziem rzadkich (tlenków metali, stopów, związków) do Europy wynosił blisko 90%. Przed rokiem 2010 ceny tych metali gwałtownie zaczęły wzrastać, co było spowodowane wprowadzeniem przez Chiny (głównego światowego dostawcę) limitów dla wywozu tlenków ziem rzadkich (REO) oraz ograniczeń dostaw z około 65 000 ton do 30 000 ton. Ograniczenie handlowe spowodowane było przemieszczeniem przemysłu wykorzystującego pierwiastki ziem rzadkich i okazało się głównym powodem chińskich barier eksportowych. Było to elementem strategii mającej na celu stworzenie przewag komparatywnych w tych sektorach. Ponadto bariery eksportowe miały na celu spowolnienie wyczerpywania się zasobów, których konsumpcja bardzo intensywnie wzrasta [64–66].

W okresie od 2009 do 2011 roku cena tlenku neodymu wzrosła z 19,1 do 234,4 USD/kg, a tlenku dysprozu 115,7 do 1449,8 USD/kg. Dopiero po 2013 roku udało się ustabilizować ceny, między innymi dzięki dywersyfikacji źródeł dostaw surowców na bazie RE. Złoża metali ziem rzadkich nie są tak rzadkie w skorupie ziemskiej i występują na pięciu kontynentach: w Azji, Europie, Australii, Ameryce Północnej i Południowej oraz Afryce.

W rezultacie załamania rynku zainicjowano liczne badania mające na celu pomiar zawartości pierwiastków ziem rzadkich w różnych materiałach odpadowych, takich jak na przykład odpady urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Uaktywniono również intensywne poszukiwania metod recyklingu elementów maszyn i urządzeń, które bazują na pierwiastkach ziem rzadkich. Duży nacisk również postawiono na ograniczenie powstawania marnotrawstwa w procesach technologicznych (głównie dotyczyło to odpadów materiałowych) [63].

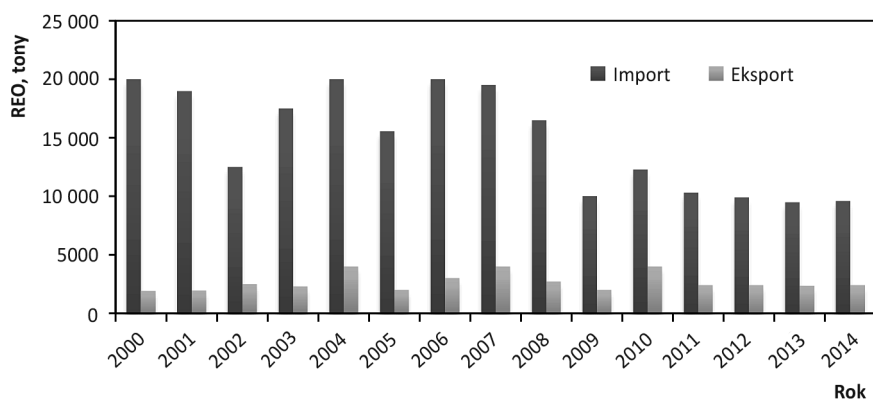
W Tabeli 2.1 zaprezentowano dane dotyczące indywidualnej zawartości metali ziem rzadkich w produktach generowanych przez różne sektory rynku, co bezpośrednio przekłada się na zużycia REO przez różne sektory rynku w Europie.

Tabela 2.1

Relatywne wykorzystanie metali ziem rzadkich w produktach generowanych przez różne sektory rynku. Opracowano na podstawie [67, 68]

	Związki metali ziem rzadkich										
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Inne
Magnezy			16,2	64,5				3,20	16,1		
Baterie	52,5	31,0	4,00	11,0						1,50	
Dod. stopowe	25,4	53,1	5,50	16,0							
Autokataliza	4,80	90,4	2,00	2,90							
Rafinacja ropy	89,6	10,4									
Materiały ściernie	30,5	66,0	3,50								
Dod. do szkła	23,4	67,3	1,00	2,90						2,10	3,3
Ceramika	16,2	12,0	5,90	11,4						54,6	
Inne	18,4	39,5	4,00	14,0	1,90		0,90			20,9	

Na Rys. 2.1 przedstawiono szacunkowy przywóz i wywóz REO do i z Unii Europejskiej na podstawie danych EUROSTATU. Znaczący spadek przywozu zaobserwowany w latach 2008–2011 jest interpretowany jako wcześniej omówiony efekt ekonomiczny. W 2010 r. około 85% tego przywozu pochodziło z Chin, natomiast w 2011 r. dane EUROSTAT wskazują, że znaczna część przywozu ziem rzadkich pochodziła ze Stanów Zjednoczonych (około 30%). Jest to interpretowane w dużej mierze jako efekt przejęcia Silmet (Estonia) przez Molycorp (USA) w kwietniu 2011 r. i eksportu REO przez Molycorp do Estonii.



Rys. 2.1. Import i eksport tlenków metali ziem rzadkich (REO) w Unii Europejskiej. Opracowano na podstawie [67, 68]

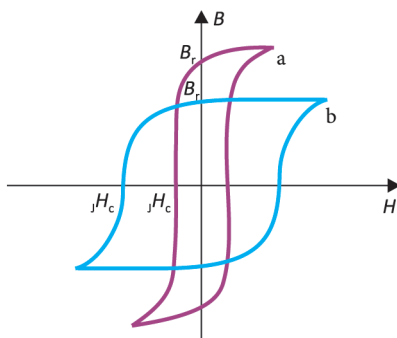


W dobie bardzo dużej dynamiki rozwoju technologii i cyfryzacji oraz wobec rewolucji przemysłowej siłą napędową rozwoju przedsiębiorstw produkcyjnych jest umiejętność (możliwość) stosowania nowoczesnych materiałów, które umożliwiają minimalizację urządzeń i zwiększają prawdopodobieństwo zaspokojenia potrzeb konsumentów. W wielu branżach produkcyjnych koniec XX i początek XXI wieku przedsiębiorstwa swój rozwój uzależnia od rynku materiałów magnetycznych [69]. Materiały magnetyczne są niezbędne w funkcjonowaniu dzisiejszego społeczeństwa, co więcej – zakłada się, że tendencja wzrostowa dla produkcji materiałów magnetycznych wzrastać będzie w sposób wykładniczy. Magnesyt są już bardzo powszechnie stosowane w urządzeniach gospodarstwa domowego, użytku osobistego, samochodach, jak również w układach elektronicznych/komputerowych i w szerokim asortymencie urządzeń medycznych.

Głównym kryterium podziału materiałów magnetycznych jest ich odporność na działanie pól odmagnesowujących, czyli wartość koercji [70–73]. Aby materiały inżynierskie otrzymały miano materiałów magnetycznych, muszą charakteryzować się zdolnością do namagnesowania się w silnym polu magnetycznym o natężeniu większym od natężenia pola koercji  $H_c$  materiału. Granicę podziału na materiały magnetycznie miękkie i magnetycznie trwałe ustanowił Morrish – przyjął, że wartością graniczną będzie wartość koercji 5 kA/m. Według tego kryterium do grupy materiałów miękkich zalicza się wszystkie, których koercja nie przekracza 5 kA/m [74]. W praktyce oznacza to, że materiał namagnesowany przez zewnętrzne pole magnetyczne posiada właściwości magnetyczne, jednak po usunięciu źródła pola magnetycznego ulega rozmagnesowaniu – magnesy miękkie. Natomiast według kryterium Morrisha materiały magnetyczne o koercji pomiędzy 5 a 100 kA/m nazywane są magnetycznie półtrwałymi (półtwardymi). Materiały magnetycznie trwałe (charakteryzujące się koercją większą niż 100 kA/m) nawet po usunięciu zewnętrznego pola magnetycznego utrzymują namagnesowanie i same stają się źródłami pola magnetycznego – magnesy trwałe (często nazywane również magnesami twardymi) [75]. Drugim parametrem istotnym z punktu widzenia dalszego zastosowania technicznego takich materiałów jest remanencja (pozostałość magnetyczna  $B_r$ ). Parametr ten jest miarą stopnia nasycenia magnetycznego – materiał po wyłączeniu źródła zewnętrznego pola magnetycznego zachowuje bliski nasyceniu stopień namagnesowania [76–78].

Krzywą opisującą zmiany indukcji magnetycznej  $B$  wywołane przez zmianę natężenia zewnętrznego pola magnetycznego  $H$  nazywamy pętlę histerezy magnetycznej  $B(H)$ . Zatem w świetle powyższych informacji materiały magnetycznie trwałe (magnesy twarde) charakteryzują się szeroką pętlą histerezy, podczas gdy materiały magnetycznie miękkie charakteryzują się wąską pętlą histerezy (Rys. 2.2).

Wypadkowym kryterium użyteczności materiału jest maksymalna gęstość energii magnetycznej  $(BH)_{\max}$  wyrażona iloczynem maksymalnej wartości pola magne-



Rys. 2.2. Pętle histerezy materiałów magnetycznie miękkich (a) i magnetycznie twardych (b)

tycznego i indukcji magnetycznej. Kryterium to stanowi miarę energii magnetycznej zgromadzonej w objętości magnesu po jego namagnesowaniu. W Tabeli 2.2 przedstawiono poglądowe dane dla parametrów magnetycznych wybranych grup magnesów.

Tabela 2.2

Wybrane parametry użytkowe dla przemysłowych materiałów magnetycznych.  
Opracowano na podstawie [76]

Grupa materiałów magnetycznie trwałe	Maksymalna gęstość energii magnetycznej $(BH)_{\max}$ kJ/m <sup>3</sup>	Koercja $H_c$ (kA/m)	Temperatura Curie, $T_C$ (°C)
Stale	2,3–7,4	5,3–19	745–890
Stopy AlNiCo	10–68	35–130	780–900
Nd-Fe-B (spiekane)	~255	700–850	~310
Nd-Fe-B (wiązane)	~85	500–570	~310
Sm-Co (spiekane)	170–215	170–215	~870
Sm-Co (wiązane)	~55	650–800	~870
Ferryty twarde	20–30	maksymalnie 340	~450

Optimalny punkt pracy, który powinien być zbliżony do maksymalnego punktu  $(BH)_{\max}$ , jest różny dla różnych materiałów magnetycznych i konstrukcji obwodów magnetycznych. W Tabeli 2.2 uwzględniony został również dodatkowy parametr decydujący o właściwościach użytkowych materiałów stosowanych w technice – temperatura Curie, która informuje o maksymalnej temperaturze pracy materiału. W technice i przemyśle rozróżniane są cztery podstawowe kategorie magnesów – przynależność do kategorii podyktowana jest przez sposób wykorzystania ich właściwości magnetycznych [79]:

Kategoria 1: wykorzystanie siły przyciągającej i odpychającej,

Kategoria 2: zdolność magnezu do przekształcania siły elektrycznej w siłę mechaniczną, np. wykorzystywana w silnikach elektrycznych,

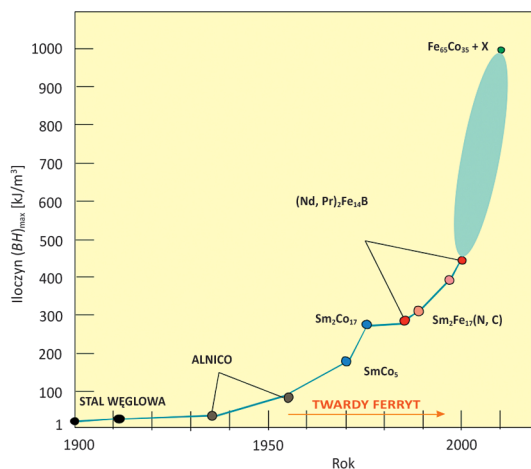
Kategoria 3: zdolność magnezu do przekształcania siły mechanicznej w siłę elektryczną, np. w turbinach generujących moc,

Kategoria 4: zdolność magnezu do wpływania na wiązki jonów, np. heksapole, rozpylanie magnetrone.

Magnesy trwale są używane głównie do magazynowania i przekształcania energii:

- energia mechaniczna → energia elektryczna (mikrofony, generatory);
- energia elektryczna → energia mechaniczna (głośniki, silniki);
- energia magnetyczna → energia mechaniczna (łożyska).

Na podstawie zmian wartości gęstości energii magnetycznej można poglądowo zobrazować rozwój w dziedzinie materiałów magnetycznych od początku XX wieku.



Rys. 2.3. Schemat rozwoju materiałów magnetycznych w XX i XXI wieku według [80]

Drastyczny wzrost właściwości magnetycznych, jaki został odnotowany na przełomie wieków, sprzyja rozwojowi komputeryzacji, cyfryzacji oraz cyberprzemysłu. Daje również nowe możliwości w poszukiwaniu nowych zastosowań dla wyrobów z materiałów magnetycznych. Należy jednak zaznaczyć, że ograniczenia handlowe oraz zapisy z inicjatywy materiałowej dalszy rozwój w branży materiałów magnetycznych kierują w stronę doskonalenia i modyfikowania istniejących technologii produkcji i przetwarzania, a dodatkowo kładą duży nacisk na wykorzystywanie surowców (w tym metali ziem rzadkich), które już są na rynku (recykling).

## 2.2. Tendencje i rozwój w technologiach produkcji materiałów na magnesy

Pierwszymi technicznie stosowanymi magnesami były stale węglowe, nad których właściwościami magnetycznymi prowadzono prace badawcze już od połowy XVIII wieku. Ze względu na fakt, że był to okres intensywnego rozwoju z zakresu technologii przetwarzania stopów żelaza, bardzo szybko zaobserwowano, że dodatki stopowe, takie jak chrom i wolfram bardzo korzystnie wpływają na właściwości magnetyczne tych materiałów. W konsekwencji w Austrii w 1885 roku opracowano technologię produkcji stali wolframowej, w tym samym czasie w Anglii i USA prowadzono intensywne badania nad opracowaniem technologii otrzymywania stali chromowej. Koercja tych magnesów nie przekraczała wartości 4 kA/m, a maksymalna gęstość energii magnetycznej wynosiła ok. 1,6 kJ/m<sup>3</sup>. Do grupy materiałów magnetycznych już na początku XX wieku dołączyła również stal kobaltowa (zawierająca nawet 35% mas. Co), której koercja wynosiła 2 kJ/m<sup>3</sup>, oraz inne stale stopowe, w których wysoka zawartość różnych dodatków spowodowała wzrost koercji nawet do 30 kA/m. Pierwszymi celowo zaprojektowanymi technicznymi materiałami magnetycznymi były stopy Alnico, zawierającego oprócz żelaza i kobaltu również nikiel i glin. Stopy te wielokrotnie modyfikowano, a decydujący wpływ na poprawę jego właściwości magnetycznej miało wprowadzenie technologii umożliwiających tworzenie struktury uporządkowanej pod względem magnetycznym [81, 82]. Inną grupę materiałów magnetycznych stanowią tzw. magnesy ferrytowe, w których skład prócz tlenków żelaza, wchodzi również tlenki Ba, Sr lub Pb [83, 84]. W porównaniu do technicznych stopów Alnico magnesy ferrytowe mają zdecydowanie niższą gęstość energii magnetycznej.

Najbardziej charakterystycznymi i powszechnymi są ferryty baru i strontu ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  i  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ). Pomimo dalszego intensywnego rozwoju w branży materiałów magnetycznych zarówno stopy Alnico, jak i ferryt stanowią najbardziej popularne grupy materiałów magnetycznie trwałych. Zawdzięczają to niskim kosztom produkcji.

Zwrot w badaniach nad poprawą właściwości materiałów na magnesy nastąpił w latach 70., kiedy to uzyskano bardzo wysokie wartości remanencji i koercji dla magnesów zawierających w swym składzie metale z grupy ziem rzadkich (RE – głównie Nd i Sm) oraz metale przejściowe (M – np. Fe, Ni, Co). Materiały typu REM charakteryzują się dużą anizotropią magnetokrystaliczną, która wynika ze sprzężenia momentów magnetycznych pierwiastka ziem rzadkich i metalu przejściowego.

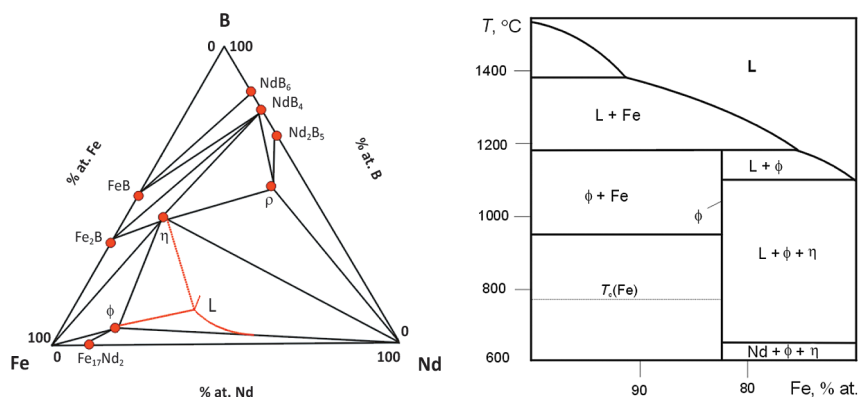
Jako pierwsze wśród tej grupy materiałów pojawiły się materiały bazujące na strukturze związków międzymetalicznych  $\text{SmCo}_5$  i  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , o wartościach podstawowych parametrów magnetycznych kilkukrotnie większych od parametrów stopu Alnico [83]. W 1983 roku dwa ośrodki wiodące w technologii magnesów: Sumitomo

Special Metals w Japonii [85] oraz General Motors w USA [86] opracowały technologię otrzymywania nowych magnesów typu Nd-Fe-B. Był to moment przełomowy dla rozwoju technologii w branży materiałów magnetycznych. Materiały te szybko stały się konkurencyjnymi dla innych magnesów nie tylko ze względu na korzystniejsze właściwości magnetyczne, co gwarantowało zmniejszenie wymiarów elementów magnetycznych przy zachowaniu odpowiednich parametrów technicznych. Koniec XX wieku był zatem rewolucyjnym okresem w projektowaniu bardziej sprawnych obwodów magnetycznych. Ze względu na to, że typowe magnesy na bazie stopu Nd-Fe-B charakteryzowały się wartością  $(BH)_{\max}$  na poziomie  $300 \text{ kJ/m}^3$  w pewnym stopniu z powodzeniem zastąpiły elektromagnesy. Trend w rozwoju technologii magnesów na bazie metali ziem rzadkich potęgowany był również przez fakt, że porównywalną energię magnetyczną uzyskiwały przy wielokrotnie mniejszej objętości niż np. stopy Alnico czy feryty [80, 87].

## 2.3. Chemia materiałów typu Nd-Fe-B

### 2.3.1. Skład chemiczny i strukturalny stopów Nd-Fe-B

Skład fazowy materiałów Nd-Fe-B w stanie równowagi w głównej mierze zależy od składu chemicznego przygotowanego stopu, a można określić go na podstawie trójskładnikowego układu fazowego, który najczęściej przedstawiamy w formie przekrojów izotermicznych (Rys. 2.4) [88] lub też w postaci pseudopodwójnych układów równowagi [83].



Rys. 2.4. Układy równowagi fazowej dla stopów Nd-Fe-B: a) izotermiczny układ równowagi fazowej stopu Nd-Fe-B przy temperaturze 1273 K [88]; b) pseudo-podwójny układ równowagi fazowej Fe-Nd-B, dla stosunku molowego Nd:B=2 [83]

Stopy Nd-Fe-B swoje unikatowe właściwości magnetyczne zawdzięczają między-metalicznej fazie  $\phi$   $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , która reprezentuje całą grupę faz typu  $\text{RE}_2\text{M}_{14}\text{B}$ , jakie mogą tworzyć metale ziem rzadkich (RE) z metalami przejściowymi (M) [89, 90]. Faza  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  krystalizuje w tetragonalnej komórce elementarnej reprezentującej grupę przestrzenną  $\text{P4}_2/\text{mmn}$  o parametrach sieciowych (przy temperaturze  $25^\circ\text{C}$ ):  $a = 0,8792$  nm oraz  $c = 1,2177$  nm. Komórka w swej objętości zawiera 68 atomów (8 atomów neodymu, 56 atomów żelaza, 4 atomy boru), czyli cztery klastry  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  po 17 atomów każdy [89–92].

Jak wynika z układu równowagi (Rys. 2.4), podczas chłodzenia metalicznej cieczy jako pierwsze krystalizuje się żelazo, a dopiero w wyniku przemiany perytektycznej, która zachodzi w temperaturze  $1180^\circ\text{C}$ , powstaje magnetycznie twarda faza  $\phi$  ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B} - 82\%$  at. Fe):



W wyniku dalszych przemian izotermicznych obok fazy  $\phi$  w strukturze stopu powstają również faza wzbogacona w neodym (ang. *Nd-rich phase*, której najczęściej przypisuje się formułę  $\text{Nd}_4\text{Fe}$ ) oraz faza wzbogacona w bor  $\eta$  (*B-rich phase*, uproszczona formuła  $\text{NdFe}_4\text{B}_4$ ). Diamagnetyczna faza neodymowa jest fazą obszaru międzywęzłowego i stanowi ciekawą warstwę izolacyjną dla ziaren innych faz. Razem z zawartymi w niej porami, wydzieleniami tlenkowymi i zanieczyszczeniami zajmuje ok. 10% objętości magnesu. Natomiast paramagnetyczna wysokoborowa faza  $\eta$  (niestechiometryczny związek o formule  $\text{Nd}_{1,1}\text{Fe}_4\text{B}_4$ ) w strukturze magnesów zajmuje 5–6% objętości, jej ziarna są porównywalnych rozmiarów do ziaren fazy ferromagnetycznej i rozmieszczone są nieregularnie w całej objętości stopu. Na etapie projektowania struktury materiałów typu Nd-Fe-B kluczowym elementem jest dobór składu chemicznego. Ze względu na fakt, że za właściwości magnetyczne odpowiedzialna jest faza ferromagnetyczna, skład dobierany jest w taki sposób, by był poza obszarem występowania faz magnetycznie miękkich [88].

### 2.3.2. Modyfikacja chemiczna poprzez dodatki stopowe, powłoki i warstwy ochronne

Prace nad modyfikacją właściwości materiałów magnetycznych na bazie stopu Nd-Fe-B przyczyniły się do intensyfikacji badań nad częściowym zastąpieniem podstawowych składników stopu innymi pierwiastkami. Modyfikacja składu chemicznego, idąca zazwyczaj w parze z modyfikacją struktury i składu fazowego stopu, korzystnie wpływa także na właściwości użytkowe materiałów (właściwości magnetyczne, odporność korozyjna itp.).

W magnesach typu Nd-Fe-B neodym jest częściowo zastępowany przez: Dy [93–99], Tb [97] i Pr [100–103]. Częściowe zastąpienie Nd w ilościach kilku % at. za pomocą innych metali ziem rzadkich nie ma zasadniczego wpływu na odporność

korozyjną stopów REFeB [97, 101, 104]. Wprowadzenie pewnej ilości Dy, Tb czy Pr w miejsce neodymu zwiększa anizotropię fazy  $RE_2Fe_{14}B$ , koercję magnesu, poprawia również jego odporność termiczną [105, 106].

Najważniejszą grupą dodatków są te, które w stopach NdFeB częściowo podstawiają żelazo. Do grupy tej zalicza się Co [93, 95, 107–113], Cu [114–117], Al [107, 118–121], ale również Cr, Ni, W, Sn, Pb, Ti [107, 122–125]. Jednak najczęściej stosowanymi podstawnikami żelaza są Co, Cu, Cr i Ni. Częściowe zastąpienie żelaza przez Co, Cu lub Ni sprawia, że głównie faza neodymowa zostaje silnie wzbogacona w te pierwiastki [122, 126, 127]. W strukturze magnesu faza  $Nd_4Fe$  ulega częściowemu zastąpieniu fazami szlachetniejszymi np.  $Nd_3Co$  czy  $Nd_3Ni$  [128–130]. Wzbogacenie najaktywniejszej z faz w kobalt, nikiel, miedź czy też chrom sprawia, że stopy neodymowe stają się bardziej odporne na korozję kwasową. Zaletą tych dodatków stopowych jest również fakt, że wyraźnie podwyższają temperaturę Curie magnesu [108, 122, 131].

Na właściwości korozyjne magnesów Nd-Fe-B niekorzystny wpływ ma zwłaszcza dodatek węgla [104, 132, 133], którego obecność (0,3–0,9% at.) wyraźnie przyspiesza korozję atmosferyczną. Natomiast dodatek węgla korzystnie wpływa na właściwości magnetyczne [73].

Dodatki stopowe do magnesów Nd-Fe-B są w stanie ograniczyć szybkość korozji najwyżej kilkukrotnie, podczas gdy dla stabilnego działania tych materiałów należałoby ograniczyć szybkość korozji (zwłaszcza w środowiskach o obniżonym pH) co najmniej 100-krotnie. Dlatego jedną z najskuteczniejszych metod zapobiegania degradacji magnesów Nd-Fe-B w wyniku procesów korozyjnych wydaje się być pokrywanie ich powierzchni powłokami ochronnymi. W miarę skuteczną ochronę magnesów neodymowych zapewniają trzy rodzaje powłok, tj.:

- powłoki metaliczne [99, 134–141] – Ag, Au, Ni, Cu, Sn, Zn, Al, Cr, również wieloskładnikowe np. Ni-P, Ni-Cr, Ni-Cu,
- powłoki organiczne [139, 142–144] – np. żywica epoksydowa, poliestrowa żywica fenolowo-formaldehydowa,
- powłoki nieorganiczne – zwłaszcza tlenki i azotki metaliczne (np. ZrN, TiN,  $TiO_2$ ,  $Nb_2O_5$ ) [99, 145–147], a także fosforany [148–150].

Powłoki ochronne na magnesach neodymowych produkowane są metodami galwanicznymi, zanurzeniowymi, PVD, CVD, napyłania, natryskiwania, napawania i elektronapawania. Jak wynika z licznych publikacji [85, 132, 134, 136, 137, 140, 145, 146, 150–152], pokrywanie stopów Nd-Fe-B powłokami ochronnymi może znacząco wydłużyć użyteczność eksploatacyjną magnesów. W Tabeli 2.3 zaprezentowano porównanie podstawowych charakterystyk dla powłok najczęściej stosowanych w ochronie powierzchni materiałów na bazie stopów RE-M-B.

Prócz techniki wytwarzania oraz rodzaju powłoki nie bez znaczenia jest stan powierzchni materiału. Wstępne przygotowanie podłoża ze stopów Nd-Fe-B ma wpływ

na przyczepność powłoki do podłoża. Zatem, aby zminimalizować ryzyko braku przyczepności powłoki ochronnej do powierzchni, konieczne jest właściwe przygotowanie. W przypadku stopów zawierających aktywne metale ziem rzadkich kluczowe jest usunięcie paramagnetycznych faz tlenkowych z powierzchni materiału. Na powierzchni stopów zawierających Nd, Dy czy też La już po kilku godzinach ekspozycji w warunkach dostępu do powietrza i wilgoci na powierzchni powstają liczne skupiska (wyspy) tlenków, dodatkowo cała powierzchnia również pokrywa się równomierną warstwą tlenków. Powstanie paramagnetycznych faz tlenkowych ogranicza przyczepność powłok do podłoża, ale przede wszystkim prowadzi do degradacji faz ferromagnetycznych odpowiadających za trwałość właściwości magnetycznych.

Tabela 2.3

Porównanie różnego rodzaju powłok ochronnych wytworzonych na powierzchni stopów Nd-Fe-B [134, 151, 151, 153]

	Metoda			
	Typowa multipowłoka Ni-Cu-Ni	Nowa multipowłoka Ni-Cu-Ni	Cienki film Al nanoszony w próżni	Powłoka organiczna z drobkami aluminium i cynku
Grubość, $\mu\text{m}$	20	20	10	10
Kompozycja	Ni-Cu	Ni-Cu	Al	Al+Zn
Siły adhezji ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	10,7	21,9	17,5	14,3
Wytrzymałość w atmosferze mgły solnej	około 100 h	> 500 h	> 100 h	około 100 h
Charakterystyka procesu				
Poziom trudności	bardzo łatwy	precyzyjny	precyzyjny	precyzyjny
Koszty	niskie	wysokie	wysokie	niskie
Odporność na korozję	niesatysfakcjonująca	dobra	bardzo dobra	bardzo dobra

Najefektywniejsze działanie powłok uzyskuje się dla materiałów magnetycznych, których szybkość korozji została już ograniczona przez dodatki stopowe. Skuteczną ochroną magnesów neodymowych przed działaniem środowiska może być wytworzenie na ich powierzchni warstw nieorganicznych, w tym np. pasywowanie powierzchni magnezu w roztworze fosforanowym. Taka warstwa pasywna (konwersyjna) składająca się z fosforanów neodymu i żelaza korzystnie wpływa na poprawę odporności korozyjnej magnesów Nd-Fe-B. Warstwy konwersyjne na stopach Nd-Fe-B stanowią doskonałe podłoża dla właściwej organicznej powłoki ochronnej, gdyż hamują procesy korozyjne nawet w przypadku braku zachowania ciągłości powłoki organicznej. Warto zaznaczyć, że materiały kompozytowe wykonane z proszku



na bazie Nd-Fe-B wiązanego materiałem polimerowym są mniej podatne na działanie medium korozyjnego, ponadto tego typu kompozyty zabezpieczone dodatkową powłoką ochronną są zdecydowanie bardziej trwałe niż magnesy spiekane typu Nd-Fe-B w atmosferze przemysłowej [140, 141].

## 2.4. Zmienność procesów technologicznych w produkcji magnesów trwałych

Obecnie stosuje się wiele technologii otrzymywania magnetycznych materiałów typu Nd-Fe-B, a najczęściej używane to: metody prasowania i spiekania proszków z udziałem fazy ciekłej [72, 154–156], metody mechanicznej syntezy (*mechanical alloying* – MA) i mechanicznego mielenia (*mechanical milling* – MM) [83, 157–160], metody szybkiego chłodzenia ze stanu ciekłego (*melt spinning* – MS) [70, 83, 161].

Wybór metody produkcji obok składu chemicznego ma decydujące znaczenie dla uzyskiwanych właściwości materiału, które bezpośrednio zależą od struktury magnesu, a mianowicie jego składu fazowego, rozmiarów występujących w tej strukturze faz oraz ilości zanieczyszczeń, gęstości i stopnia ukierunkowania krystalitów [83, 162, 163].

Najbardziej tradycyjne materiały magnetyczne, mikrokrystaliczne wielofazowe magnesy spiekane, uzyskiwane są tradycyjnymi metodami **metalurgii proszków**. W materiałach tych, w strukturze magnesu, obok fazy  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  występują również faza bogata w bor ( $\text{NdFe}_4\text{B}_4$ ) oraz faza neodymowa ( $\text{Nd}_4\text{Fe}$ ) [122]. W wyniku przetopienia i odlania neodymu, żelaza i żelazoboru uzyskuje się lity materiał, który na dalszych etapach przetwarzania poddawany jest rozdrobnieniu. Ze względu na trudności w mechanicznym kruszeniu odlanego materiału (nawet samozapłon) stosowane są metody rozdrabniania przez nawodorowanie, np. HD (*Hydrogen Decrepitation*) lub też HDDR (*Hydrogenation Disproportionation Desorption Recombination*) [164–166]. W dalszych etapach proszki poddawane są prasowaniu i spiekaniu. Spiekanie nie jest jednak końcowym etapem przed magnesowaniem materiału, gdyż powstałe podczas prasowania naprężenia oraz zdeformowana w procesie mielenia struktura wymaga wyżarzania odprężającego, które sprzyja również usunięciu nierównowagowych faz. Sam proces technologiczny jest dość skomplikowany, prócz wysokich wymagań wyposażenia technologicznego, wysokich temperatur obróbki przyczynia się do powstawania znacznej ilości odpadów materiałowych [167, 168].

Wśród innych metod otrzymywania materiałów na magnesy ze stopu Nd-Fe-B jest metoda mechanicznej syntezy (MA)/mechanicznego mielenia (MM), dzięki której otrzymuje się nanokrystaliczne magnesy typu Nd-Fe-B, o strukturze jedno- lub dwufazowej (fazy ferromagnetycznie twarda i miękka) [91, 135, 157, 159]. Proces ten polega na długotrwałymi wieloetapowym mieleniu czystych proszków ze-

laza, neodymu i boru (MA) lub sproszkowanych wieloskładnikowych stopów (MM) w młynach kulowych. Naprężenia wywołane przez nacisk kul w młynach kulowych prowadzą do intensywnego zgniatania i deformacji proszków, a w konsekwencji do ich łączenia i zgrzewania (na zimno) [159, 169]. Tak przygotowany materiał nie wykazuje zakładanych właściwości – cechy nanokrystalicznego materiału magnetycznie twardego uzyskuje dopiero po procesie kontrolowanej krystalizacji podczas wygrzewania w temperaturze 600–700°C. Produkcja tego typu materiałów o wielofazowej strukturze również stawia wysokie wymagania technologicznego wsparcia procesu, a konieczność stosowania licznych zabiegów obróbki mechanicznej przyczynia się do powstawania znacznej ilości odpadów materiałowych.

Nanokrystaliczną strukturę materiału uzyskać można również, stosując metodę szybkiego chłodzenia ( $10^5 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) [164]. W metodzie tej przetopiony indukcyjnie stop odlewany jest na chłodzony miedziany bęben obracający się z prędkością liniową w zakresie 15–20 m/s. Cechą szczególną proszków otrzymanych przez szybkie chłodzenie jest morfologia cząstek proszku – mają postać nieregularnych blaszek, płatków. Amorficzne lub częściowo skryształizowane blaszki i taśmy są poddawane dodatkowemu mechanicznemu mieleniu, a następnie wyżarzaniu. W efekcie uzyskuje się proszki o strukturze nanokrystalicznej – zazwyczaj jednofazowej strukturze fazy ferromagnetycznej. Struktury takie są metastabilne, a zmiany temperatury mogą prowadzić do rozrostu ziarna fazy ferromagnetycznej, a nawet do powolnego uzyskania stanu wielofazowej struktury równowagowej, do ich spajania stosuje się spoiwa, których technologia przetwarzania nie wymaga stosowania wysokich temperatur. Do najpopularniejszych metod wiązania nanokrystalicznych proszków można zaliczyć wiązanie tworzywem sztucznym bądź też niskotopliwym metalem [73, 87, 162, 167, 170]. To właśnie materiały proszkowe spajane tworzywem sztucznym nazywane magnesami wiązanymi, ferroplastami albo, najtrafniej, dielektromagnesami stanowią bardzo konkurencyjną grupę kompozytów magnetycznych. Należą one do grupy makroskopowo jednorodnych materiałów kompozytowych składających się z dwóch lub więcej komponentów, gdzie głównym składnikiem jest materiał magnetycznie twardy (proszek ze stopu Nd-Fe-B), natomiast tworzywo sztuczne spełnia rolę lepiszcza [171, 172].

Dielektromagnesy o zadanym kształcie mogą być wyprodukowane w dwojaki sposób: poprzez wtryskiwanie lub prasowanie. Pierwsza z tych technik produkcji magnesów wiązanym polega na przygotowaniu mieszaniny magnetycznie twardego proszku z tworzywem sztucznym w formie silnie zdyspergowanego granulatu, który następnie zostaje podgrzany do temperatury stanu plastyczno-płynnego i wtryskiwany bezpośrednio do form o kształcie gotowego magnesu. Jest to technologia bezodpadowa, a właściwości finalnego materiału ściśle związane są z temperaturą (wyznaczaną empirycznie dla zastosowanego spoiwa, ale również dla odpowiedniej wielkości i kształtu formy) oraz ciśnieniem wtrysku. Produkcja magnesów wiąza-

nych wtryskiwanych ograniczona jest jednak przez zawartość proszku magnetycznego w kompozycji granulatu. Aby zapewnić odpowiednią płynność, umożliwiającą pokonanie oporów przepływu w cylindrze dyszy wtryskowej i tulejce wtryskowej, zawartość proszku magnetycznego nie powinna przekroczyć 60% mas. granulatu, co ma niekorzystny wpływ na własności magnetyczne magnesu. Jako lepsze w metodzie wtryskiwania mogą być stosowane tworzywa sztuczne, których temperatura przejścia w stan płynny jest niższa niż 200°C, tj. polistyren (PS), poliamidy (PA), nylon i inne [87, 162, 171, 172].

Druga metoda produkcji kompozytowych materiałów magnetycznych (magnesów wiązanych) polega na prasowaniu kompozycji magnetycznie twardego proszku z chemo- lub termoutwardzalnymi żywicami epoksydowymi oraz na utwardzaniu wypraski. Pierwszym etapem jest przygotowanie kompozycji proszków i żywicy w odpowiednich stosunkach masowych. Według Ślusarek [87, 162, 172] dla zachowania dobrych własności magnetycznych procentowa zawartość żywicy nie powinna przekraczać 5% mas., natomiast minimalna zawartość żywicy konieczna do związania ziaren proszku to 2,5% mas. W celu ułatwienia prasowania suchych kompozycji proszkowych oraz równomiernego zagęszczenia wyprasek konieczne jest stosowanie środków poślizgowych zmniejszających współczynnik tarcia pomiędzy ziarnami proszku, a także pomiędzy proszkiem a ściankami matrycy. Rolę środka poślizgowego mogą spełniać wszystkie substancje zmniejszające współczynnik tarcia (np. smary, wazelina, gliceryna, woda, stearyniany cynku i magnezu), które odparowują lub utleniają się w możliwie niskich temperaturach, a ich zawartość powinna być możliwie jak najmniejsza (max. 0,02% mas.), aby nie powodowała powstawania połączeń obniżających jakość gotowego wyrobu. Podobnie jak w dielektromagnesach wtryskiwanych, tak i w magnesach prasowanych wiązanych znaczący wpływ na właściwości materiału finalnego obok kompozycji proszku ma technologia spajania, w tym naciski stosowane podczas prasowania i parametry utwardzania wyprasek. Również metoda prasowania mieszaniny proszków zaliczana jest do procesów, w których powstawanie odpadów materiałowych jest znacznie zminimalizowane – gniazda matrycy dopasowane są do finalnego kształtu wyrobu.

Jak wynika z literatury przedmiotu, jednym ze sposobów sterowania właściwościami magnetycznymi i mechanicznymi jest wprowadzanie dodatkowych składników do podstawowej kompozycji proszku magnetycznego i żywicy. Komponentami, które korzystnie wpływają na właściwości mechaniczne magnesów, są bardzo drobne proszki żelaza domieszkowane innymi pierwiastkami. Mają one bezpośredni i pozytywny wpływ nie tylko na właściwości mechaniczne, ale również magnetyczne kompozytu. Innymi dodatkami proszkowymi są proszki miedzi i jej stopów, aluminium, niklu, kobaltu czy wolframu [173]. W przypadku dodatków proszkowych zasadniczy wpływ na właściwości materiału ma nie tylko ich skład chemiczny i ilościowy, ale również wielkość i kształt cząstek proszku.

Z punktu widzenia właściwości magnetycznych dielektromagnesów charakteryzują się dużą koercją i remanencją, a ponieważ w swej strukturze zawierają przypadkowo zorientowane ziarna magnetyczne, istnieje możliwość magnesowania gotowych materiałów w różnych kierunkach (zapewnienie anizotropii magnetycznej). Jednak ze względu na ograniczenia technologiczne, jako konsekwencja właściwości materiału spoiwa, to grupa dielektromagnesów wiązanych jest grupą kompozytów magnetycznych cieszących się większym zainteresowaniem [174, 175]. Obie wspomniane metody mają znamiona procesów niemal bezodpadowych. Metody produkcji dielektromagnesów nie wymagają mechanicznej obróbki wykańczającej. Kompozycja proszkowa już na etapie operacji właściwych jest formowana (wtryskiwanie lub prasowanie) zgodnie z wytyczonymi parametrami technicznymi. Brak odpadów materiałowych w procesie produkcji magnesów wiązanych w świetle wytwarzania magnetycznie trwałych materiałów metodami metalurgii proszków świadczy o pozytywnych aspektach ekonomicznych. Odnosząc się natomiast to ograniczonej grupy dielektromagnesów, z punktu widzenia symplifikacji procesów preferowane są metody prasowania, gdyż nie wymagają szerokiego i nowoczesnego parku technologicznego.

Dodatkowym atutem technologii produkcji wiązanych materiałów magnetycznych jest możliwość zastosowania materiałów odpadowych. Odnosząc się do zapisów europejskiej inicjatywy materiałowej, proszek magnetyczny wykorzystywany w technologii produkcji dielektromagnetyków może być zastąpiony sproszkowanymi magnesami z recyklingu zużytych maszyn i urządzeń [176].



## **3. KRYTERIA JAKOŚCI DLA KOMPOZYTÓW MAGNETYCZNYCH JAKO WYROBÓW**

### **3.1. Uwarunkowania w projektowaniu nowych wyrobów**

Ciągle wzrastające zapotrzebowanie na poszukiwanie nowych, innowacyjnych rozwiązań w procesach wytwórczych sprawia, że inżynieria produkcji staje przed szerokim problemem wielopoziomowego projektowania procesów w odniesieniu do kryteriów stawianych przez wymagania prawne, techniczne, środowiskowe, jak również w odniesieniu do wymagań rynku, które często charakteryzowane są jako innowacyjność, konkurencyjność czy też jakość (spełnienie wymagań i oczekiwań klienta) [177–179]. Zarówno rozwój produktu, jak i doskonalenie procesu wymagają posiadania ugruntowanej wiedzy w zakresie produktu, procesu i całego systemu. Zebrane informacje, posiadane doświadczenie i znajomość potrzeb rynku powinny być poddane wnikliwej analizie pod względem możliwych scenariuszy rozwoju projektu. Największym problemem w rozwoju produktu jest często lekceważące podejście do szans i zagrożeń mogących pojawić się na różnych etapach życia produktu. Wszelkie komplikacje mogą być spowodowane przez wpływ otoczenia zarówno bliższego, jak i dalszego [14, 58, 180].

Analizy czynników wpływających na innowacyjność i konkurencyjność wyrobu bezwzględnie uzależnione są od założonego poziomu jakości oraz wszelkich składowych właściwego zarządzania jakością. Kwestia właściwego zarządzania jakością ma zasadnicze i fundamentalne znaczenie w procesach produkcyjnych produktów o wysokim stopniu innowacyjności [177, 181].

Konkurencyjność i innowacyjność przedsiębiorstw jest w dużej mierze zależna od działania w obszarach [182]:

- wzmocnienia funkcjonalności wyrobów – przez standaryzację procesów i wyrobów,
- rozbudowy rodziny wyrobów na podstawie zmienności rynku i popytu,
- zmienności właściwości wyrobów w odniesieniu do wymagań klientów,
- ciągłego rozwoju innowacyjności wyrobu,
- minimalizowania kosztów wewnętrznych przedsiębiorstwa.

Wskazane obszary i determinanty uznane są za globalne trendy. Niemniej jednak tak prowadzone procesy produkcji stają się coraz bardziej złożone, a w konsekwencji niestety bardziej podatne na błędy [61].

Planując produkcję wyrobów, należy przewidzieć pojawienie się produktu niezgodnego, gdyż nierozłącznym elementem każdego procesu wytwórczego jest produkt niezgodny. Zakładając, że każdy proces produkcyjny odbiega od idealnego (modelowego), gdyż wpływają na niego różne czynniki zewnętrzne, nieprzewidziane na etapie planowania, nieuniknione jest wytworzenie produktu niezgodnego z oczekiwaniami klientów. Wymagania te zazwyczaj są jasno określone w specyfikacji przed przystąpieniem do realizacji projektu inżynierskiego, ale równie ważne jest zdefiniowanie produktu niezgodnego.

### 3.2. Zarządzania jakością w projektowaniu nowych produktów

Zaawansowane planowanie jakości jest bardzo ważnym elementem operacyjnym w inżynierii produkcji. Celowo zaplanowanie i zorganizowanie przepływu procesu zapewniającego najlepszą możliwą do osiągnięcia jakość przy największych możliwych do osiągnięcia oszczędnościach. Jakość jest determinantą procesu, która jest kształtowana przez konsekwentny przebieg operacji, niestety często jest błędnie identyfikowana jako wynik działań kontrolnych [179, 183]. W produkcji każdy proces i operacja muszą być zaprojektowane w taki sposób, by prowadziły do uzyskania ukonstytuowanej jakości produktu. Przewidywanie wystąpienia problemów w procesie już na etapie jego planowania pozwala na wczesne wprowadzenie środków zaradczych. W tej kwestii godne naśladowania są systemy produkcyjne, w których duży nacisk kładziony jest na staranne planowanie procesu już na etapie projektowania rozwoju produktu – systemy takie bazują na strukturze i zasadach systemu zarządzania Toyoty [178, 180].

Jak w każdej innej branży, również w procesach tworzenia innowacyjnych materiałów inżynierskich stosowane są metody zaawansowanego planowania jakości produktu (APQP – *Advanced Product Quality Planning*), które zorientowane są na jakość w procesie tworzenia produktu i przyczyniają się do:

- tworzenia wartości (na podstawie wymagań klienta) z zachowaniem terminowości dostaw i stałości kosztów,
- zrównoważone wykorzystanie zasobów materialnych i niematerialnych.

Niestety w zakresie planowania procesów i zapewnienia jakości gotowych wyrobów prace nad dokumentacją APQP przebiegają niezależnie od planowania procesu. W tym sensie prace związane z zapewnieniem jakości nie wykorzystują informacji, które już zostały poznane podczas prowadzenia wcześniejszych zmian i procesów. Metody zaawansowanego planowania jakości produktu (APQP) postulują zatem, by:

- elementy planowania produkcji odnosić do możliwości tworzenia wartości dla klienta,
- tworzyć interdyscyplinarne zespoły,

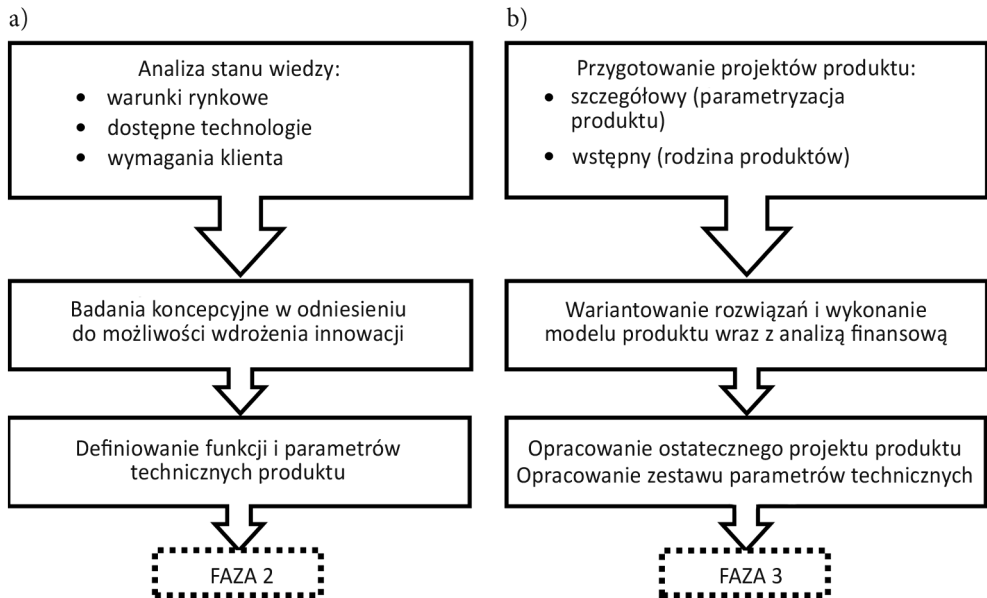
- stosować różne instrumenty zarządzania i sterowania procesem i jakością, np. FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), SPC (*Statistical Process Control*).

Cały proces zaawansowanego projektowania i planowania jakości produktu opiera się na pięciu fazach, które stanowią również bardzo ważne źródła informacji zwrotnej. Informacje takie powinny podlegać instrukcjom i procedurom archiwizowania.

**Faza 1** Planowanie i definiowanie programu jakości (Rys. 3.1a). Na etapie pierwszym planowania jakości produktu najważniejszym punktem jest dopasowanie planu projektu i kontroli do zdefiniowanych wymagań klienta.

**Faza 2** Projektowanie i rozwój produktu (Rys. 3.1b). Badane są możliwości wykonania produktu na podstawie zdefiniowanych wymagań klienta. To bardzo ważny etap, który wzbogaca cały projekt o zestaw potencjalnych problemów, które mogą się pojawić podczas produkcji. Na tym etapie wykonalność jest określana w odniesieniu do: oczekiwanych wolumenów produkcji, parametrów technicznych produktu, jakości produktu, kosztów inwestycyjnych i terminowości.

**Faza 3** Projektowanie i rozwój procesu. Weryfikacja systemu produkcyjnego w odniesieniu do standardowych procedur operacyjnych.



Rys. 3.1. Dwie pierwsze fazy w pięciopunktowym modelu APQP. Następujące po sobie etapy przejścia przez Fazę 1 – Planowanie i definiowanie programu jakości (a) i Fazę 2 – Projektowanie i rozwój produktu (b)



**Faza 4** Walidacja wyrobu i procesu. Działania pilotażowe i tworzenie serii próbnych, linii prototypowych itp. Analiza przepływu procesu odnosi się również do założonego planu kontroli i działań zapobiegawczych.

**Faza 5** Działania korygujące – dotyczy wnikliwej analizy uzyskanych wyników. Na tym etapie analizowane jest pozyskane w danym projekcie doświadczenie oraz budowany jest schemat wykorzystania informacji zwrotnych podczas wdrażania nowego projektu.

Wspomniane zarządzanie jakością odnosi się do efektywności i elastyczności procesów wobec oczekiwań i potrzeb klienta. Wszelkie działania w tym obszarze bazują na funkcjach zarządzania, czyli na planowaniu, organizowaniu, przewodzeniu i kontrolowaniu. W koncepcji jakości można zatem zaznaczyć, że zarządzanie jakością opiera się na kontroli jakości, sterowaniu jakością i jej zapewnieniu na wszystkich etapach produkcji. Natomiast sama inżynieria jakości odnosi się do zbierania, przetwarzania i analizowania zbioru inherentnych właściwości, spełnia wymagania klienta. W odniesieniu do tego założenia inżynieria jakości dzięki wykorzystaniu wiedzy technicznej, metod i narzędzi wspomagających ma na celu modyfikację i utrzymanie odpowiedniego poziomu parametrów, które są miarą jakości.

### 3.3. Inżynieria jakości w projektowaniu kompozytów magnetycznych

W odniesieniu do planowania procesów i zapewnienia jakości gotowych materiałów inżynierskich procedura postępowania jest taka sama, jak dla większości wyrobów. Przedstawione zagadnienie dotyczące determinantów jakości w procesie projektowania z uwzględnieniem parametrów produkcji i eksploatacji omówiono na przykładzie wybranej grupy magnetycznych materiałów inżynierskich.

W Tabeli 3.1 zaprezentowano najistotniejsze informacje gromadzone podczas początkowych etapów planowania produkcji wybranej grupy materiałów magnetycznych.

Usystematyzowanie i pogrupowanie informacji na temat stanu wiedzy o technologiach produkcji materiałów magnetycznych opracowano w odniesieniu do produkcji nowoczesnych kompozytów magnetycznych, zwanych również dielektromagnesami (metody produkcji omówiono w rozdz. 2.4). Obecne metody projektowania materiałów inżynierskich (kompozytów magnetycznych) uwzględniają nie tylko sam proces projektowania i proces produkcji, ale również okres eksploatacji. Dużym ograniczeniem w cyklu życia materiałów na bazie stopu Nd-Fe-B jest ich słaba odporność na działanie mediów w warunkach eksploatacyjnych. Niezadowalająca odporność korozyjna wynika z faktu, że metale ziem rzadkich zaliczane są do grupy metali bardzo aktywnych. Przez duże powinowactwo z tlenem już przy niewielkiej obecności powietrza z łatwością ulegają utlenianiu, co w konsekwencji prowadzi

do degradacji materiału – problem ten odnosi się zarówno do działania otoczenia w warunkach składowania surowców, jak i wyrobów gotowych [184, 185].

Tabela 3.1

Pogrupowane informacje na temat stanu wiedzy o technologiach produkcji materiałów magnetycznych – zestaw informacji niezbędnych do uruchomienia procedury planowania innowacyjnego rozwoju produktu

Poziom definiowania parametrów technicznych	Możliwości techniczne
Rodzaje materiałów magnetycznych	<ul style="list-style-type: none"> <li>• materiały magnetyczne twarde</li> <li>• materiały magnetyczne miękkie</li> </ul>
Technologie produkcji materiałów magnetycznie twardych	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mechaniczna synteza</li> <li>• mechaniczne stopowanie</li> <li>• spiekanie z udziałem fazy ciekłej</li> <li>• zagęszczanie wybuchowe</li> <li>• zasysanie</li> <li>• wiązanie tworzywem metalem niskotopliwym</li> <li>• wiązanie tworzywem polimerowym</li> </ul>
Rodzaje technologii dla magnesów wiązanych – dielektromagnesów	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wtryskiwanie</li> <li>• prasowanie jednoosiowe</li> </ul>
Rodzaje spoiwa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nylon – dla technologii wtryskiwania</li> <li>• żywica epoksydowa, żywica poliestrowa – dla technologii prasowania</li> </ul>
Rodzaje proszków magnetycznych	<ul style="list-style-type: none"> <li>• proszki na bazie stopów Fe-Nd-B</li> <li>• proszki na bazie stopów Sm-Co</li> </ul>
Rodzaje produkcji proszków	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rozdrobnienie przez nawodorowanie</li> <li>• mechaniczne rozdrobnienie</li> <li>• szybkie chłodzenie ze stanu ciekłego</li> </ul>
Struktura proszków Nd-Fe-B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• struktura wielofazowa (faza ferromagnetyczna, faza wzbogacona w Nd, faza borowa i inne)</li> <li>• struktura jednofazowa (faza ferromagnetyczna)</li> </ul>
Udziały procentowe składników	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maksymalnie 60% mas. proszku magnetycznego – dla technologii wtryskiwania</li> <li>• maksymalnie 97% mas. – dla technologii prasowania</li> </ul>
Morfologia cząstek proszku	<ul style="list-style-type: none"> <li>• globularne/zbliżone do regularnych – dla technologii rozdrobnienia przez nawodorowania</li> <li>• nieregularne i blaszkowe – dla technologii szybkiego chłodzenia ze stanu ciekłego</li> </ul>
Poprawa odporności	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dodatki stopowe</li> <li>• powłoki i warstwy ochronne</li> <li>• technologie i metody produkcji</li> </ul>

W ramach planowania koncepcji produkcji innowacyjnych magnetycznych materiałów inżynierskich należy wytyczyć zakres kryteriów jakości. Różnorodność czynników determinujących jakość tych wyrobów sprawia, że kryteria jakości są bardzo interdyscyplinarne, ale najogólniej można podzielić je na techniczne, ekonomiczne i organizacyjne. Kryterium techniczne odnosi się do ogólnych właściwości produktu (identyfikowane przez parametry materiałowe), a w przypadku właściwości kompozytów magnetycznych może być weryfikowane na podstawie:

- właściwości magnetycznych,
- właściwości mechanicznych,
- odporności korozyjnej,
- właściwości tribologicznych.

O ile właściwości magnetyczne to z reguły wymóg konieczny dla tego typu wyrobów, o tyle pozostałe wskazane charakterystyki odnoszą się do wytrzymałości eksploatacyjnej gotowego wyrobu.

Każde kryterium jakości odnoszące się do wytrzymałość eksploatacyjnej może być zdefiniowane przez zestaw parametrów [186, 187]:

- mechanicznych, takich jak twardość, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie;
- elektrochemicznych, takich jak szybkość korozji określana w przyspieszonych testach na korozję atmosferyczną, badaniach potencjokinetycznych w mediach o różnej agresywności itp.;
- tribologicznych, takich jak parametry chropowatości powierzchni gotowych produktów.

Na parametry te mają wpływ przede wszystkim: sposób produkcji, jego struktura, skład chemiczny, a także rodzaj i skład środowiska agresywnego. Przyczynami słabej odporności korozyjnej materiałów magnetycznych na bazie Nd-Fe-B są w pierwszej kolejności: duża zawartość pierwiastków ziem rzadkich (ok. 35% mas. RE, zwykle Nd, Dy lub Sm) oraz kontakt elektryczny faz o różnej aktywności elektrochemicznej. Na odporność korozyjną materiałów magnetycznych w istotny sposób wpływa również wybór technologii. Stosowane od niedawna wiązanie proszków magnetycznych z zastosowaniem żywic epoksydowych zapewnia bardzo dobrą spójność materiału, a izolacja elektryczna poszczególnych cząstek proszku (eliminująca zarazem obecność fazy neodymowej) prowadzi do poprawy odporności korozyjnej w stosunku do magnezów spiekanych. Istotną zaletą magnezów wiązanych jest fakt, iż mogą być one stosowane w bezpośrednim sąsiedztwie silnie odmagnesowujących pól magnetycznych.

Kryterium ekonomiczne będzie odnosiło się przede wszystkim do kosztów związanych z uruchomieniem procesu produkcyjnego oraz kosztów utrzymania jakościowo stabilnego procesu [188]. Kryterium ekonomiczne, prócz kosztów materiałowych i technologicznych, odnosi się również do kosztów i strat w obszarze jakości. Na pod-

stawie przeglądu stanu wiedzy i techniki w zakresie wytwarzania magnesów kompozytowych, koszty jakości to głównie koszty zapobiegania powstawaniu odpadów, defektów i awarii podczas produkcji.

Fundamentem projektowania systemu produkcyjnego, którego głównym elementem wyjścia są gotowe materiały magnetyczne, jest postrzeganie jakości jako elementu niezbędnego do tworzenia wartości (produktu spełniającego wymagania klienta – zgodnie ze wskazanymi kryteriami technicznymi). Natomiast zarządzanie kosztami jakości to nie tylko pozyskiwanie informacji o kosztach związanych z jakością, ale również prognozowanie ich struktury – za co w dużej mierze odpowiedzialne są analizy prowadzone na etapie koncepcyjnym.

Kryterium organizacyjne to przede wszystkim możliwości opracowania koncepcji linii produkcyjnej, ustalenia sekwencji procesów, układu linii produkcyjnej. W tym obszarze niezmiernie ważne jest stworzenie mapy procesu oraz odpowiednie zarządzanie efektywnością procesu.

Rozwinięcia informacji w zakresie wskazanych kryteriów prowadzą do tworzenia pełnej dokumentacji. Specyfikacje te stanowią podstawę do późniejszego uruchomienia produkcji. Wszystkie opisane determinanty jakości w projektowaniu i zarządzaniu procesem produkcji wybranej grupy kompozytów magnetycznych są integralnymi elementami podsystemu zależności projakościowych.

Uszeregowanie kryteriów jakości dla kompozytów magnetycznych w sposób istotny wskazuje obszary, w których należałoby podjąć działania w zakresie doskonalenia. Kryteria jakości pozwalają również na wbudowanie jakości w proces produkcji kompozytów magnetycznych już na etapie projektowania i planowania rozwoju innowacji produktowych i procesowych. Co więcej, kryteria jakości stają się priorytetowe na etapie rozwoju, wytyczając obszar badań laboratoryjnych. Jak wynika z literatury przedmiotu, wszelkie zmiany zarówno w procesie, jak i w produkcji powinny być weryfikowane i optymalizowane w zakresie właściwości magnetycznych, tribologicznych i mechanicznych oraz w odniesieniu do odporności na działanie mediów korozyjnych.



## 4. PROJEKTOWANIE PROCESU PRODUKCYJNEGO W OPARCIU O NARZĘDZIA DOSKONALENIA PROCESÓW – *VALUE STREAM DESIGN*

### 4.1. Charakterystyka strumienia wartości

#### 4.1.1. Wpływ koncepcji *Lean Production* na projektowanie i planowanie procesów produkcyjnych

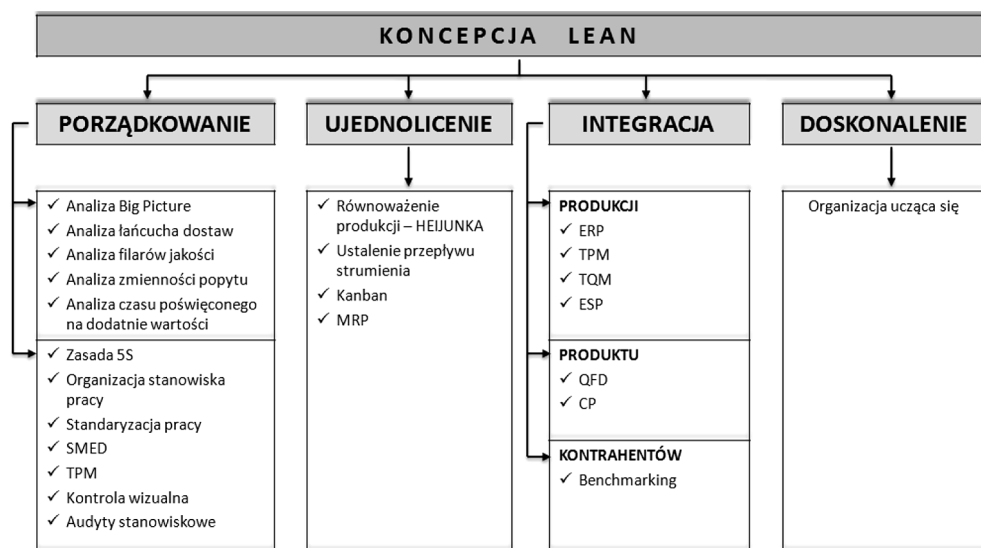
Źródłem koncepcji *Lean* jest japoński przemysł samochodowy, a główne założenie *Lean* to zbudowanie systemu przedsiębiorstwa w oparciu o podstawę tej filozofii, czyli stworzenie możliwości zapewnienia najwyższej jakości produktów dla jak największej liczby klientów przy znacznie niższej cenie [189]. Jedynym sposobem uzyskania tego celu jest racjonalizowanie realizacji procesu produkcyjnego (usługowego) przez [190–192]:

- wyeliminowanie odpadów,
- budowanie przedsiębiorstwa na podstawie jakości,
- obniżenie kosztów poprzez zapewnienie możliwie jak najlepszej wydajności,
- opracowanie własnego, unikalnego podejścia do zarządzania korporacyjnego,
- stworzenie i rozwijanie zintegrowanych technik, które przyczynią się do rozwoju przedsiębiorstwa.

Koncepcja produkcji odchudzonej (*Lean Manufacturing*) polega na zmniejszonym zużyciu i eksploatacji zasobów (surowców, materiałów, wyposażenia technicznego), oszczędności czasu i miejsca przy zapewnieniu, że produkowane w myśl koncepcji *Lean* wyroby będą w pełni spełniały oczekiwania klientów. Kompleksowe podejście do spełnienia wymagań *Lean* obejmuje cztery podstawowe zakresy działalności (Rys. 4.1) [19]: porządkowanie, ujednoclenie, integracja i doskonalenie.

Dwa obszary – porządkowanie i ujednoclenie, są kluczowymi dla wprowadzenia i funkcjonowania koncepcji *Lean* w przedsiębiorstwie. Wśród metod i narzędzi zarządzania zaliczających się do tych, które we właściwy sposób przygotowują procesy do szczupłego zarządzania (*Lean Management*) w obszarach porządkowania i ujednoclenia, jest przede wszystkim analiza *Big Picture*, która w znacznym stopniu odnosi się do zarządzania przepływami i organizacją procesów produkcyjnych [59, 193–195]. Analiza ta skupia się na tworzeniu map i wizualizacji przepływów strumie-

ni wartości. W rozumieniu zarządzania mowa tu o przepływie informacji, materiałów i wyrobów. Analiza *Big Picture* jest podstawowym narzędziem identyfikowania obszarów wymagających przeorganizowania i doskonalenia. Często wyniki tej właśnie analizy są podstawą do wprowadzania zmian w przepływie strumieni, a co więcej mogą być również podstawą do kompletnego *re-engineeringu* procesu [196–199].



Rys. 4.1. Najważniejsze narzędzia koncepcji *Lean*. Opracowano na podstawie [19]

Kolejnym instrumentem wspomagającym zmiany w przedsiębiorstwie jest analiza łańcucha dostaw i to nie tylko w układzie dostawca–przedsiębiorstwo, czy też przedsiębiorstwo–klient, ale również w odniesieniu do wszelkich form transportu międzyoperacyjnego. Analiza łańcucha, zmienności popytu i czasu poświęconego na operacje dodające wartości stanowią uzupełnienie dla analizy *Big Picture*. Można zatem przyjąć, że elementy te stanowią pewnego rodzaju diagnozę stanu obecnego przedsiębiorstwa [200, 201].

W odniesieniu do szczegółowych działań w myśl koncepcji *Lean* należy wspomnieć o porządkowaniu bezpośrednim i temu właśnie służą znane i mocno rozpoznane w ostatnich latach praktyki 5S (lub nawet 6S) [14, 202, 203]. Głównym założeniem tego narzędzia jest wprowadzenie ładu i porządku na stanowiskach pracy, tak by ich organizacja zapewniła jak największe wykorzystanie potencjału ludzi, ale również czasu i narzędzi – przy zachowaniu zasad ergonomii i bezpieczeństwa (zgodnie z zapisami prawnymi dotyczącymi bezpieczeństwa i higieny pracy) [204]. W metodę 5S wbudowane są zasady standaryzacji miejsca pracy i standaryzacji obowiązków zawodowych. Do innych standardów zalicza się również wszystkie techniki wspomagające utrzymanie ruchu maszyn, służące zapewnieniu maksymalnie moż-

liwej efektywności maszyn i urządzeń, co wspierane jest przez zestaw zasad TPM (*Total Productive Maintenance*). Cele TPM realizowane są w dwóch obszarach:

- człowieka (odnosząc się do kształtowania umiejętności miękkich),
- maszyny (w odniesieniu do wyposażenia technicznego).

Z punktu widzenia wdrażania działań *Lean* w obszarze szkolenia i rozwoju pracowników, wzrostu efektywności pracy należy doszukiwać się w rozwoju ich odpowiedzialności i kompetencji poprzez zwiększenie liczby szkoleń. Dzięki cyklom szkoleń rozwijających kompetencje miękkie i techniczne pracownicy mają szansę zwiększyć swoje zaangażowanie w pracę, utożsamiają się z przedsiębiorstwem, a tym samym posiadają silną podstawę do budowania kultury przedsiębiorstwa [205].

Jednym z ważnych elementów i założeń *Lean* jest również ujednoczenie działania przedsiębiorstwa (Rys. 4.1). Możliwe jest to poprzez wbudowanie systemowego zarządzania przedsiębiorstwem, wdrożenie dobrze znanych systemów zarządzania (np. systemu zarządzania jakością, ISO 9001, jak i tych odnoszących się do branży, w której działa przedsiębiorstwo). Ujednoczenie w przedsiębiorstwie odnosi się również do równoważenia produkcji, czyli Heijunka. Heijunkę definiuje się jako poziomowanie wolumenu produkcji i równomierne rozmieszczenie produkcji w czasie, co w gruncie rzeczy odnosi się do szacowania i przewidywania wielkości produkcji oraz przepływu procesu. Konceptyjny model do wyrównywania produkcji (Heijunka) realizowany może być poprzez planowanie dziennego poziomu produkcji. Istnieje pięć działań związanych z kontrolą produkcji za pomocą kontroli wizualnych, zestawów kart Kanban i kontroli godzinowej wydajności produkcji. W niektórych przypadkach, ze względu na różnorodność produktów, elektroniczny Kanban mógłby najlepiej nadawać się do sterowania systemem *Pull* [17].

Zarówno karty Kanban, jak i system ERP (*Enterprise Resource Planning*), który jest odpowiedzialny za planowanie zapotrzebowania materiałowego, są nieodzownym atrybutem działania w myśl zasad Heijunka. Poziomowanie produkcji, obciążenia maszyn i urządzeń, regulowane są przez harmonogramy zamówień i produkcji. Synchronizacja działania tych systemów w znacznym stopniu przyczynia się do minimalizowania strat spowodowanych złą gospodarką materiałową. Metody te służą do planowania i sterowania procesami produkcyjnymi, zapewniając również nadzór nad systemem zarządzania zapasami. Koncepcja *Lean* zakłada trzy poziomy integracji:

- produkcji,
- produktu,
- kontrahentów.

W każdym tym obszarze istnieją narzędzia, które są w stanie wzmocnić działanie przedsiębiorstwa w dążeniu do implementacji zasad szczupłego zarządzania, szczupłej produkcji i szczupłego wytwarzania.



#### 4.1.2. Znaczenie operacji dodających i niedodających wartości w strumieniu wartości

Z punktu widzenia procesu nie ma fundamentalnej różnicy w rozumieniu przepływu procesu a przepływu strumienia wartości. Wszystkie operacje i zadania, zarówno te, które dodają wartości, jak i te, które nie dodają wartości, są istotne z punktu widzenia przepływu procesu produkcyjnego od momentu powstania idei do ostatniego kroku w produkcji. Jednak strumień wartości jest charakteryzowany jako przepływ o wyższym poziomie szczegółowości z uwzględnieniem definicji wartości z perspektywy klienta. Obejmuje on działania mające na celu przetwarzanie informacji od klienta oraz działania mające na celu wszystkie kroki w przekształcaniu produktu w drodze do klienta.

Jak dobrze wiadomo [53, 59, 189, 194, 195, 206, 207], w *Lean Management* wszystkie czynności zachodzące w procesach (w aspekcie znaczenia dla klienta) są rozróżniane pomiędzy dwiema kategoriami (aby je skutecznie rozróżnić należy patrzeć na proces oczami klienta). Te dwie kategorie to: działania zwiększające wartość produktu (VA) oraz działania niezwiększające wartości produktu (NVA). Pełna analiza wszystkich operacji następujących po sobie od momentu wpłynięcia informacji o rozpoczęciu produkcji do momentu dostawy gotowego produktu określa całkowity czas trwania cyklu produkcyjnego zgodnie ze wzorem (4.1)

$$VA + NVA = L/T \quad (4.1)$$

gdzie:

- VA – czas operacji dodających wartości,
- NVA – czas operacji niedodających wartości,
- L/T – całkowity czas przebiegu procesu.

Zatem strumień wartości obejmuje wszystkie działania, tj. dodające wartości (VA), niedodające wartości (NVA) wraz ze wszystkimi operacjami wspomagającymi, które są niezbędne do utworzenia produktu (lub renderowania usługi) i udostępnienia go klientowi. Obejmuje to procesy operacyjne, przepływ materiału między procesami, wszystkie działania kontrolne i sterujące, a także przepływ informacji. Wartościując jakość, należy zwrócić uwagę na czynniki matematyczne, które są składowymi wartości na:

- stan rzeczywisty obiektu (Q),
- stan wzorcowy obiektu (D) – uwzględniając optymalny zakres funkcji i minimalne koszty.

Na podstawie tych danych można wyznaczyć matematyczną funkcję wartościującą (4.2):

$$Q = z \cdot D \quad (4.2)$$

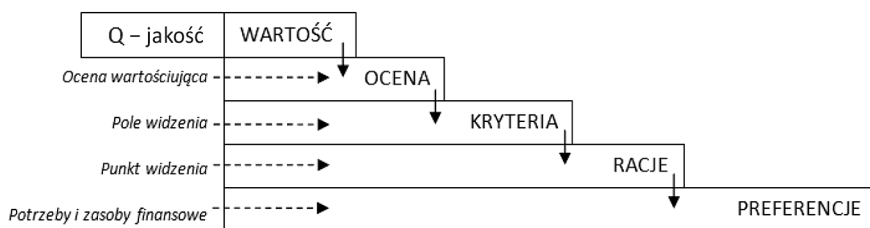
Wzór (4.2) w ogólnym zapisie można przedstawić następująco – wartościowanie jakości ( $W_j$ ) (4.3):

$$W_j = F_{ji}(k_i) \tag{4.3}$$

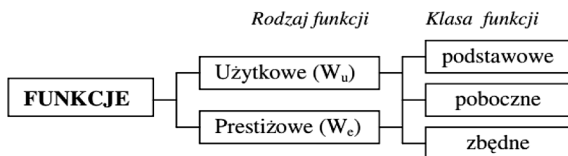
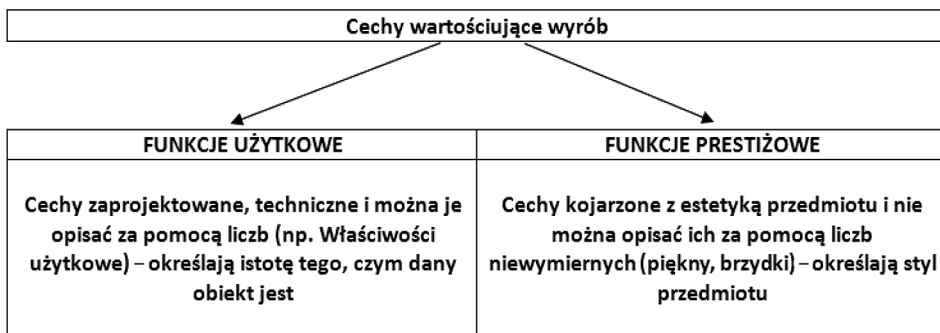
gdzie:

- $F_{ji}$  – postać funkcji wartościującej,
- $k_i$  – wartościowana kategoria jakościowa.

Matematyczna analiza funkcji umożliwi określenie stopnia przydatności danego elementu/wyrobu, dlatego zazwyczaj odnosi się do parametrów, które czynią obiekt użytecznym i zbywalnym (w oczach klienta). Zastosowanie metody wartościowania służy usystematyzowaniu zbioru cech jakościowych obiektu (Rys. 4.2). Jest to niezbędne do podjęcia działań dotyczących kreowania tych cech. Jest pomocne w podejmowaniu decyzji co do strategii zmniejszenia, zwiększenia lub też utrzymania natężenia danej cechy na zaplanowanym określonym poziomie.



Rys. 4.2. Model powiązań przyczynowo-skutkowych przy wartościowaniu jakości



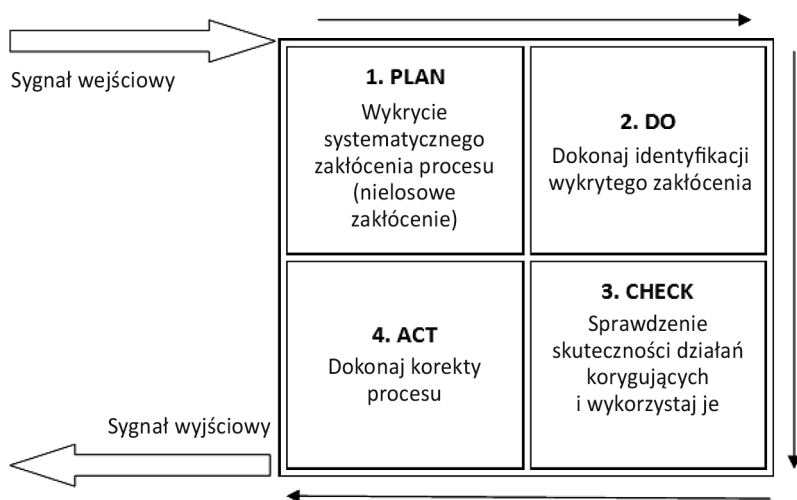
Rys. 4.3. Funkcje umożliwiające określenie stopnia przydatności danego elementu/wyrobu

W tym ujęciu uwzględnia się dwa podstawowe rodzaje funkcji (Rys. 4.3), które determinują poziom jakości wyrobu, są to funkcje użytkowe i funkcje prestiżowe.

Współczesny rynek wymusza jednak, by w jednym wyrobie pojawiały się zestawy funkcji zarówno z grupy użytkowych, jak i prestiżowych. Nie jest również możliwe stwierdzenie, które z tych funkcji są bardziej istotne. Jest to kwestia indywidualnego podejścia do wyrobu przy założeniu złożoności cech produktu.

#### 4.1.3. Czynniki wpływające na kreowanie i przepływ strumienia wartości

Prekursorem zastosowania narzędzi i instrumentów do analizy poziomu jakości produktów był Walter Andrew Shewhart (1891–1967), który już w 1924 roku wykorzystał cykl PDCA (Rys. 4.4) i karty kontrolne do rozwoju, doskonalenia i statystycznej kontroli procesów. Dzięki analizie zmian parametrów możliwe jest zatem określenie wartości produktów, które są efektem procesu. Metoda PDCA (Plan-Do-Check-Act) jest najbardziej znaną i w praktyce stosowaną metodą doskonalenia. Formalizuje procedurę eksperymentalną jako metodę naukową [208].



Rys. 4.4. Schemat cyklu PDCA. Opracowanie własne na podstawie [208]

Cztery podstawowe elementy w cyklu doskonalenia są aktywizowane zazwyczaj rosnącymi potrzebami klientów, którzy wraz z rozwojem techniki stawiają coraz to większe wymagania wobec produktów. Większe wymagania klientów powodują również, że zwiększa się świadomość wartości produktu w oczach klienta. Planowanie, wykonanie, sprawdzenie, poprawienie to strategiczne elementy w kreowaniu i zwiększaniu wartości produktu.

Wszelkie działania operacyjne przedsiębiorstwa powinny odnosić się do:

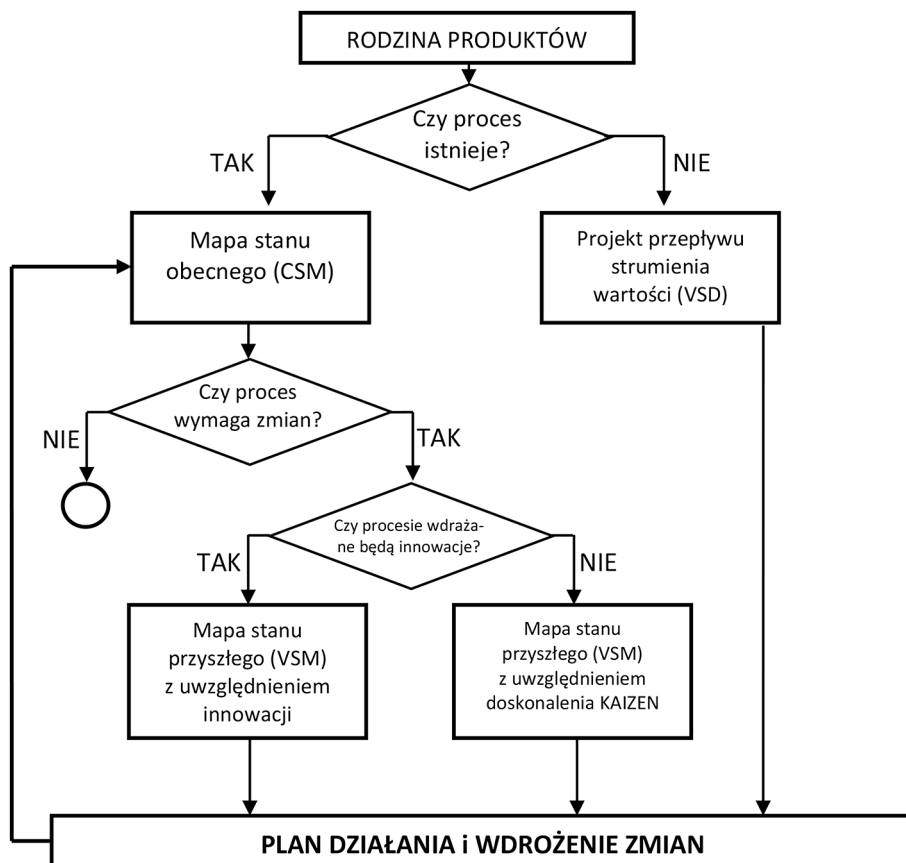
- opracowania wspólnej i spójnej interpretacji przepływu strumienia wartości w bieżącym procesie,
- stworzenia wzajemnego powiązania między wszystkimi operacjami w procesie,
- definiowania wizji i strategii doskonalenia procesu,
- tworzenia planu wdrożeń zmian, udoskonaleń i innowacji.

Wśród czynników posiadających bezpośredni wpływ na kreowanie i przepływ strumienia wartości w całym cyklu produkcyjnym należałoby wymienić wszystkie elementy otoczenia systemu produkcyjnego. Założyć należy, że otoczenie bliższe, w tym wyposażenie techniczne, struktury organizacyjne, np. organizacja systemu, organizacja produkcji, systemy logistyczne itp., mają największy wpływ na przepływ strumienia wartości. Jednak wszystkie te elementy w pewnym stopniu są przewidywalne i możliwe do uwzględnienia w każdym ze scenariuszy przebiegu procesu. Natomiast czynniki z otoczenia dalszego są raczej elementem trudnym do przewidzenia, jak to miało miejsce w przypadku drastycznej wyższości cen surowców w branży wykorzystującej metale ziem rzadkich.

## 4.2. Metoda tworzenia map procesu w odniesieniu do narzędzi *Value Stream Mapping*

Jak zwrócono uwagę już we wcześniejszych rozdziałach, inżynieria produkcji to szeroko rozumiana dyscyplina nauki, która odnosi się głównie do zasad projektowania wyrobów i procesów, jak również do sterowania, eksploatacji, organizacji i zarządzania procesami produkcyjnymi. Jedną z metod projektowania procesów produkcyjnych jest właściwa analiza przepływu wartości zgodna z całym cyklem produkcyjnym produktu [14, 193]. Niezależnie od rodzaju działalności produkcyjnej możliwe jest wykorzystanie jednego z narzędzi wchodzących w skład grupy instrumentów w zarządzaniu *Lean* – Mapowanie Strumienia Wartości (VSM – *Value Stream Mapping*) [59, 189, 194, 196–198, 209–211]. Mapowanie strumienia wartości (VSM) jest elementem koncepcji *Lean Management*, a jego głównym celem jest przedstawienie mapy stanu obecnego (CSM – *current state map*) i mapy stanu przyszłego (FSM – *future state map*) – Rys. 4.5. Opracowanie obrazu procesu (*Big Picture*) jest jedną z opcji przedstawienia przepływu istniejącego już procesu lub procesu, który jest w trakcie projektowania (VSD – *Value Stream Design*) [193, 212]. Projektowanie procesu odbywa się w dość charakterystyczny sposób, gdyż efekty końcowe są definiowane przez odbiorców (klientów) [30].

Mapowanie strumienia wartości wykorzystywane jest do analizy systemu produkcyjnego w podejściu procesowym, jak również do oceny i doskonalenia procesu produkcyjnego. Zastosowanie VSM koncentruje się na przepływie, określając czas



Rys. 4.5. Schemat tworzenia projektowania procesów i zmian z wykorzystaniem mapowania strumieni wartości

oczekiwania i produktywność zgodnie z rzeczywistym przepływem materiałów i informacji [194, 213]. Popularność wizualnego zarządzania w koncepcji *Lean* wynika z możliwości zastosowania jej w rozwiązywaniu różnego rodzaju problemów związanych z ograniczaniem marnotrawstwa lub planowaniem procesów. Podstawowe zasady *Lean production*, którymi należy się kierować podczas tworzenia mapy procesu, to:

- Zasada 1** Zdefiniuj wartość – wartość jest potrzebą, którą proces może zrealizować, wartość jest definiowana na podstawie potrzeb klienta.
- Zasada 2** Zidentyfikuj przepływ wartości – wartość strumienia jest definiowana przez sekwencję czynności, które pozwalają spełnić wymagania klienta.
- Zasada 3** Optymalizuj przepływ – odnosi się do organizacji i optymalizacji sekwencji operacji w strumieniu wartości.

**Zasada 4** Wejść do systemu *pull* – dostarczając tylko to, czego klient faktycznie potrzebuje.

**Zasada 5** Zmierzaj do doskonałości – doskonalenie przepływu strumienia zgodnie z wymaganiami klienta (co, gdzie, kiedy, jak?).

Odpowiednia konstrukcja przepływu strumienia wartości zależy od rozpoznania i zebrania informacji na temat 5 głównych obszarów zawartych na mapie procesu [54, 178, 180, 189, 214]. Strategia projektowania opiera się na modelu SIPOC (*Supplier, Inputs, Process, Outputs, Customers*) i zakłada się, że wszystkie operacje w procesie są w pełni zgodne z oczekiwaniami odbiorców [30]. Na podstawie modelu systemu produkcyjnego, który może również odnieść się do wyekstrahowanego procesu technologicznego, oraz w odniesieniu do modelu SIPOC, wyznaczone zostały strategiczne obszary przepływu strumienia wartości [215]:

**Obszar 1** Specyfikacja wymagań klienta:

- wyznaczenie obiektu do analizy – efekt końcowy procesu (wskazanie produktu końcowego),
- określenie wymagań klienta – specyfikacja standardów (określenie kryteriów dostępności i zgodności z wymaganiami, jakość, liczność, częstotliwość dostaw, sposób pakowania, terminy dostaw, jakość dostaw itp.),
- szczegółowa analiza poziomu zapasów na każdym etapie podsystemów, dostępność materiałów eksploatacyjnych.

**Obszar 2** Identyfikacja przepływów informacji:

- opracowanie prognoz dotyczących wielkości zamówień,
- bieżąca analiza realizacji zamówienia,
- określenie odbiorców informacji dotyczących realizacji zamówienia i procesu produkcyjnego,
- badanie czasu przepływu informacji (może to być wyrażone przez czas oczekiwania na informacje do przetworzenia),
- identyfikacja osób odpowiedzialnych za przetwarzanie zamówień, zakres wymiany informacji między dostawcami a odbiorcami.

**Obszar 3** Identyfikacja przepływów materiałowych:

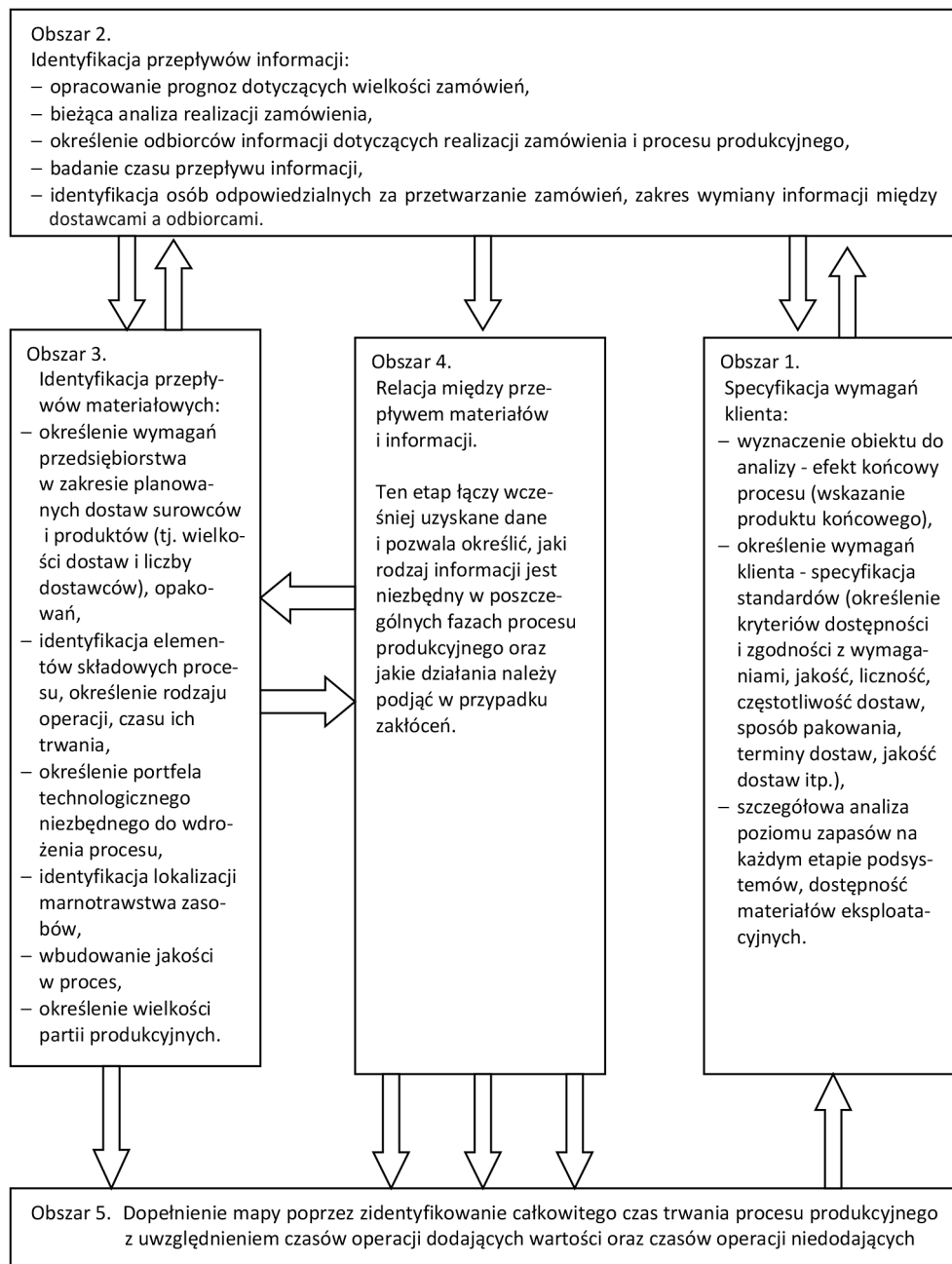
- określenie wymagań przedsiębiorstwa w zakresie planowanych dostaw surowców i produktów (tj. wielkości dostaw i liczby dostawców), opakowań,
- identyfikacja elementów składowych procesu, określenie rodzaju operacji, czasu ich trwania,
- określenie portfela technologicznego niezbędnego do wdrożenia procesu,
- identyfikacja lokalizacji marnotrawstwa zasobów,
- wbudowanie jakości w proces,
- określenie wielkości partii produkcyjnych,
- analiza obciążeń stanowisk roboczych.

**Obszar 4** Relacja między przepływem materiałów i informacji. Ten etap łączy wcześniej uzyskane dane i pozwala określić, jaki rodzaj informacji jest niezbędny w poszczególnych fazach procesu produkcyjnego oraz jakie działania należy podjąć w przypadku zakłóceń.

**Obszar 5** Dopełnienie mapy poprzez zidentyfikowanie całkowitego czasu trwania procesu produkcyjnego z uwzględnieniem czasów operacji dodających wartości oraz czasów operacji niedodających.

Projektując cały proces produkcyjny, ważne jest ustalenie relacji między wskazanymi obszarami. Na Rys. 4.6 przedstawiono graficzny model wzajemnej komunikacji pomiędzy obszarami 1–5. Przebieg procesu pokazuje, że inicjacja przepływu strumienia ma miejsce na etapie określania wymagań klienta, czyli od momentu określania i identyfikowania kryteriów produktu, a także kryteriów pakowania i dostawy. Na tym etapie informacje są wymieniane między klientem (podmiotem zamawiającym) a przedsiębiorstwem (właścicielem procesu), przepływ strumienia informacji między obszarem 1 a obszarem 2. Przepływ strumienia w obszarze 2 jest nieco bardziej skomplikowany, ponieważ wymaga synchronizacji przepływu informacji między obszarami 3 i 4 oraz dodatkowo uwzględnia i rozpoczyna przepływ strumienia materiałów w obszarze 3. Obszar 5 jest bardzo specyficznym obszarem, ponieważ stanowi uzupełnienie parametrów metrycznych całego procesu. Niezakłócone przepływy strumienia informacyjnego między obszarami 3 i 4 obrazowane są w obszarze 5. Warto zaznaczyć, że obszar 5 reprezentuje głównie parametry przepływu strumienia materiałowego – odnosi się do gospodarki materiałowej, dostaw i wszystkich późniejszych operacji technologicznych (operacje podstawowe i pomocnicze).

Podczas projektowania procesu produkcyjnego należy określić, kto jest decydującym w sprawie parametrów mających zastosowanie we wszystkich obszarach przepływu strumienia. W obszarze 1 klient decyduje o wymaganiach dla gotowego produktu, kierując się kryteriami jakości, ustawia zestaw parametrów. Cały proces powinien być prowadzony w taki sposób, aby produkt spełniał wymagania pod względem parametrów ustalonych przez klienta. Obszar 1 to obszar, w którym przepływ informacji od klienta odgrywa kluczową rolę. Przepływ strumienia (informacji) w obszarze 2 jest w pełni kontrolowany przez właściciela procesu i zależy głównie od struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa, systemów zarządzania w przedsiębiorstwie, procedur operacyjnych i kompetencji pracowników w centrach zarządzania projektami inżynierskimi. Obszar 3 i 4, podobnie jak obszar 2, są w dużym stopniu zależne od struktury organizacyjnej i systemów zarządzania w przedsiębiorstwie, ale dodatkową składową tych obszarów są systemy logistyczne, systemy zarządzania gospodarką materiałową i magazynową. W tym obszarze, oprócz przepływu strumienia informacyjnego, proces zajmuje się również przepływem strumienia materiałowego. W konsekwencji oznacza to, że decydentami są także kooperatorzy – dostawcy materiałów i komponentów. Wpływ zewnętrznych uczestników w przepływie stru-



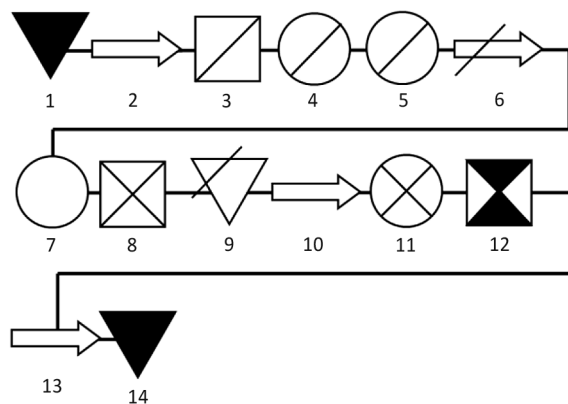
Rys. 4.6. Graficzny model wzajemnej komunikacji pomiędzy obszarami 1–5 przepływu strumienia wartości



mienia wymusza zachowanie odpowiedniego poziomu organizacji pracy, aby zapewnić równowagę w planowaniu zapotrzebowania materiałowego i dostaw. Obszar 5 jest w pełni zależny od technicznych możliwości firmy. Przepływ materiałów w tym przypadku zależy od portfela technologicznego firmy oraz stosowanych technologii. W tym obszarze występują głównie przepływy fizyczne (materialne), ponieważ wszystkie strumienie informacji docierające do komponentów obszaru 5 są traktowane przez przepływy występujące w obszarze 4. W obszarze 5 dodatkowo konieczne jest zbieranie informacji o działaniach dodających wartość (VA) i niedodających wartości (NVA) – jako elementy pełnego przepływu procesu (L/T – czas realizacji procesu). Obszar 5 w zasadzie może dostarczyć najwięcej informacji na temat możliwości technicznych, produktowych i organizacyjnych, a co więcej informacje tutaj zgromadzone mogą być podstawą do zmniejszenia marnotrawstwa bez strat dla poprawności procesu.

### 4.3. Mapowanie strumienia wartości dla procesu produkcji kompozytów wiązanych

Proces produkcji materiałów kompozytowych o właściwościach magnetycznych jest procesem bardzo złożonym i w zależności od specyfikacji zamówienia może ulegać licznym transformacjom. Ze względu na bardzo dużą zmienność procesu wytwórczego, kluczowym jest, aby system produkcyjny miał znamiona rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego (*Reconfigurable Manufacturing Systems* – RMS), czyli aby posiadał zalety zarówno produkcji seryjnej, jak i elastycznych systemów produkcyjnych. Zakładając, że przedsiębiorstwo wykonuje kompozyty magnetyczne na bazie



Rys. 4.7. Proces produkcji wiązanych materiałów magnetycznych z proszków magnetycznych w mikroorganizacyjnym ujęciu technologicznym

gotowych proszków, proces produkcyjny będzie przebiegał zgodnie ze schematem zaprezentowanym na Rys. 4.7.

Przebieg procesu produkcyjnego dla magnetycznych kompozytów na bazie proszków Nd-Fe-B zaprezentowany jest na Rys. 4.7 i przebiega zgodnie z harmonogramem:

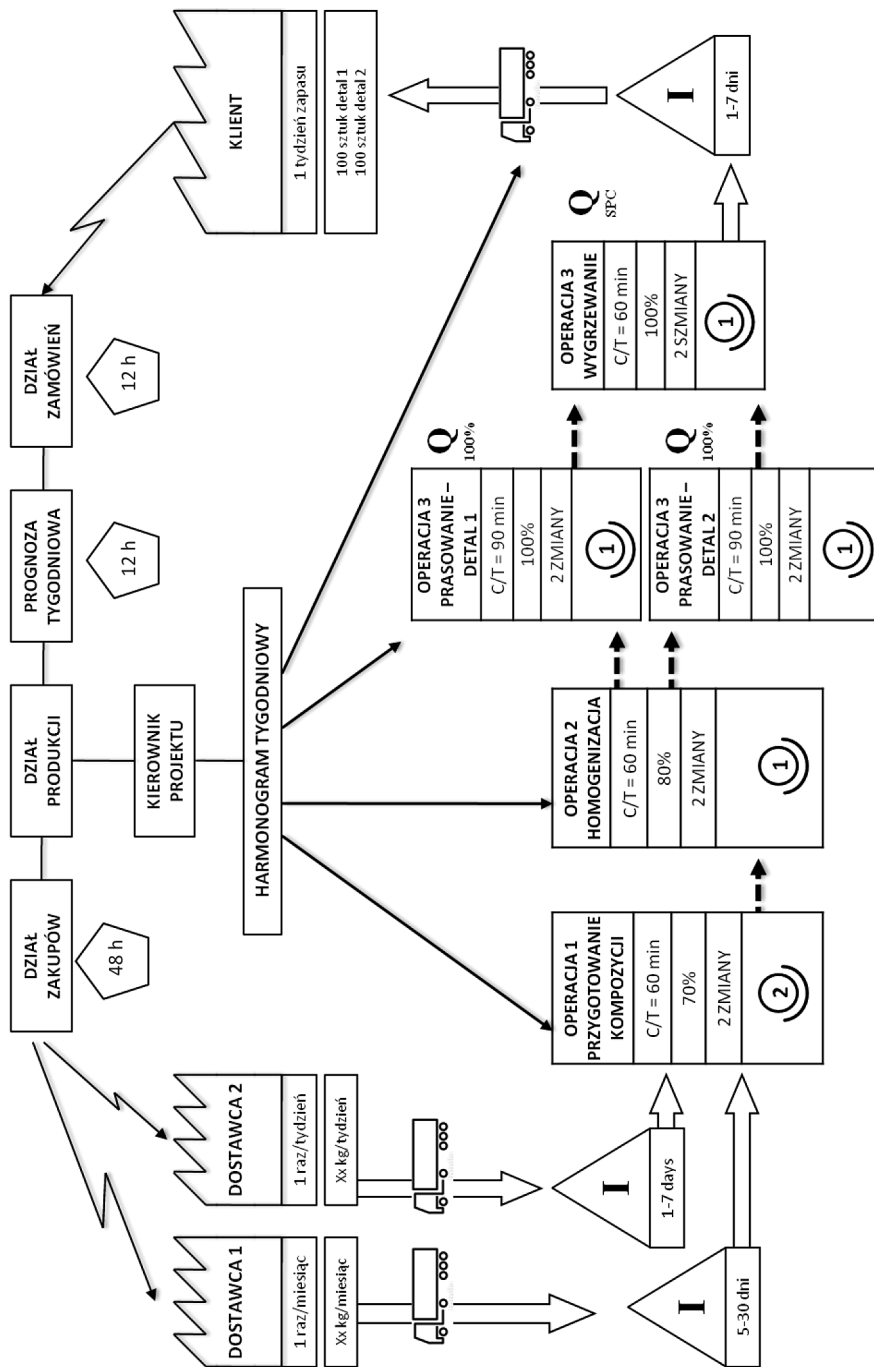
1. Magazynowanie proszków magnetycznych i proszków spoiwa.
2. Transport na halę produkcyjną.
3. Kontrola wejściowa często połączona z odsiewaniem odpowiedniej wielkości frakcji proszku.
4. Przygotowanie odpowiednich proporcji kompozycji proszków – przygotowanie proszku magnetycznego, proszku spoiwa oraz środków poślizgowych w odpowiednich proporcjach masowych.
5. Homogenizacja kompozycji proszkowej w mieszalnikach oscylacyjnych.
6. Transport międzywydziałowy.
7. Operacja prasowania jednoosiowego (manualne zasypywanie kompozycji proszkowych do matryc wielogniazdowych i prasowanie w prasach hydraulicznych).
8. Kontrola wzrokowa – kontrola stuprocentowa (na tym etapie wykrywane są detale niezgodne z wymaganiami, tj. rozwarstwione, spękane, które nie wykazują spójności mechanicznej).
9. Wyczekiwanie/odprężanie.
10. Transport międzyoperacyjny do suszarni.
11. Wyrzewanie gotowych wyprasek – w przypadku zastosowania termoutwardzalnej żywicy epoksydowej jest to wyrzewanie, które jest konieczne do usieciowania i utwardzenia materiału spoiwa. W przypadku spoiwa chemoutwardzalnego to czas przejścia reakcji chemicznych.
12. Kontrola jakości z wykorzystaniem badań niszczących zgodnie z założeniami planu kontroli i specyfiką SPC (w przypadku badań w tego typu procesach specjalnych mogą to być badania mikroskopowe, badania twardości, badania magnetyczne, odporność na działanie czynników atmosferycznych oraz ocena chropowatości próbek).
13. Transport międzywydziałowy – transport z hali produkcyjnej do magazynu wyrobów gotowych.
14. Przechowywanie w magazynie wyrobów gotowych – w zależności od rodzaju zamówienia może to być końcowy etap procesu i gotowe produkty wysyłane są do klienta lub etap pośredni przed przekazaniem detali do dalszego przetwarzania (np. pokrywania dodatkowymi warstwami ochronnymi).

Aby zapewnić odpowiednią zmienność procesu, należy zastosować jedno z wcześniej omówionych narzędzi *Lean*, które sprzyja planowaniu przepływów informacji i materiałów w całym cyklu produkcyjnym – począwszy od momentu przyjęcia zamówienia, poprzez proces planowania produkcji (zdefiniowanie potrzeb materiało-

wych, opracowanie harmonogramu, kwotacji itp.) oraz uruchomienie produkcji, cały przebieg procesu wytwórczego, kontrolę jakości aż do momentu wysyłki do klienta – narzędziem tym jest *Value Stream Design* (VSD). Zastosowanie VSD odnosi się do stworzenia mapy procesu w oparciu o projekt koncepcyjny systemu i procesu produkcyjnego, który obejmuje prócz zdefiniowanego zestawu parametrów, które odzwierciedlają potrzeby klienta, również sekwencję czynności w cyklu produkcyjnym (w oparciu o harmonogram procesu). Planowanie przepływu strumieni wartości (VSD) wymaga również analizy różnych scenariuszy oraz opracowanie ewentualnych specyfikacji wymagań, w tym wymagań dotyczących zmienności procesu.

Na Rys. 4.8 zaprezentowano mapę procesu w odniesieniu do *Value Stream Design* dla procesu (systemu) produkcyjnego kompozytów magnetycznych na bazie pierwiastków ziem rzadkich – kompozyt Nd-Fe-B/żywica epoksydowa. Założono cotygodniowe zamówienia klienta, zamówienie odnosi się do dwóch rodzajów detalu. Detal 1 i 2 stanowią jedną grupę produktów, a różnią się od siebie jedynie parametrami wymiarowymi gotowych magnesów. Pomimo że detale te wykonane są z tej samej mieszanki kompozytowej, ich różne wymiary wymuszają zastosowanie różnych matryc podczas procesu prasowania – operacja 3 (prasowanie) przebiega na dwóch stanowiskach równolegle. Zamówienie klienta po zaakceptowaniu do przyjęcia i realizacji podlega przetwarzaniu w obszarze 2 (identyfikacja przepływów informacji), gdzie opracowane są plany produkcji, prognozy dostaw materiałów do produkcji oraz wstępnie opracowane harmonogramy produkcji.

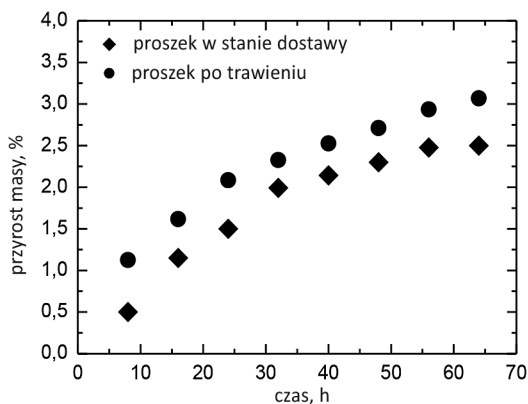
Na projekcie przepływów strumieni wartości uwzględniono dwóch dostawców materiałów podstawowych, przy czym proszki magnetyczne (zazwyczaj dostarczane przez wysoko wyspecjalizowanych producentów np. General Motors, Magnequench itp.) dostarczane są raz w miesiącu, natomiast ogólnodostępne żywice epoksydowe raz w tygodniu. Tak zaplanowane terminy dostaw komponentów determinują magazynowanie surowców i o ile składowanie materiału polimerowego (żywicy epoksydowej) nie stawia specjalnych wymagań co do warunków przechowywania, o tyle składowanie proszków magnetycznych na bazie stopu zawierającego metale ziem rzadkich musi przebiegać w warunkach specjalnych. Wcześniej wspomniana wysoka aktywność elektrochemiczna metali z grupy aktywnowców sprawia, że materiały zawierające Nd, Dy czy Sm powinny być przechowywane w atmosferze ochronnej. Zwyczajowo w hermetycznych opakowaniach wypełnionych gazem inertnym (np. argonem). Takie zabezpieczenia stanowią ograniczenie dla dostępu tlenu i wilgoci. Nieprzebrnięcie warunków przechowywania może w konsekwencji prowadzić do znacznego marnotrawstwa w zakresie strat materiałowym, gdyż proszek już przed rozpoczęciem produkcji nie będzie spełniał wymagań technicznych (kontrola wejściowa). Utlenianie powierzchni proszku następuje zarówno na etapie samego przygotowania kompozycji proszkowych, jak i utwardzania gotowych wyprasek w temperaturach ok. 150–200°C. Dodatkowo porowatość tych materiałów, przekra-



Rys. 4.8. Analiza Big Picture na podstawie projektu Value Stream Design dla procesu (systemu) produkcyjnego kompozytów magnetycznych na bazie pierwiastków ziem rzadkich – kompozyt Nd-Fe-B/żywica epoksydowa

czająca 10%, w tym również obecność porów otwartych, sprzyja degradacji fazy ferromagnetycznej odpowiedzialnej za unikalne parametry magnetyczne tych materiałów. Zawartość tlenków w strukturze fazowej materiału sproszkowanego może być przyczyną pogorszenia nie tylko właściwości magnetycznych wyrobu, ale również innych parametrów eksploatacyjnych.

Na podstawie zgromadzonych wcześniej informacji oraz licznych badań w zakresie rozwoju technologii poszukiwano metod, które po pierwsze umożliwią przywrócenie pierwotnych cech materiału, a po drugie będą zapobiegały powierzchniowemu utlenianiu proszków na bazie Nd-Fe-B. Rozwiązaniem dla proszków już powierzchniowo utlenionych okazuje się być technika wstępnego przygotowania powierzchni poprzez trawienie cząstek proszku w wodnych roztworach słabych kwasów organicznych lub też w roztworach związków kompleksujących – metoda szeroko opisana i przeanalizowana przez Klimecką-Tatar [216]. Na Rys. 4.9 przedstawiono kinetykę zmian masy proszku w stanie dostawy oraz proszku po wstępnym trawieniu powierzchni cząstek w wodnym roztworze kwasu szczawiowego podczas wygrzewania w atmosferze powietrza, w temperaturze 250°C. Po 64 godzinach wygrzewania przyrost masy proszku w stanie dostawy wynosi 2,5%, podczas gdy proszku po wstępnym trawieniu powierzchni 3,1%. Równoległy przebieg krzywych wskazuje na to, że szybkość utleniania w czasie jest dla obu typów proszków jednakowa, a mniejszy procentowy przyrost masy proszku w stanie dostawy może być efektem izolującego działania naturalnej warstwy tlenkowej na jego powierzchni.



Rys. 4.9. Przyrost masy proszku Nd-Fe,Co-B w funkcji czasu wygrzewania w atmosferze powietrza, w temperaturze 250°C

Samo wytrawienie powierzchni cząstek proszku nie gwarantuje zatem, że powierzchnia nie ulegnie ponownemu utlenieniu, dlatego metoda ta została poszerzona o proces tzw. enkapsulacji (lub mikroenkapsulacji) z wykorzystaniem materiału spoiwa. W celu odizolowania pojedynczych cząstek proszku zaproponowano zasto-

sowanie acetonowego roztworu żywicy termoutwardzalnej. Dzięki takiej modyfikacji procesu możliwa również była poprawa homogenizacji materiałów w kompozycji proszkowej oraz wyeliminowanie środków poślizgowych. Słabą stroną tego etapu był fakt, że po odparowaniu rozpuszczalnika tworzyły się aglomeraty proszków, a powierzchnia cząstek nie była w nich równomiernie zabezpieczona. Wykorzystanie roztworów acetonowych do enkapsulacji cząstek proszków bezwzględnie wymaga również zmian technicznych procesu. Dalsze badania w zakresie innowacyjnych procesów zapobiegania utleniania powierzchni cząstek proszków nakierowane były na wytworzenie podwójnej bariery ochronnej na cząstkach proszków – poszukiwanie optymalnych parametrów dla procesów bienkapsulacji. Zatem ogólna koncepcja przebudowy procesu obejmowała dodanie operacji przygotowawczych (trawienie proszków), zabezpieczających (enkapsulacja lub bienkapsulacja) oraz modyfikacji w zakresie technicznych elementów procesu.



## 5. KREOWANIE INNOWACJI PRODUKTOWEJ I PROCESOWEJ W BRANŻY KOMPOZYTÓW MAGNETYCZNYCH NA BAZIE PROSZKÓW Nd-Fe,Co-B

Wobec intensywnego rozwoju przemysłu od przedsiębiorstw produkcyjnych wymaga się nieco więcej niż tylko dodatniego wyniku ekonomicznego. Świadomość klientów i konsumentów wymusza na przedsiębiorcach budowanie swojej konkurencyjności na bazie aktywności innowacyjnej. W ramach doskonalenia istniejących procesów produkcyjnych działalność innowacyjna opiera się na tworzeniu projektu koncepcyjnego, który w pierwszej kolejności może opierać się na tworzeniu innowacji produktowej, a w konsekwencji zmian w produkcie wymusza wprowadzenie również innowacji procesowej. Innowacyjność produktowa odnosi się do zwiększenia asortymentu, rozwoju produktu lub też poprawy jakości istniejącego już produktu. Natomiast fundamentami innowacyjności procesowej są: poprawa efektywności i produktywności, zwiększenie elastyczności (zmienności) procesu wobec szybkiej reakcji na potrzeby rynku oraz ograniczenie kosztochłonności.

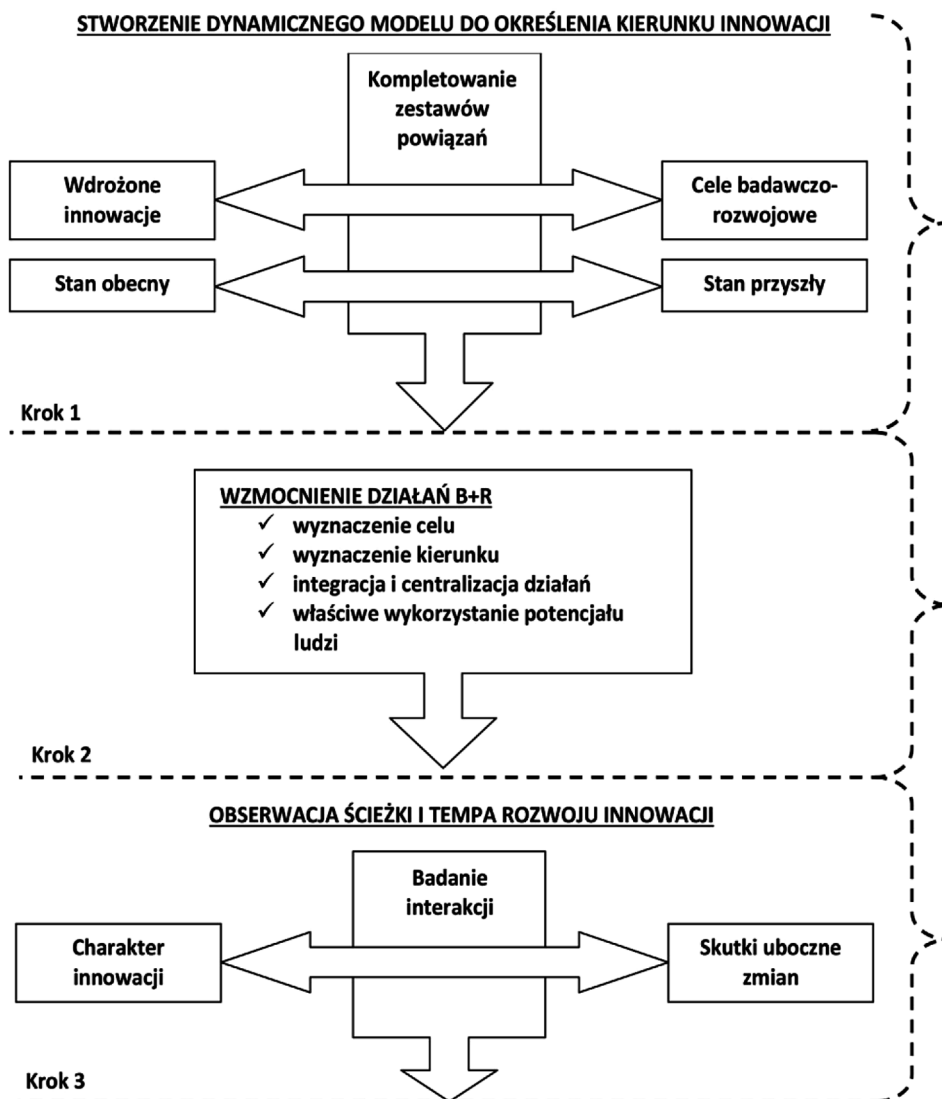
Aktywizacja badań w zakresie innowacyjności jest ważnym elementem doskonalenia każdego systemu produkcyjnego, w szczególności w odniesieniu do poprawy produktywności i konkurencyjności. Na tym etapie wykorzystywane są modele doskonalenia i instrumenty zarządzania jakością.

Strategia innowacyjności powinna mieć na celu stawianie dużego nacisku na badania i rozwój, poszerzanie wiedzy i transfery technologii. Zazwyczaj wdrażanie innowacji jest obciążone dużym ryzykiem, dlatego należy koncentrować się na przekraczaniu barier pojawiających się na etapie wdrażania innowacyjnych rozwiązań, a kierunek działań innowacyjnych należy wskazywać na drodze trzech kroków (Rys. 5.1).

Pierwszym krokiem w dążeniu do tworzenia rozwiązań innowacyjnych oraz nadaniu kierunku innowacji jest konstrukcja modelu koncepcyjnego z nieograniczonymi powiązaniem między innowacjami już wdrożonymi a elementami przyszłych celów badawczych. Drugi krok opiera się na wzmocnieniu działań w obszarze badań i rozwoju (B+R) poprzez promowanie projektów innowacyjnych z wewnętrznym rozproszeniem kierunkowości działań, których efektem są wyniki badań i testów o charakterze interdyscyplinarnym. Krok ostatni odnosi się do bilansowania zysków i strat wobec wdrożenia innowacji – obserwacji i trudności interakcji pomiędzy charakterem potencjalnych innowacji a skutkami ubocznymi wewnątrz organizacji.



Zatem trzeci etap w rozwoju innowacji wymusza opracowanie szczegółowego projektu systemu produkcyjnego wraz ze specyfikacją wobec potencjalnych zmian w jego organizacji. Wyboru najbardziej odpowiednich koncepcji systemu produkcyjnego dokonuje się na podstawie zestawu kryteriów oceny innowacyjnych rozwiązań. Zaktualizowanie innowacji do uruchomienia komercyjnego jest (podobnie jak w cyklu PDCA) punktem wyjścia do poszukiwania nowych rozwiązań innowacyjnych.



Rys. 5.1. Ogólny schemat działań innowacyjnych – w trzech krokach

Na podstawie zgromadzonego zestawu informacji na temat technologii produkcji i właściwości kompozytów magnetycznych oraz kryteriów jakości określonych jako: techniczne, ekonomiczne i organizacyjne, jak również na podstawie przeprowadzonej analizy procesu łatwo wytypować kierunki rozwoju innowacji produktowej i procesowej. Kierunki te łatwo zdefiniować na podstawie celów szczegółowych dalszych badań:

1. Zmniejszyć straty materiałowe (ograniczyć marnotrawstwo) w obszarze składowania i magazynowania.
2. Zminimalizować utlenianie się proszków magnetycznych na etapie magazynowania i przetwarzania – zastosować wieloetapowy układ zabezpieczeń.
3. Zwiększyć homogenizację kompozycji proszkowej.
4. Ograniczyć degradację materiału kompozytowego podczas eksploatacji (bez zmiany obszaru zastosowania).
5. Wprowadzić zmiany bez straty dla najważniejszych właściwości, czyli właściwości magnetycznych.

W odniesieniu do ww. celów przeprowadzono liczne badania, których priorytetem był rozwój nowego produktu – nowego kompozytu magnetycznego na bazie proszku zawierającego pierwiastki ziem rzadkich. W odniesieniu do projektu koncepcyjnego, który w pierwszej kolejności opierał się na tworzeniu innowacji produktowej (wytworzenie nowego kompozytu magnetycznego na bazie proszków Nd-Fe-B po procesie enkapsulacji lub bienkapsulacji), w konsekwencji oparł się na innowacji procesowej (wprowadzenie urządzenia wspomagającego proces enkapsulacji i odparowania rozpuszczalnika).

Badaniom zostały poddane materiały wykonane z proszków otrzymywanych metodą szybkiego chłodzenia stopu ze stanu ciekłego, spajane przy pomocy żywicy epoksydowej. W planie badań i rozwoju nowej technologii powierzchnia cząstek proszku została poddana chemicznej modyfikacji powierzchni, polegającej na wytrawianiu nalotów tlenkowych zgodnie z parametrami zaproponowanymi w pracy [216] oraz zastosowaniu dwóch metod ochrony metalicznej powierzchni proszku za pomocą enkapsulacji i bienkapsulacji.

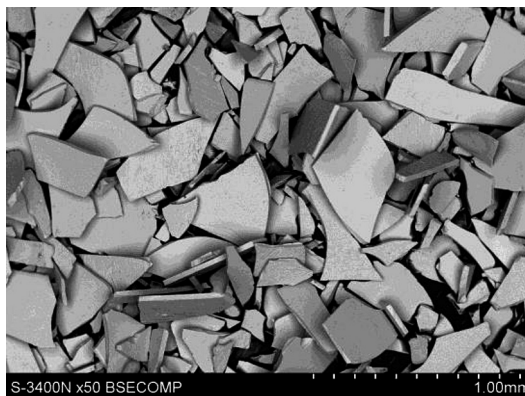
Enkapsulacja cząstek proszku polega na pokryciu ich powierzchni cienką powłoką spoiwa z wykorzystaniem acetonowych roztworów żywicy epoksydowej (w tym celu wykorzystano termoutwardzalną żywicę epoksydową, której utwardzenie następuje poprzez aktywację termiczną). Natomiast bienkapsulacja cząstek proszku to pokrywanie ich powierzchni dwoma cienkimi powłokami ochronnymi. Przyjęto, że pierwszą z tych powłok może być powłoka metaliczna lub fosforanowa powłoka konwersyjna (powłoki nanoszone metodami zanurzeniowymi lub metodami autokatalicznymi w roztworach o odpowiednio opracowanych składach).

Naniesienia na powierzchnię cząstki proszku szczelnej powłoki ochronnej (enkapsulacja lub bienkapsulacja) umożliwia znaczne ograniczenie strat materiałowych

na wszystkich etapach procesu produkcyjnego. Powłoki tego typu mają na celu zabezpieczenie powierzchni metalu przed intensywnym utlenianiem podczas operacji technologicznych. Zwiększają homogenizację i równomierne rozprowadzenie materiału spoiwa w objętości kompozytu magnetycznego. W pewnym stopniu ograniczają uszkodzenia mechaniczne na wszystkich etapach procesu produkcyjnego, a finalnie sprzyjają hamowaniu procesów korozyjnych gotowych materiałów. Zatem efektem działań innowacyjnych będzie wytypowanie optymalnych parametrów wytwarzania dwuwarstwowych powłok ochronnych na powierzchni pojedynczych cząstek proszków magnetycznych oraz określenie wpływu stosowanych metod technologicznych na właściwości użytkowe (właściwości magnetyczne, mechaniczne i odporność korozyjną) wiązanych i prasowanych materiałów magnetycznie twardych typu Nd-Fe-B.

### 5.1. Opracowanie parametrów wytwarzania powłok ochronnych na powierzchni cząstek proszku ze stopu RE-M-B

Do przygotowania serii materiałów testowych wykorzystano proszek magnetyczny o formule chemicznej  $Nd_{12}Fe_{77}Co_5B_6$  (indeksy dolne oznaczają procenty atomowe). Proszek ten otrzymywany jest metodą szybkiego chłodzenia stopu ze stanu ciekłego i poddawany mechanicznemu rozdrobnieniu. Ze względu na stosowaną technologię przygotowania cząstki proszku mają kształt nieregularnych blaszek o średniej wielkości 200  $\mu m$  (Rys. 5.2).



Rys. 5.2. Obraz BS-SEM cząstek proszku magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B

Proces nakładania powłok ochronnych składał się z kilku niezależnych etapów. W pierwszej kolejności konieczne było przygotowanie powierzchni cząstek proszku magnetycznego (wytrawienie). Miało ono na celu usunięcie warstw tlenkowych z powierzchni cząstek proszku poprzez ich ekspozycję w 5% wodnym roztworze kwasu

szczawiowego, a następnie płukanie i suszenie. Drugi etap procesu polegał (w zależności od rodzaju nakładanej powłoki) na zanurzeniu proszku w kąpielach zawierających odpowiednie sole lub kompleksy metali, z których ma być wykonana powłoka. Równolegle poszukiwano najbardziej optymalnych parametrów technologii procesu bienkapsulacji z wykorzystaniem trzech typów powłok:

- Proces enkapsulacji proszku powłokami Ni-P przeprowadzono w kąpeli zawierającej w swym składzie  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  oraz cytrynian sodu, w temperaturze  $90^\circ\text{C}$  w czasie 5, 15 i 30 minut;
- Proces enkapsulacji proszku konwersyjnymi powłokami fosforanowymi przeprowadzono w roztworach zawierających jony fosforanowe, zastosowano dwa warianty enkapsulacji w roztworze fosforanowym zakwaszonym do  $\text{pH} = 3$ , oraz w roztworze o  $\text{pH} = 7$ . Czas nanoszenia warstwy wynosił 72 h, a temperatura procesu  $20^\circ\text{C}$ ;
- Proces enkapsulacji proszku powłokami Cu przeprowadzono w kąpeli zawierającej w swym składzie  $5 \text{ g/dm}^3 \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , w temperaturze  $25^\circ\text{C}$  w czasie 1 i 5 minut.

Druga z powłok w technologii bienkapsulacji to podobnie jak w technologii enkapsulacji cienka powłoka materiału spoiwa. Efekt bienkapsulacji cząstek proszku uzyskiwano dzięki zastosowaniu acetonowego roztworu termoutwardzalnej żywicy epoksydowej, która po odparowaniu rozpuszczalnika równomiernie pokrywała powierzchnię cząstek. Zawartość spoiwa w kompozycji (po odparowaniu acetonu) wynosiła 3% mas. Zgodnie z danymi literaturowymi [217], by nadać odpowiedni kształt próbkom, kompozycje proszkowe prasowano przy ciśnieniu 800 MPa, a następnie wypraski wygrzewano w temperaturze  $180^\circ\text{C}$  przez 2 h w celu utwardzenia żywicy.

Po takich procesach zakłada się, że każda cząstka magnetyczna jest izolowana dwuwarstwowo, tj. warstwą powłoki ochronnej i szczelną warstwą żywicy (materiału spajającego). W Tabeli 5.1 zaprezentowano parametry procesów nanoszenia powłok ochronnych, które zostały poddane dalszej analizie w rozwoju innowacji produktywnej i procesowej.

Zgodnie z założeniem projektu koncepcyjnego zmodyfikowano proces produkcji magnesów wiązanych poprzez dodanie czterech dodatkowych operacji:

- 1) wstępne trawienie powierzchni cząstek proszku,
- 2) pokrywanie cząstek proszku powłokami ochronnymi,
- 3) mieszanie cząstek proszku z materiałem spoiwa w postaci acetonowego roztworu,
- 4) suszenie i odparowanie rozpuszczalnika.

Zatem proces produkcji wiązanych materiałów magnetycznych z proszków po bienkapsulacji będzie przebiegał zgodnie z harmonogramem procesu:

1. Przechowywanie czystych metali;
2. Transport;

Tabela 5.1

Oznaczenie i parametry procesu enkapsulacji cząstek proszku magnetycznego		
Seria	Oznaczenie	Sposób przygotowania zabezpieczenia powierzchni cząstek proszku magnetycznego – powłoka ochronna na powierzchni cząstek proszku magnetycznego
0		żywica epoksydowa
I	Ni-P (5 min)/żywica epoksydowa	Ni-P (roztwór A*, czas ekspozycji $t = 5$ min., $T = 90^{\circ}\text{C}$ ) i żywica epoksydowa
	Ni-P (15 min)/żywica epoksydowa	Ni-P (roztwór A*, $t = 15$ min., $T = 90^{\circ}\text{C}$ ) i żywica epoksydowa
	Ni-P (30 min)/żywica epoksydowa	Ni-P (roztwór A*, $t = 30$ min., $T = 90^{\circ}\text{C}$ ) i żywica epoksydowa
II	Fosf (pH = 3)/żywica epoksydowa	fosforanowa (roztwór fosforanowy pH = 3, $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) i żywica epoksydowa
	Fosf (pH = 7)/żywica epoksydowa	fosforanowa (roztwór fosforanowy pH = 7, $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) i żywica epoksydowa
III	Cu (1 min)/żywica epoksydowa	Cu (roztwór B**, $t = 1$ min., $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) i żywica epoksydowa
	Cu (5 min)/żywica epoksydowa	Cu (roztwór B**, $t = 5$ min., $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) i żywica epoksydowa

\* Roztwór A: wodny roztwór  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , cytrynian sodu;

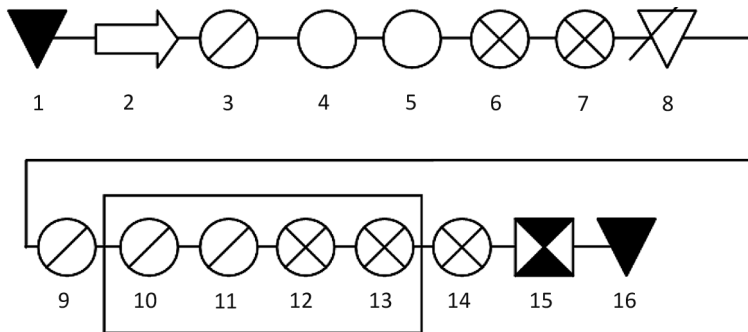
\*\* Roztwór B: wodny roztwór  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ .

3. Przygotowanie odpowiednich proporcji proszków Nd, Fe, and  $\text{Fe}_2\text{B}$ ;
4. Indukcyjne przetopienie proszków;
5. Odlewanie na wirujący bęben;
6. Mechaniczne rozdrobnienie taśm amorficznych;
7. Obróbka cieplna (wygrzewanie) proszku;
8. Wyczekiwanie międzyoperacyjne;
9. Przygotowanie kompozycji proszkowych;
10. Wstępne trawienie powierzchni cząstek proszku;
11. Pokrywanie cząstek proszku powłokami Ni-P, fosforanowymi, Cu (enkapsulacja – etap 1);
12. Pokrywanie cząstek proszku cienką warstwą spoiwa (enkapsulacja – etap 2);
13. Prasowanie i utwardzanie żywicy;
14. Magnesowanie;

15. Kontrola jakości;

16. Magazynowanie.

Przebieg procesu w mikroorganizacyjnym ujęciu technologicznym przedstawiony został na Rys. 5.3.

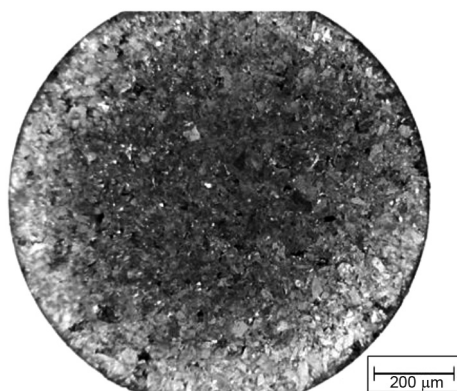


Rys. 5.3. Proces produkcji wiązanych materiałów magnetycznych z proszków po bienkapsulacji w mikroorganizacyjnym ujęciu technologicznym: 1. Przechowywanie czystych metali; 2. Transport; 3. Przygotowanie odpowiednich proporcji proszków Nd, Fe i  $Fe_2B$ ; 4. Indukcyjne przetopienie proszków; 5. Odlewanie na wirujący bęben; 6. Mechaniczne rozdrobnienie taśm amorficznych; 7. Obróbka cieplna (wygrzewanie) proszku; 8. Wyczekiwanie międzyoperacyjne; 9. Przygotowanie kompozycji proszkowych; 10. Wstępne trawienie powierzchni cząstek proszku; 11. Pokrywanie cząstek proszku powłokami Ni-P, fosforanowymi, Cu (enkapsulacja – etap 1); 12. Pokrywanie cząstek proszku cienką warstwą spoiwa (enkapsulacja – etap 2); 13. Prasowanie i utwardzanie żywicy; 14. Magnesowanie; 15. Kontrola jakości; 16. Magazynowanie [218]

Aby potwierdzić zasadność przeprowadzonych zmian w przebiegu procesu, konieczne jest zaprezentowanie zestawu badań potwierdzających korzystne działanie nowych operacji technologicznych na właściwości eksploatacyjne wyrobów gotowych, jakim są kompozyty magnetyczne na bazie proszku Nd-Fe,Co-B ( $Nd_{12}Fe_{77}Co_5B_6$ ). Po przeprowadzeniu procesu zgodnie z zaprezentowanym schematem produkcji wiązanych materiałów magnetycznych przeprowadzono kontrolę wzrokową/wizualną, na podstawie której stwierdzono, że na powierzchni magnesów wyraźnie widać metaliczne cząstki z umiejscowioną w przestrzeniach żywicą. Niemniej jednak charakterystyczny dla tego typu kompozytów jest fakt, że na powierzchni obecne są również liczne pory otwarte, pęknięcia i szczeliny (Rys. 5.4).

Kontrola wzrokowa jest najczęstszym wariantem alternatywnej kontroli produktu, w którym produkt jest klasyfikowany na podstawie jednej z dwóch (OK, nOK) lub kilku kategorii jakości [219, 220]. Głównym celem kontroli wizualnej jest zapewnienie, że produkt będzie wolny od niezgodności i wad, gdy zostanie przekazany do następnych etapów procesu lub do użytkownika. Warunkiem skuteczności kontroli wizualnej jest znajomość błędów i niezgodności jakie powodują ich rodzaje,

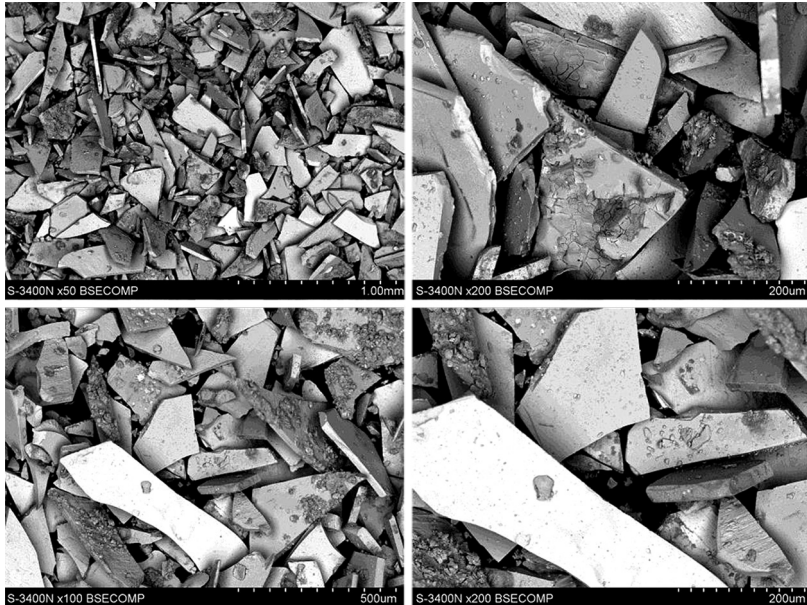
że produkt jest uważany za niezgodny. Kontrola wizualna jest zaliczana do działań ekonomicznie opłacalnych, gdyż jest metodą nieniszczącą. Należy jednak pamiętać o jej słabych stronach – na jej podstawie bardzo trudno określić zgodność wyrobów ze wszystkimi kryteriami jakościowymi – w szczególności gdy proces ma znamiona procesu specjalnego, jak ma to miejsce w procesie produkcji kompozytowych magnesów wiązanych na bazie proszku Nd-Fe,Co-B po bienkapsulacji. W przypadku badań i rozwoju omawianej technologii, prócz obserwacji powierzchni i badań mikroskopowych, zastosowano również szereg testów specjalistycznych, które na poziomie B+R wskazują, czy założenia projektu koncepcyjnego są słuszne.



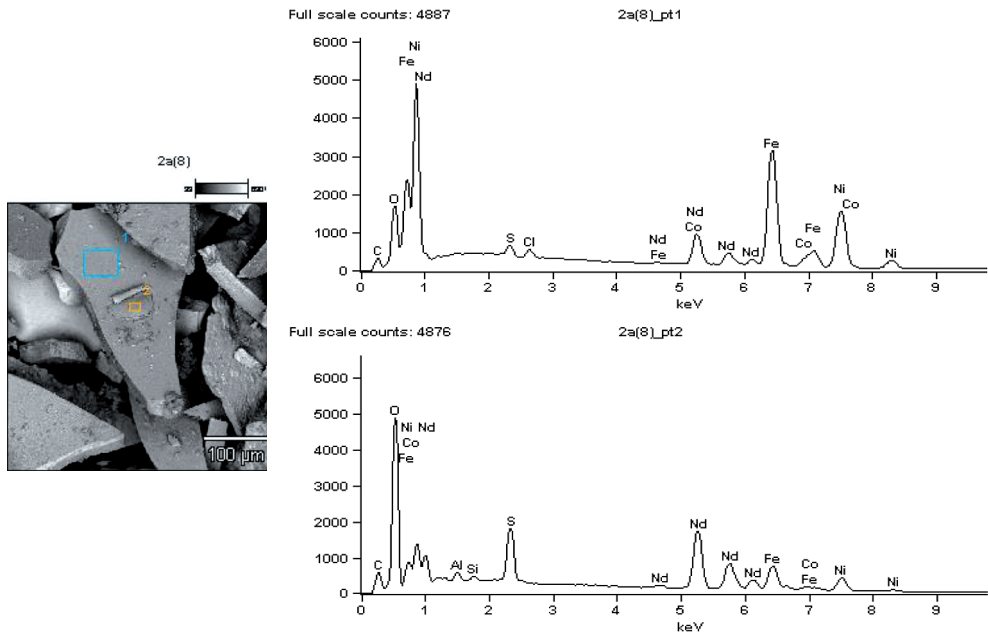
Rys. 5.4 Powierzchnia magnesu wiązanego wykonanego z proszku  $\text{Nd}_{12}\text{Fe}_{77}\text{Co}_5\text{B}_6$

Obserwacjom mikroskopowym poddano reprezentatywne proszki z trzech serii badawczych: dla serii I wytypowano próbkę uzyskaną z proszku po enkapsulacji powłoką Ni-P (30 min), dla serii II próbkę uzyskaną z proszku po enkapsulacji powłoką fosforanową (pH = 3) oraz dla serii III próbkę uzyskaną z proszku po enkapsulacji powłoką Cu (5 min). Wybrane materiały wykazywały optymalne właściwości ochronne w swoich grupach. Na Rys. 5.5. przedstawiono obraz powierzchni cząstek proszku Nd-Fe,Co-B po enkapsulacji powłoką Ni-P w czasie 30-minutowej kąpieli w roztworze.

Na podstawie przedstawionych obrazów można stwierdzić, że cała powierzchnia proszku jest szczelnie pokryta powłoką (powłoka Ni-P), miejscami widoczne są zaledwie niewielkie pęknięcia, jednakże powłoka nie ulega łuszczeniu się i wykruszaniu. Jak wynika z zaprezentowanej na Rys. 5.6 i w Tabeli 5.2 analizy składu chemicznego wybranych obszarów powierzchni proszku, pojawienie się niewielkich obszarów nieciągłości powłoki nie stanowi zagrożenia korozyjnego, gdyż powłoka Ni-P (30 min) ma charakter wielowarstwowy i nawet w obszarach nieciągłości wykryto obecność pierwiastków chemicznych powłoki, które nie wchodzą do podstawowego składu chemicznego stopu Nd-Fe,Co-B.



Rys. 5.5. Cząstki proszku Nd-Fe,Co-B pokryte powłoką Ni-P (30 min)



Rys. 5.6. Analiza składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego powłoką Ni-P (30 min)



Tabela 5.2

Wyniki pomiarów składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego powłoką Ni-P (30 min)

mas. %

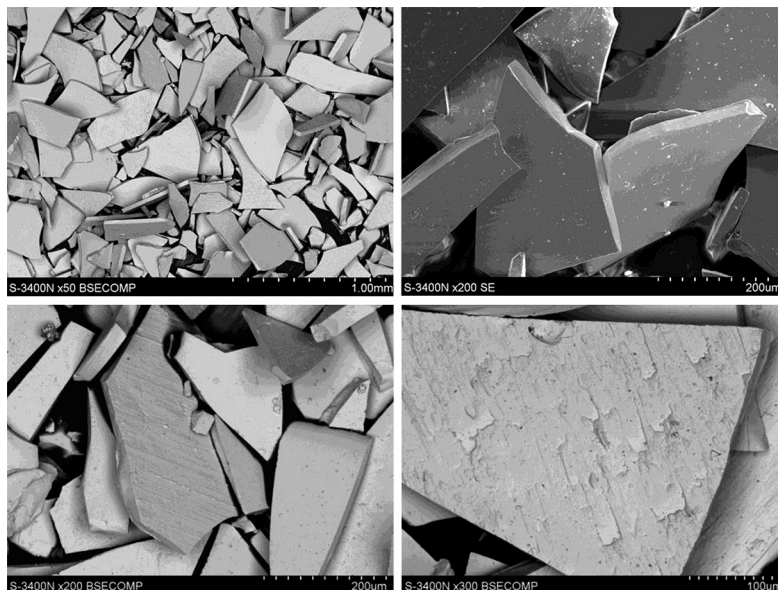
	Al-K	Si-K	S-K	Cl-K	Fe-K	Co-K	Ni-K	Nd-L
2a(8)_pt1			0,7	0,7	43,5	2,9	38,5	13,7
2a(8)_pt2	1,1	0,6	8,6		17,7	2,3	15,8	53,9

at. %

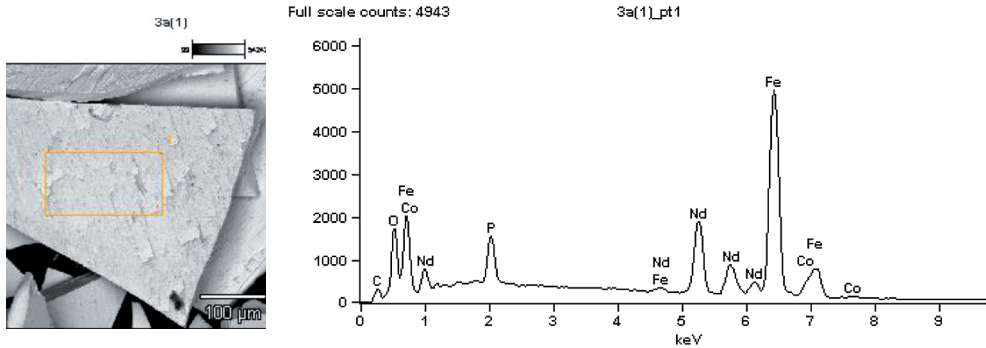
	Al-K	Si-K	S-K	Cl-K	Fe-K	Co-K	Ni-K	Nd-L
2a(8)_pt1			1,4	1,2	48,0	3,0	40,5	5,9
2a(8)_pt2	3,2	1,7	20,2		23,8	2,9	20,2	28,1

Na kolejnych rysunkach (Rys. 5.7 i 5.8) i w Tabeli 5.3 zaprezentowano obrazy powierzchni oraz analizę chemiczną składników powierzchni cząstek proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego konwersyjną powłoką fosforanową (uzyskaną w roztworze fosforanowym zakwaszonym do pH = 3).

Na podstawie obserwacji powierzchni i dzięki zaprezentowanej analizie składu chemicznego powłoki stwierdzono, że konwersyjna warstwa fosforanowa całkowicie pokrywa powierzchnię cząstek proszku, a w efekcie stanowi szczelną barierę dla czynników zewnętrznych.



Rys. 5.7. Cząstki proszku Nd-Fe,Co-B pokryte powłoką fosforanową (pH = 3)



Rys. 5.8. Analiza składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego powłoką fosforanową (pH = 3)

Tabela 5.3

Wyniki pomiarów składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego powłoką fosforanową (pH = 3)

mas. %

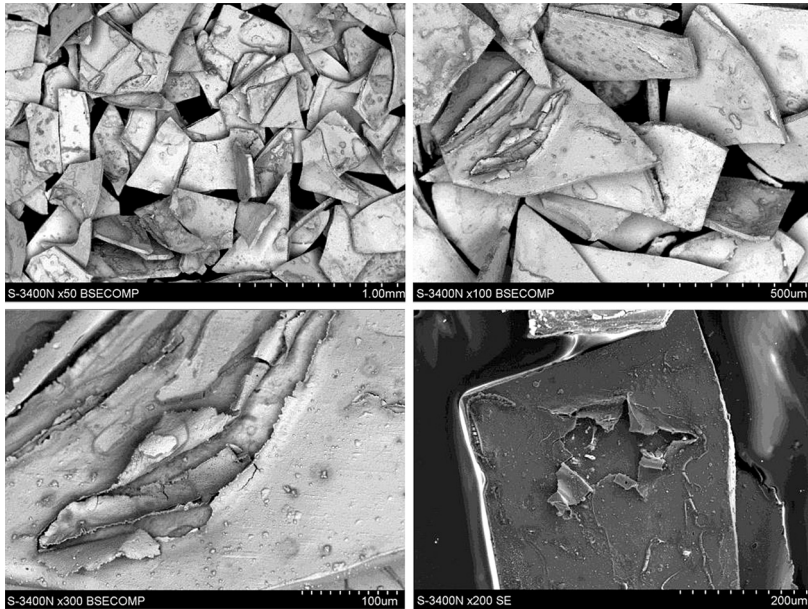
	P-K	Fe-K	Co-K	Nd-L
<b>3a(1)_pt1</b>	2,9	66,5	3,1	27,5

at. %

	P-K	Fe-K	Co-K	Nd-L
<b>3a(1)_pt1</b>	6,1	78,0	3,4	12,5

Obrazy powierzchni oraz analizę chemiczną składu cząstek proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego warstwą Cu, wytworzoną podczas 5-minutowej kąpieli miedziującej zaprezentowano na Rys. 5.9 i 5.10, a dane przedstawiono w Tabeli 5.4. Porównując tę powłokę z obrazami powierzchni powłoki Ni-P oraz powłoki fosforanowej, stwierdzono, że powłoka Cu charakteryzuje się najmniejszą szczelnością. Na powierzchni większości cząstek proszków widoczne są liczne nieciągłości i pęknięcia. Powłoka metaliczna, która miała stanowić barierę ochronną dla stopu Nd-Fe,Co-B wyraźnie się „łuszczy”.

W miejscach nieciągłości powłoki Cu odkryta została powierzchnia materiału Nd-(Fe, Co)-B (Rys. 5.9-5.11), przez co enkapsulacja powłokami Cu nie zapewnia efektywnej ochrony przed działaniem czynników korozyjnych. Ponadto różnica potencjałów elektrochemicznych proszku Nd-Fe,Co-B oraz miedzi może przyczynić się do powstania mikroogniwi korozyjnych w kontakcie ze środowiskiem, a tym samym do zwiększenia wrażliwości materiałów na działanie mediów korozyjnych.



Rys. 5.9. Cząstki proszku Nd-Fe,Co-B pokryte powłoką Cu (5 min)

Tabela 5.4

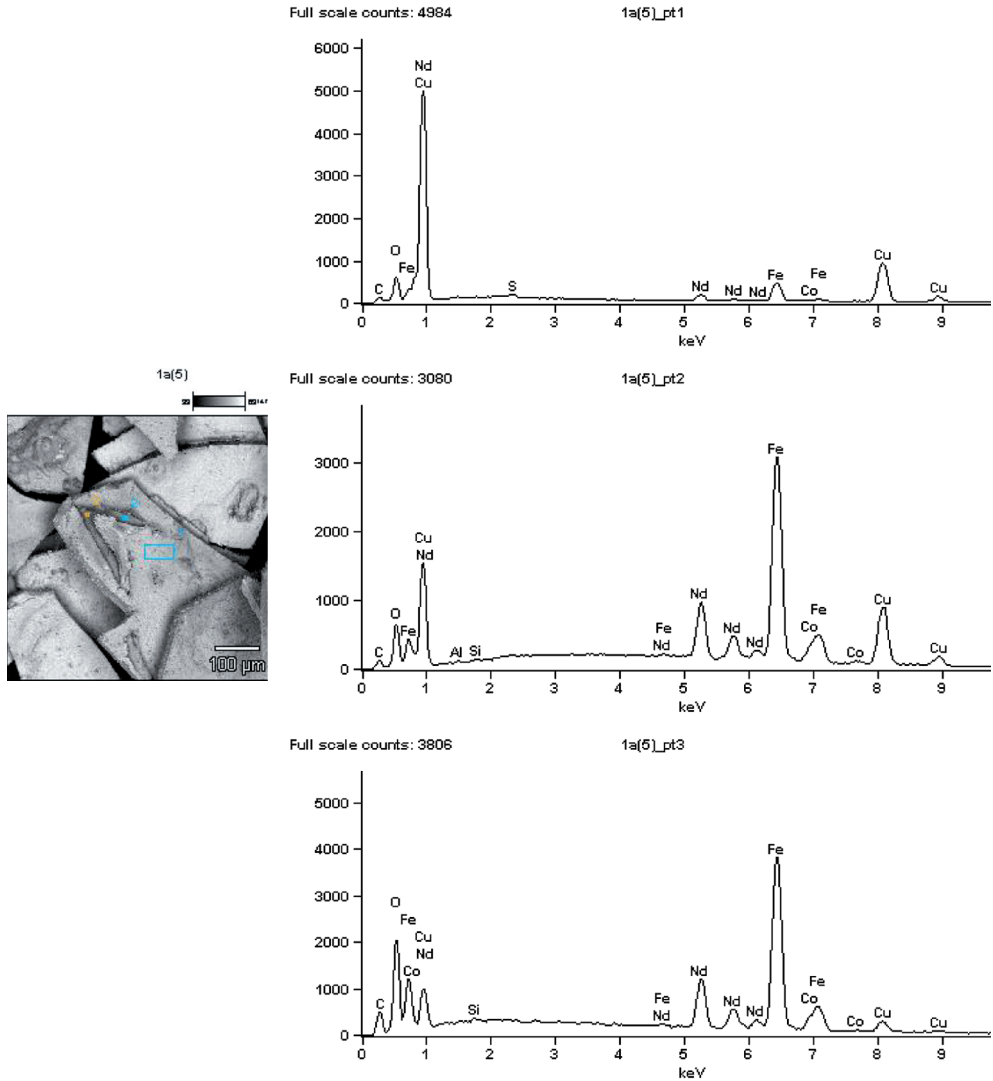
Wyniki pomiarów składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego powłoką Cu (5 min)

mas. %

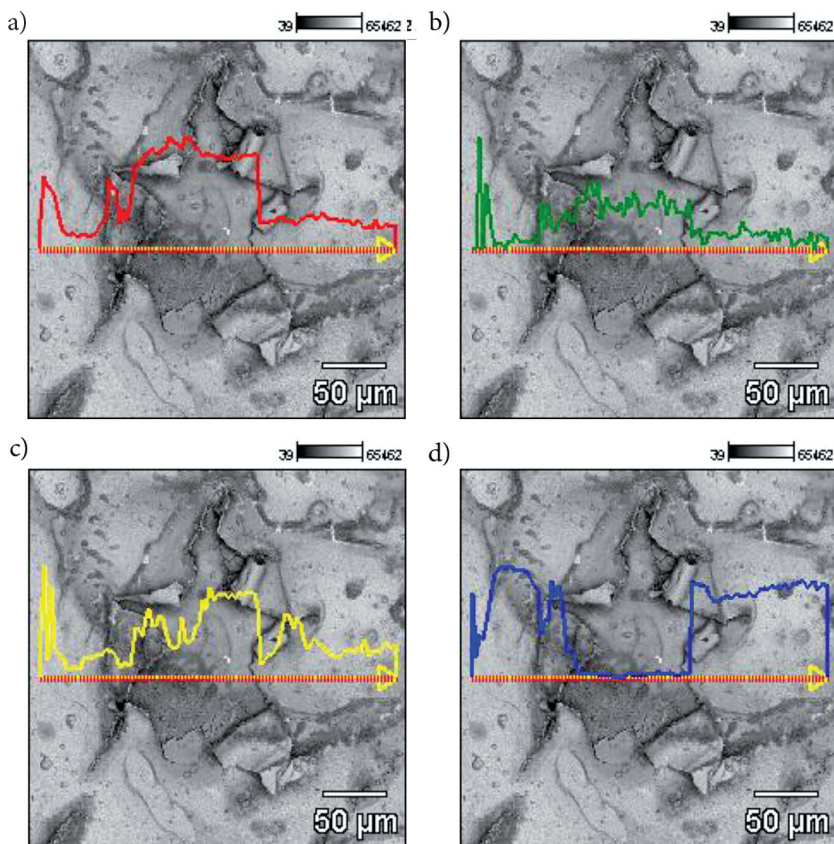
	Al-K	Si-K	S-K	Fe-K	Co-K	Cu-K	Nd-L
1a(5)_pt1			0,6	14,0	1,3	78,5	5,5
1a(5)_pt2	0,0	0,1		48,8	2,4	32,7	16,1
1a(5)_pt3		0,2		65,5	3,8	9,2	21,3

Atom %

	Al-K	Si-K	S-K	Fe-K	Co-K	Cu-K	Nd-L
1a(5)_pt1			1,3	16,0	1,4	78,9	2,4
1a(5)_pt2	0,1	0,1		56,7	2,6	33,3	7,2
1a(5)_pt3		0,4		76,3	4,2	9,5	9,6



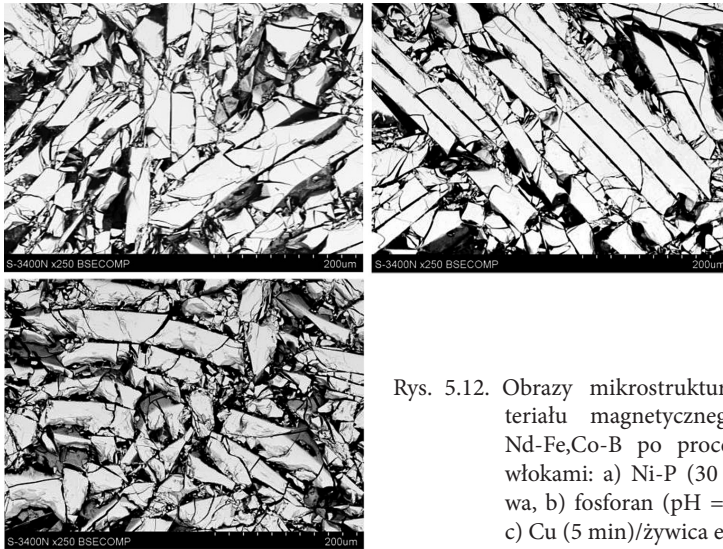
Rys. 5.10. Analiza składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego powłoką Cu (5 min)



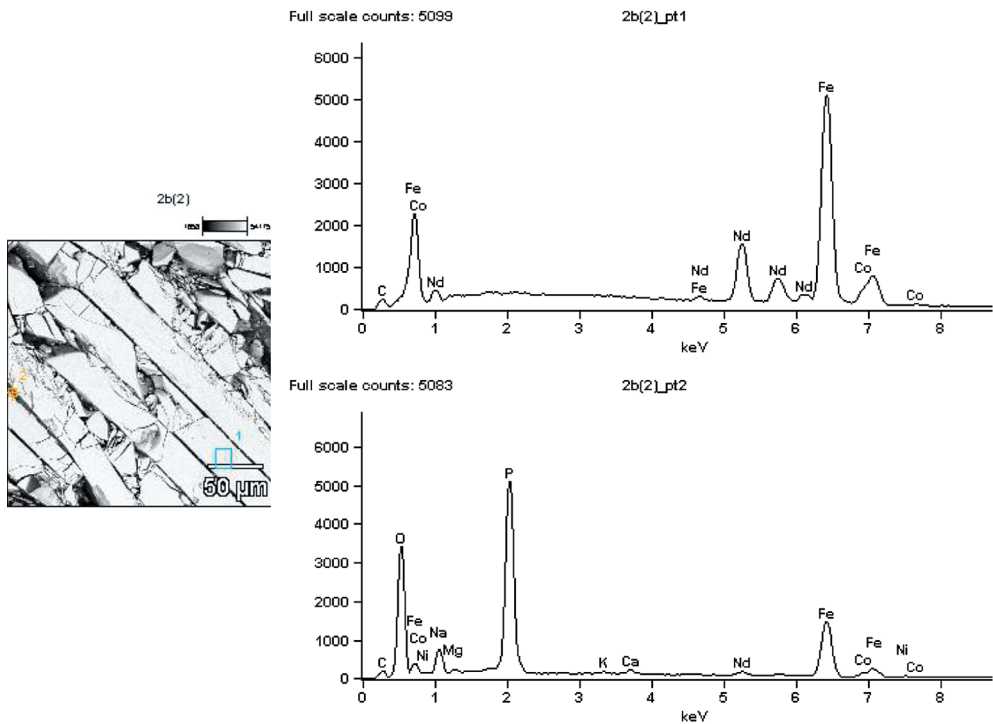
Rys 5.11. Liniowa analiza składu chemicznego wybranego obszaru na powierzchni proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego powłoką Cu – profile zmiany stężenia pierwiastków chemicznych: a) żelazo, b) kobalt, c) neodym, d) miedź

Na Rys. 5.12 przedstawiono obrazy mikrostruktur gotowych kompozytowych materiałów magnetycznych wytworzonych z proszku po bienkapsulacji powłokami Ni-P/żywica epoksydowa, fosforan/żywica epoksydowa, Cu/żywica epoksydowa.

Natomiast na Rys. 5.13–5.16, 5.19 i w Tabeli 5.5 przedstawiono analizę składu chemicznego – zawartość pierwiastków w wybranych obszarach materiału magnetycznego, dodatkowo zamieszczone na rysunkach obrazy przedstawiające zmienność koncentrację pierwiastków chemicznych w kompozytowym materiale na bazie proszku Nd-Fe,Co-B dowodzą, że pierwiastki chemiczne wchodzące w skład ww. powłok zlokalizowane są głównie na granicach cząstek proszków.



Rys. 5.12. Obrazy mikrostruktur kompozytowego materiału magnetycznego na bazie proszku Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji powłokami: a) Ni-P (30 min)/żywica epoksydowa, b) fosforan (pH = 3)/żywica epoksydowa, c) Cu (5 min)/żywica epoksydowa



Rys. 5.13. Analiza składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni kompozytowego materiału magnetycznego na bazie proszku Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji powłokami Ni-P (30 min)/żywica epoksydowa

Tabela 5.5

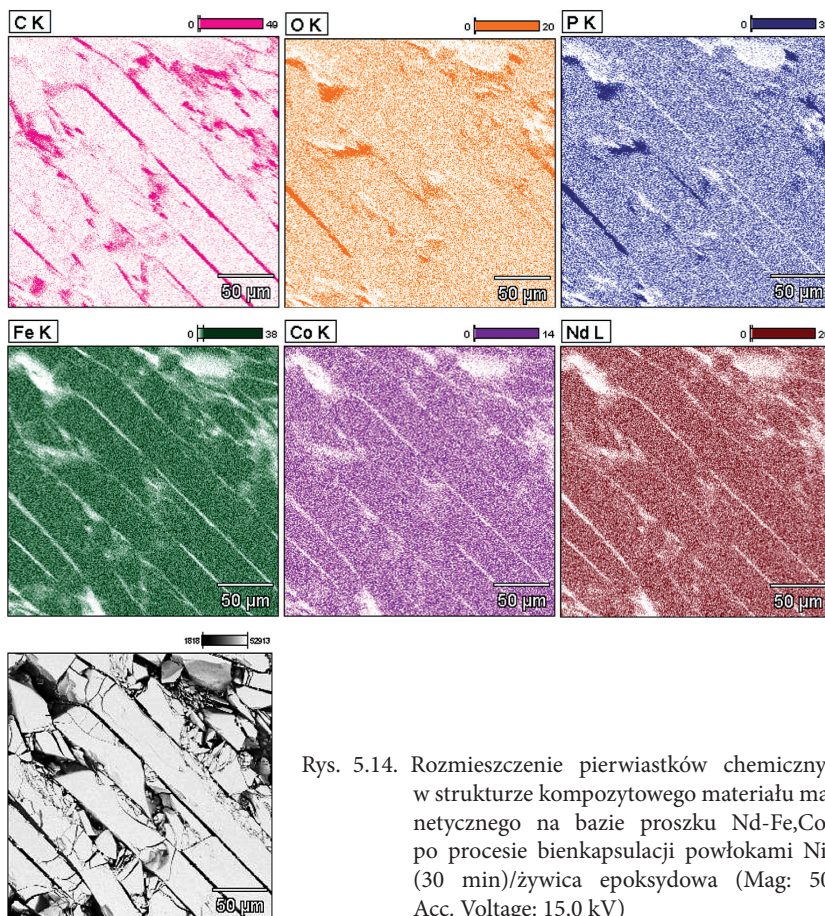
Wyniki pomiarów składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni kompozytowego materiału magnetycznego na bazie proszku Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji powłokami Ni-P (30 min)/żywica epoksydowa

mas. %

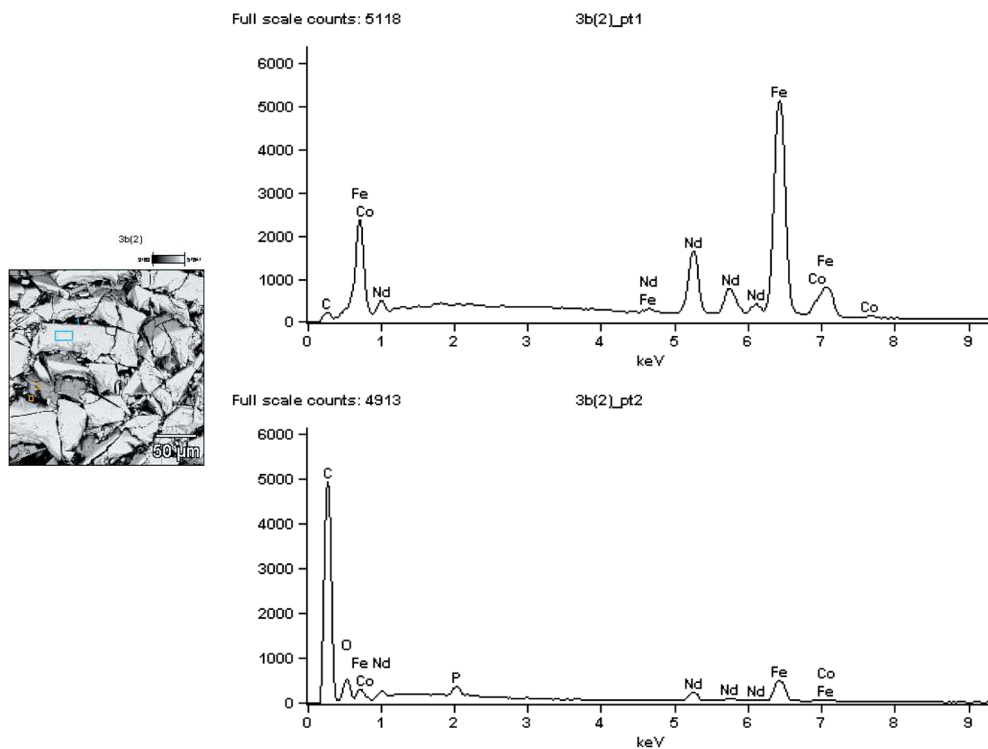
	Na-K	Mg-K	P-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Co-K	Ni-K	Nd-L
2b(2)_pt1						71,8	4,3		23,9
2b(2)_pt2	6,6	0,0	30,4	0,5	0,9	52,6	2,9	1,8	4,3

at. %

	Na-K	Mg-K	P-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Co-K	Ni-K	Nd-L
2b(2)_pt1						84,4	4,8		10,9
2b(2)_pt2	12,2	0,0	41,7	0,5	1,0	40,0	2,1	1,3	1,3



Rys. 5.14. Rozmieszczenie pierwiastków chemicznych w strukturze kompozytowego materiału magnetycznego na bazie proszku Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji powłokami Ni-P (30 min)/żywica epoksydowa (Mag: 500, Acc. Voltage: 15.0 kV)



Rys. 5.15. Analiza składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni kompozytowego materiału magnetycznego na bazie proszku Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji powłokami fosforanowymi (pH = 3)/żywica epoksydowa

Tabela 5.6

Wyniki pomiarów składu chemicznego wybranych obszarów na powierzchni kompozytowego materiału magnetycznego na bazie proszku Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji powłokami fosforanowymi (pH = 3)/żywica epoksydowa

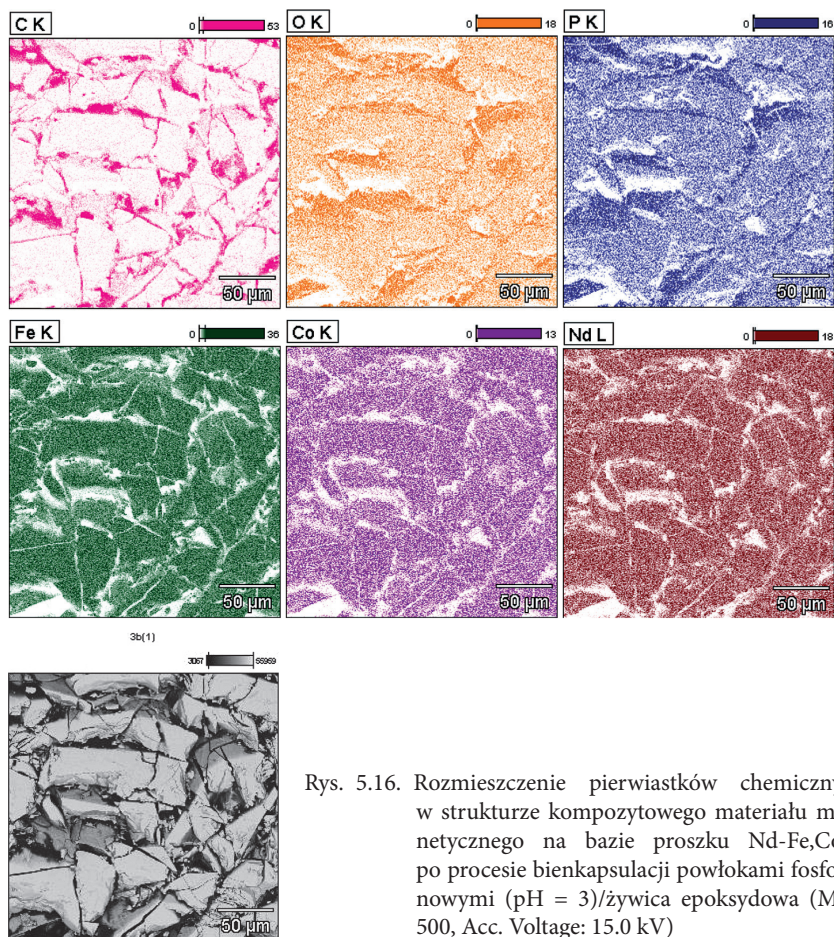
mas. %

	P-K	Fe-K	Co-K	Nd-L
3b(2)_pt1		72,2	4,1	23,8
3b(2)_pt2	5,3	60,0	5,4	29,4

at. %

	P-K	Fe-K	Co-K	Nd-L
3b(2)_pt1		84,7	4,5	10,8
3b(2)_pt2	11,1	69,7	6,0	13,2



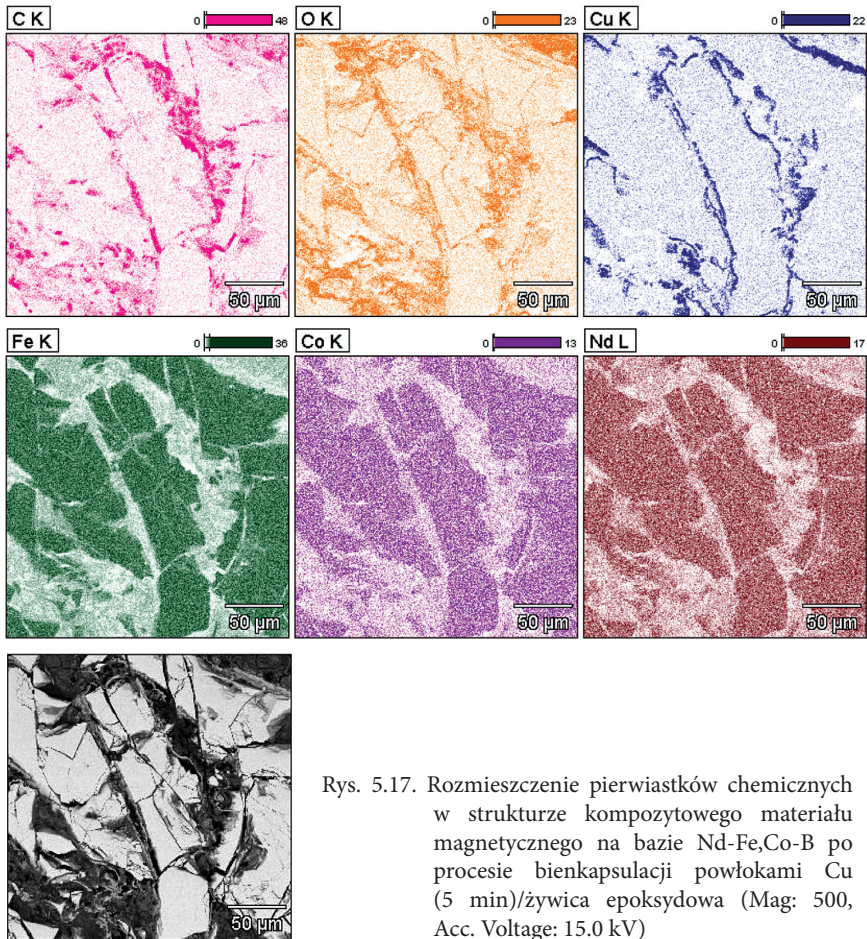


Rys. 5.16. Rozmieszczenie pierwiastków chemicznych w strukturze kompozytowego materiału magnetycznego na bazie proszku Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji powłokami fosforanowymi (pH = 3)/żywica epoksydowa (Mag: 500, Acc. Voltage: 15.0 kV)

Analiza składu chemicznego powierzchni wyrobu wykazała zmienny rozkład pierwiastków na powierzchni. Najmniejsze fluktuacje składu występują w przypadku rozkładu pierwiastków po bienkapsulacji powłoką fosforan/żywica epoksydowa. W strukturach próbek widoczne są jasne cząstki proszku, a pomiędzy nimi utwardzona żywica (ciemnoszare obszary). Czarne obszary przedstawiają pory. Na obrazach mikrostruktury magnezu z proszku po bienkapsulacji powłoką fosforan/żywica epoksydowa można zaobserwować, że metaliczne cząstki podczas zabiegów technologicznych nie uległy tak silnemu rozdrobnieniu – widoczne są większe cząstki niż w pozostałych próbkach. Świadczy to o znacznym umocnieniu cząstek poprzez tę powłokę.

Poddanie cząstek proszku bienkapsulacji powłokami fosforan/żywica epoksydowa umożliwia powstanie szczelnej bariery dla medium korozyjnego, a ponadto sprawia, że cząstki chronione są przed działaniem zewnętrznych sił mechanicznych

(zginających, ściskających). Częstki proszku zabezpieczone w ten sposób nie ulegają tak silnemu rozdrobnieniu podczas mieszania i prasowania jak ma to miejsce w przypadku cząstek po bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa.



Rys. 5.17. Rozmieszczenie pierwiastków chemicznych w strukturze kompozytowego materiału magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji powłokami Cu (5 min)/żywica epoksydowa (Mag: 500, Acc. Voltage: 15.0 kV)

Na podstawie przeprowadzonych badań strukturalnych za optymalne uznano powłoki Ni-P (30 min) oraz fosforanową (pH = 3). Powłoka Ni-P (30 min) ma charakter wielowarstwowy i nawet w obszarach nieciągłości nie zostaje odsłonięta powierzchnia proszku magnetycznego. Również konwersyjna warstwa fosforanowa otrzymana w zakwaszonych roztworach fosforanowych (pH = 3) całkowicie pokrywa powierzchnię cząstek proszku, a w efekcie stanowi szczelną barierę dla czynników zewnętrznych. Natomiast powłoka Cu charakteryzuje się najmniej szczelnością. Na powierzchni większości cząstek proszków występują liczne nieciągłości, pęknięcia, a w nich zostaje odkryta powierzchnia materiału Nd-Fe,Co-B.

Można stwierdzić, że enkapsulacja powłokami Cu nie stanowi efektywnej ochrony, gdyż powłoka nanoszona na powierzchnię proszku łatwo ulega uszkodzeniu, łuszczy się i odpryskuje. Taki charakter powłoki sprawia, że nie tworzy ona szczelnej kapsuły dla cząstek proszku i nie jest barierą dla czynników korozyjnych, stąd nie uwzględniono jej w kolejnych badaniach.

Składniki chemiczne pochodzące z powłok ochronnych zastosowanych w procesie bienkapsulacji skoncentrowane są głównie w obszarach pomiędzy cząstkami skonsolidowanego proszku, co świadczy o wytworzeniu bariery ochronnej dla poszczególnych cząstek.

## **5.2. Ocena zmian procesu na podstawie analizy właściwości technicznych wyrobu – inżynieria jakości w procesach specjalnych**

Najtrafniejszego sprecyzowania znaczenia słowa „jakość” można szukać w treści normy PN-EN 9000, gdzie określono ją następująco: „Jakość to stopień, w jakim zbiór inherentnych właściwości spełnia wymagania”. Co ważne, jakość należy rozpatrywać z punktu widzenia różnych dziedzin nauki, w których odgrywa ona zupełnie inną rolę i jest określana za pomocą innych stawianych produktom znaczników i wymagań m.in.: techniki, gdzie opisana jest jako zbiór parametrów fizycznych, które zapewniają zaspokajanie określonych ludzkich potrzeb, natomiast w przypadku ekonomicznego określania jakości, szczególną uwagę zwraca się na zgodność wyrobu z wymaganiami klienta, które wynikają z jego potrzeb i budżetu przeznaczanego na realizację wykonania dobra bądź usługi [38, 57, 208].

Produkty materialne, które wykonywane są zgodnie z wymaganiami, charakteryzowane są na podstawie zbioru mierzalnych cech. Ocena dokonywana jest w sposób bardzo dokładny (zgodnie z ustaleniami) i obiektywny (zgodnie z przyjętymi normami). Zbiory te bazują na właściwościach fizycznych, chemicznych charakterystycznych dla tej grupy produktów, ale również na zgodności wymiarowej, która narzucana jest przez normy i standardy lub też przez warunki ergonomii.

W dokumentach stanowiących źródło zapisu poziomu jakości cechy te sprecyzowane są poprzez ujawnienie dokładnej wartości parametru wraz z dopuszczalnym odchyleniem od wyznaczonej wartości. Inną metodą określenia jakości jest sprecyzowanie tzw. cech subiektywnych, które wynikają z indywidualnej potrzeby, którą mają za zadanie zaspokoić. Cechy te są również zależne od upodobań klientów i stanowią decydujący aspekt podczas procesu decyzyjnego związanego z ich nabyciem. W tym wypadku oceny jakości wyrobów materialnych można dokonać, bazując na kryteriach: przyrodniczo-technicznych, ekonomicznych, ekologicznych, użytkowych (ergonomia i estetyka). Niemniej jednak zespół cech określonych przez normy, procedury i dokumenty wewnętrzne producenta jest elementem wyróżniającym

i znamienym dla danej grupy wyrobów i decydującym w określeniu ich przeznaczenia. Zbiór wszystkich możliwych do określenia cech wskazuje na techniczną jakość wyrobów i półwyrobów. Zatem określenie poziomu jakości, jej zdefiniowanie, daje możliwość dopasowania technologii produkcji, materiałów niezbędnych do produkcji, sposobu magazynowania, jak otoczenia, w którym umiejscowiony jest proces produkcyjny oraz środki transportu [177].

Wszelkie czynności mające na celu kontrolę jakości mają miejsce, gdy interesujące detal, część, zespół, podzespół, półwyrób lub wyrób gotowy są realizowane przez osoby do tego upoważnione, posiadające wystarczające kompetencje, a co najważniejsze zostały odpowiednio przeszkolone w zakresie wykonywanych operacji sprawdzających. Do form operacji kontrolnych zaliczane są między innymi: kontrola wymiarów i badania wyrobu, bazując na kontroli wizualnej lub też z wykorzystaniem aparatury specjalistycznej. Wszystkie czynności podczas procesu kontroli określone powinny być procedurami, zgodnie ze wzorcami i specyfikacjami produkcyjnymi.

Produktem niezgodnym jest każdy produkt, który na danym etapie procesu nie spełnia ustalonych wymagań i nie powinien być wysłany do klienta, a dalej używany jest czy też przekazywany do kolejnych etapów procesu. Niezgodności produktu mogą mieć różną formę. Może to być niezgodność prosta lub złożona, która jest skutkiem bezpośrednio lub pośrednio źle zaplanowanego procesu. Niezgodności mogą być powodowane przez czynniki zewnętrzne, na które zarządzający procesem nie ma wpływu podczas cyklu wytwórczego.

Definicja ta odnosi się do identyfikacji wyrobów i usług, jednak o ile w przypadku procesu produkcyjnego stosunkowo łatwo można zidentyfikować parametry decydujące o zgodności z wymaganiami, o tyle w sferze usług nie jest to zawsze tak jednoznaczne (najczęstszym sposobem identyfikacji usługi niezgodnej jest liczność zgłoszonych skarg i reklamacji klientów).

Istotnym elementem są monitoring i pomiary wyrobów lub usług. Trudnością w identyfikowaniu produktu niezgodnego jest fakt, że nie wszystkie produkty w trakcie trwania procesu poddawane są kontroli, gdyż stosowane są techniki statystycznego nadzoru nad procesem, a jedyne badania właściwości użytkowych wyrobów zaliczane są do grupy badań niszczących (po przeprowadzonym badaniu produkt nie powraca do dalszego przetwarzania). Zdarzają się również przypadki, że nie jest możliwe nadzorowanie procesu, co jest typowe dla tzw. procesów specjalnych.

W kontroli jakości największym problemem i ograniczeniem jest subiektywność pomiaru. Dlatego też tak istotne jest, by opracować konkretny miernik/wskaźnik lub zestaw mierników/wskaźników, które będą możliwie najbardziej obiektywne i pozwolą w sposób jednoznaczny scharakteryzować standard jakościowy (normę jakościową).

Szczególne utrudnienia w kontroli jakości pojawiają się, gdy jeden z procesów składających się na cały proces produkcyjny zaliczany jest do grupy procesów specjalnych.

Jak wynika z definicji, procesy specjalne to te, których rezultaty nie mogą zostać zweryfikowane przez późniejsze badania nieniszczące. Zgodnie z treścią norm proces specjalny zdefiniowany jest jako proces, którego wynik nie może być w pełni sprawdzony przez późniejszą kontrolę i badanie wyrobu i którego nieprawidłowości przebiegu mogą się ujawnić w czasie stosowania wyrobu (PN-EN ISO 3834-5:2015-08). A odpowiedni poziom jakości wyrobu może być zapewniony jedynie dzięki właściwie zarządzanym procesom rozumianym jako: optymalna organizacja produkcji, dobór materiałów, proces technologiczny (w rozumieniu – proces obróbki chemicznej, cieplnej itp.), monitorowanie parametrów oraz park technologiczny i personel [177].

Zapewnienie odpowiedniego poziomu jakości podczas prowadzenia procesów specjalnych uzależnione jest od wielu czynników, w tym od:

- prawidłowo dobranych komponentów – zarówno tych dostarczanych przez dostawców, jak i tych produkowanych bezpośrednio w przedsiębiorstwie;
- prawidłowo dobranego (dostępność odpowiedniego) zaplecza technicznego – specjalistyczne wyposażenie i oprzyrządowanie dopasowane do rodzaju procesu technologicznego, również zapewnienie środków ochrony indywidualnej;
- prawidłowo dobranych technik i narzędzi kontroli jakości – precyzyjnych i specjalistycznych systemów pomiarowych;
- prawidłowo dobranych metod realizacji procesów specjalnych – odpowiednio dobranych do procesu technologicznego.

Niezgodności w procesie specjalnym mogą być powodowane przez wiele przyczyn (zależy to od rodzaju procesu, liczby parametrów zmiennych, wybranej technologii). W Tabeli 5.7 zaprezentowano przykładowe przyczyny powstawania niezgodności na etapie projektowania i realizacji procesu. Jak łatwo zaobserwować, niezgodności mogą powstawać na różnych etapach procesu, a zadaniem kontroli jakości jest nie tylko ich stwierdzenie, ale przede wszystkim zdefiniowanie przyczyn ich powstawania.

W tej szczególnej grupie procesów kontrola jakości nie ogranicza się tylko do kontroli wizualnej lub wzrokowej (np. oględziny powierzchni, sprawdzenie poprawności wymiarowej), ale również do konieczności przeprowadzenia badań kontroli specjalistycznej. Do tego rodzaju badań mogą być zaliczone badania mechaniczne materiałów, badania chemiczne, ale również smakowe (np. dla wyrobów uzyskiwanych po procesie obróbki termicznej lub fermentacji). Zatem zarządzanie jakością w procesach specjalnych obejmuje również:

- wejściową kontrolę jakości materiałów i surowców,
- kontrolę techniczną środków produkcji wykorzystywanych w procesie specjalnym,
- monitorowanie parametrów procesu,
- specjalistyczną ocenę jakości wyrobów po wyznaczonych etapach procesu (statystyczna kontrola jakości).

Tabela 5.7

Przykładowe przyczyny niezgodności procesu, które mogą powstać podczas planowania i realizacji procesów specjalnych [177]

PROJEKTOWANIE	Niepoprawny dobór parametrów procesu
	Niewłaściwy dobór technologii
	Niewłaściwe przygotowanie do procesu – brak zasobów, zły materiał
	Niewłaściwe zastosowanie materiałów pomocniczych
	Brak odpowiedniej wiedzy pracowników
	Brak znajomości specyfiki procesu
	Niewłaściwe przygotowanie do procesu
WYTWARZANIE	Brak nadzoru nad parametrami procesu
	Niewłaściwie ustawione parametry procesu
	Brak nadzoru nad czasem i ruchami roboczymi podczas operacji procesu
	Brak zastosowania właściwego oprzyrządowania
	Niewłaściwa kolejność operacji

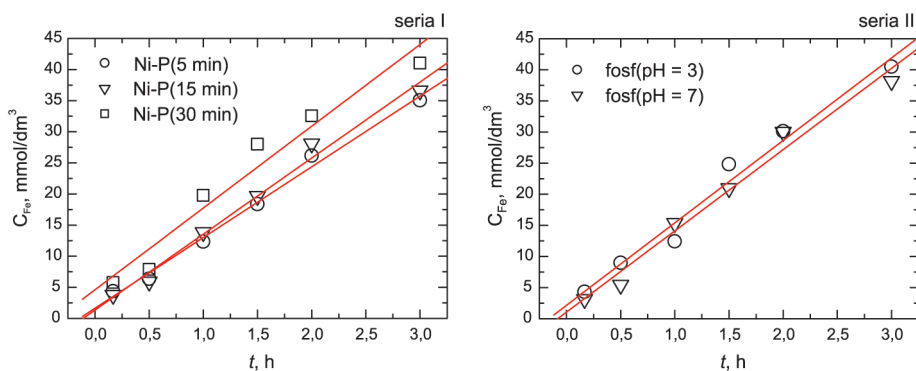
Jak już wcześniej wspomniano, kryteria techniczne w kreowaniu jakości innowacyjnych materiałów inżynierskich czy też innowacyjnych procesów produkcji są bardzo interdyscyplinarne – w przypadku właściwości kompozytów magnetycznych arbitralnie wytypowano cztery grupy właściwości, które stanowić mogą podstawę w rozwoju produktu:

- właściwości mechaniczne,
- odporność korozyjna,
- właściwości magnetyczne,
- właściwości tribologiczne.

O ile właściwości magnetyczne to z reguły wymóg konieczny dla tego typu wyrobów, o tyle pozostałe wskazane charakterystyki odnoszą się do wytrzymałości eksploatacyjnej gotowego wyrobu. Wytrzymałość eksploatacyjna została określona na podstawie właściwości:

- elektrochemicznych, takich jak szybkość korozji określana w przyspieszonych testach na korozję atmosferyczną, badaniach potencjo-kinetycznych w mediach o różnej agresywności itp.,
- mechanicznych, takich jak twardość, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie,
- tribologicznych, takich jak parametry chropowatości powierzchni gotowych produktów.

Aby dokonać oceny właściwości chemicznych proszku po zaproponowanych zabiegach enkapsulacji powłokami Ni-P i fosforanowymi, proszki poddano samorzutnemu roztwarzaniu w 0,5M wodnym roztworze siarczanowym zakwaszonym do pH = 2. Każdorazowo badano próbki proszków o tej samej masie (z dokładnością 0,0001 g), a całkowity czas ekspozycji proszków w roztworze wynosił 3 h. Próbkę roztworu były pobierane po 10 min, 30 min, 1 h, 1,5 h, 2 h i 3 h. Stężenie jonów Fe(II) określano na podstawie absorpcyjnej spektroskopii atomowej z wykorzystaniem spektrometru SOLLAAR 939. Wyniki pomiarów przedstawiono na Rys. 5.18. Wykresy przedstawiają zależność zmian stężenia jonów Fe(II) w funkcji czasu ekspozycji w odniesieniu do każdej serii proszków po enkapsulacji powłokami Ni-P, fosforanowymi. Cząstki proszku miały zbliżone wymiary 150–200  $\mu\text{m}$  [221].



Rys. 5.18. Kinetyka zmian stężenia jonów Fe<sup>2+</sup> podczas samorzutnego roztwarzania proszków Nd-Fe,Co-B w wodnym roztworze siarczanowym zakwaszonym do pH = 2. Wyniki pomiarów dla: a) serii I (powłoka Ni-P), b) serii II (powłoka fosforanowa)

Stwierdzono, że zmianę stężenia Fe<sup>2+</sup> w roztworze siarczanowym o pH = 2 można, w przybliżeniu, przedstawić zależnością liniową. Na podstawie uzyskanych wyników porównano nachylenie odcinków liniowych, reprezentujących szybkość przechodzenia Fe(II) do roztworu, co jest miarą szybkości korozji badanych proszków. Wartości szybkości przechodzenia jonów Fe(II) do roztworu przedstawiono w Tabeli 5.8.

Szybkość przechodzenia jonów żelaza do roztworu została zredukowana o ok. 30% w stosunku do proszków w stanie dostawy, świadczy to o korzystnym wpływie

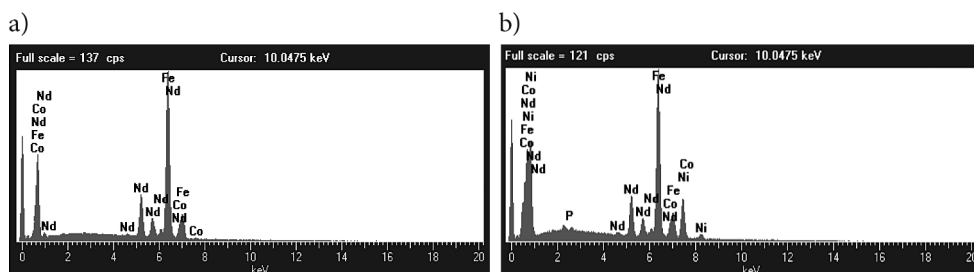
zapropionowanych metod enkapsulacji cząstek proszku na ich odporność korozyjną. Wpływ rodzaju zastosowanej powłoki do enkapsulacji cząstek proszku był podobny, niemniej najlepsze wyniki uzyskano dla proszków po enkapsulacji powłoką Ni-P.

Tabela 5.8

Szybkość przechodzenia jonów Fe(II) z proszku Nd-Fe,Co-B po enkapsulacji powłokami ochronnymi do roztworu siarczanowego (pH = 2)

Seria	$v_{\text{Fe(II)}}^{\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}},$ $\text{SO}_4^{-2}, \text{pH} = 2$	
0	<i>as recived</i>	16,54
	Ni-P (5 min)	13,14
I	Ni-P (15 min)	12,21
	Ni-P (30 min)	11,36
II	fosf. (pH = 3)	13,05
	fosf. (pH = 7)	13,24

W celu ustalenia koniecznego i wystarczającego czasu nakładania tej powłoki poddano dalszej analizie proszki RE-M-B po enkapsulacji powłokami Ni-P. Na podstawie analizy EDX, proszku trawionego i poddanego procesowi enkapsulacji powłokami Ni-P (Rys. 5.19) stwierdzono, że już po 5 minutach zanurzenia w kąpeli na powierzchni cząstek proszku wytwarzana jest warstwa ochronna (obecny Ni). Po dłuższych czasach ekspozycji w roztworze intensywność pików Ni zwiększa się, co świadczy o wzroście jego zawartości, a w efekcie końcowym o zwiększeniu się grubości powłoki.



Rys. 5.19. Analiza pierwiastków uzyskana dla proszku Nd-Fe,Co-B: a) po trawieniu, b) po enkapsulacji Ni-P (czas zanurzenia 5 minut)

Podsumowując, wstępna obróbka cząstek proszku Nd-Fe,Co-B ma znaczący wpływ na szybkość narastania warstw tlenkowych na jego powierzchni. Trawienie proszków w celu oczyszczenia ich powierzchni jest korzystne, ale niewystarczające. Brak zabezpieczenia wytrawionej powierzchni może skutkować ponownym jej utle-



nianiem. Usunięcie faz tlenkowych z powierzchni cząstek proszku wraz z zastosowaniem powłok ochronnych Ni-P i fosforanowej zmniejsza szybkość degradacji i przyczynia się do zwiększenia trwałości finalnego wyrobu magnetycznego. Szczególnie korzystną, w przypadku proszków, okazała się powłoka Ni-P, a 15 minutowy czas jej nakładania okazał się konieczny do uzyskania skuteczniejszej ochrony [221].

### 5.3. Kryteria zgodności z wymaganiami – właściwości użytkowe wyrobów z kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B po bienkapsulacji

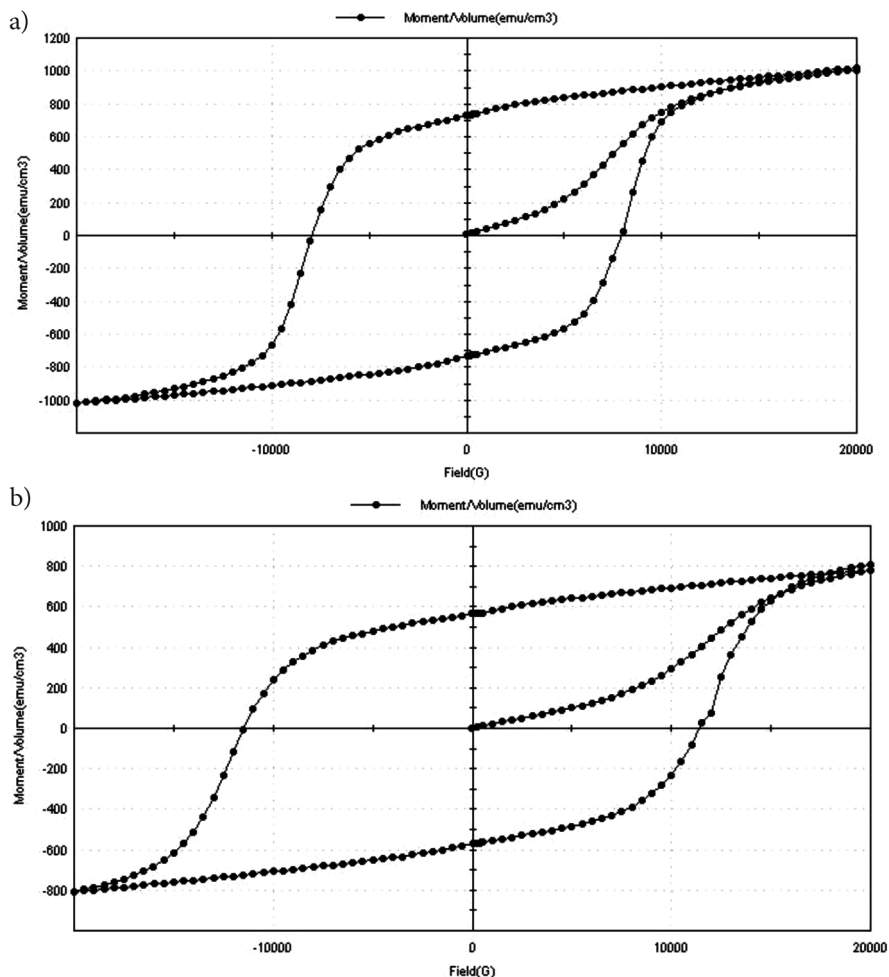
#### 5.3.1. Badania magnetyczne

Przydatność wyrobów z materiałów magnetycznie twardych oraz skuteczność zabiegów bienkapsulacji cząstek proszków Nd-Fe,Co-B określona została również na podstawie pomiarów charakterystycznych właściwości magnetycznych. Należy bowiem podkreślić, że zasadniczym kryterium wszelkich modyfikacji jest niedopuszczenie do pogorszenia właściwości magnetycznych – krytyczny parametr świadczący o zgodności wyrobu z wymaganiami klienta. W Tabeli 5.9 przedstawiono najważniejsze parametry magnetyczne odczytane na podstawie zarejestrowanych pętli histerezy (przykładowe wyniki pomiarów Rys. 5.20) i programu IDEAVSM kompatybilnego z urządzeniem LakeShore. Badania magnetyczne przeprowadzono dla dwóch rodzajów magnesów kompozytowych, które w toku badań ujawniły najkorzystniejszy (optymalny) wpływ bienkapsulacji na odporność korozyjną magnesów wiązanych na bazie proszku Nd-Fe,Co-B. Wyniki porównano z wynikami uzyskanymi z próbki serii 0 (wytworzonej z proszku po enkapsulacji).

Tabela 5.9

Właściwości magnetyczne kompozytowych materiałów magnetycznych wytworzonych z proszku Nd-Fe,Co-B po enkapsulacji (seria 0), bienkapsulacji powłokami Ni-P/żywica epoksydowa (seria I), fosforan/żywica epoksydowa (seria II)

Próbki		Najważniejsze właściwości magnetyczne			
		$B_r$ , G	$H_{ci}$ , G	$M_s$ , emu/cm <sup>3</sup>	$M_r / M_s$
Seria 0	żywica epoksydowa	8502,7	7628,3	1028,2	0,65807
Seria I	Ni-P (15 min)/żywica epoksydowa	9181,8	7922,4	1017,1	0,71838
Seria II	fosf. (pH = 3)/żywica epoksydowa	7141,6	11,425·10 <sup>3</sup>	808,00	0,70335



Rys. 5.20. Właściwości magnetyczne kompozytowych materiałów magnetycznych wytworzonych z proszku Nd-Fe,Co-B: a) po enkapsulacji (seria 0), b) po bienkapsulacji powłokami Ni-P/żywica epoksydowa (seria 1)

Żaden z parametrów wymienionych w Tabeli 5.9 nie może być traktowany indywidualnie ani też nie może być traktowany jako podstawowy wskaźnik w ocenie materiałów magnetycznych. O odporności magnesu na działanie pól odmagnesowujących decyduje koercja materiału, która jest tym wyższa, im lepsza izolacja poszczególnych, dowolnie zorientowanych cząstek proszku. Już samo zastosowanie spoiwa w postaci acetonowego roztworu korzystnie wpływa na wartości koercji, a pokrycie powierzchni cząstek proszku powłokami ochronnymi Ni-P/żywica epoksydowa oraz fosforan/żywica epoksydowa dodatkowo zmniejszają możliwość odmagnesowania

kompozytowych materiałów na bazie proszku Nd-Fe,Co-B przez oddziaływanie pól magnetycznych. Należy zauważyć, że wpływ stosowanych zabiegów bienkapsulacji cząstek proszków przed procesem konsolidacji na właściwości magnetyczne jest wyraźny i istotny. Najkorzystniejsze właściwości magnetyczne uzyskano dla dielektromagnesów wykonanych z proszku Nd-Fe,Co-B po zabiegu bienkapsulacji powłokami fosforan/żywica epoksydowa. Wstępne pokrycie cząstek proszku powłokami ochronnymi w żadnym z przypadków nie powoduje pogorszenia parametrów magnetycznych, zabiegi te wpłynęły korzystnie na uzyskane wyniki.

### 5.3.2. Właściwości mechaniczne

Również właściwości mechaniczne są jednym z istotnych krytycznych kryteriów spełnienia wymagań jakościowych. Zarówno wytrzymałość na zginanie i ściskanie, jak i twardość gotowych kompozytowych materiałów magnetycznych powinny być na tyle wysokie, by nie zakłócały pracy magnesów w układach elektrotechnicznych.

W Tabeli 5.10 przedstawiono uśrednione wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie, ściskanie i twardości określonej metodą Brinella dla badanych wiązanych materiałów magnetycznych wytworzonych z proszku Nd-Fe,Co-B po enkapsulacji i bienkapsulacji powłokami Ni-P/żywica epoksydowa, fosforan/żywica epoksydowa [218].

Tabela 5.10

Właściwości mechaniczne kompozytowych materiałów magnetycznych wytworzonych z proszku Nd-Fe,Co-B po enkapsulacji (seria 0), bienkapsulacji powłokami Ni-P/żywica epoksydowa (seria I), fosforan/żywica epoksydowa (seria II), Cu/żywica epoksydowa (seria III)

Próbki		Właściwości mechaniczne		
		$R_z$ [MPa]	$R_s$ [MPa]	$HB$
Seria 0	żywica epoksydowa	52	121	46
	Ni-P (5 min)/żywica epoksydowa	70	130	54
Seria I	Ni-P (15 min)/żywica epoksydowa	82	150	70
	Ni-P (30 min)/żywica epoksydowa	83	153	71
Seria II	fosf. (pH = 3)/żywica epoksydowa	85	158	77
	fosf. (pH = 7)/żywica epoksydowa	81	151	69

Jak wynika z danych zaprezentowanych w tabeli, zarówno zastosowanie technik bienkapsulacji powłokami Ni-P, jak i konwersyjnymi powłokami fosforanowymi ma korzystny wpływ na właściwości mechaniczne magnesów kompozytowych – obie metody bienkapsulacji przyczyniają się do poprawy wszystkich badanych właściwości mechanicznych. Najlepsze efekty udało się uzyskać dla bienkapsulacji powłoko-

ką fosforan ( $\text{pH} = 3$ )/żywica epoksydowa; dla tej powłoki odnotowano ok. 30–40% wzrost wartości wytrzymałości na zginanie, na ściskanie oraz twardości w skali HB. Najmniejszą poprawę parametrów mechanicznych odnotowano dla bienkapsulacji powłokami Ni-P (5 min)/żywica epoksydowa, zaledwie 10% wzrost wartości wskazanych parametrów.

Poprawa parametrów mechanicznych w wyniku zastosowania metod bienkapsulacji proszków przed spajaniem wynika z faktu, że właściwie przygotowana powierzchnia cząstek proszku sprzyja przyleganiu materiału spoiwa. Zastosowanie powłoki Ni-P i powłoki fosforanowej powoduje ponadto nieznaczne wzmocnienie kruchych cząstek proszku, redukując możliwość pęknięcia podczas działania mechanicznych sił zewnętrznych.

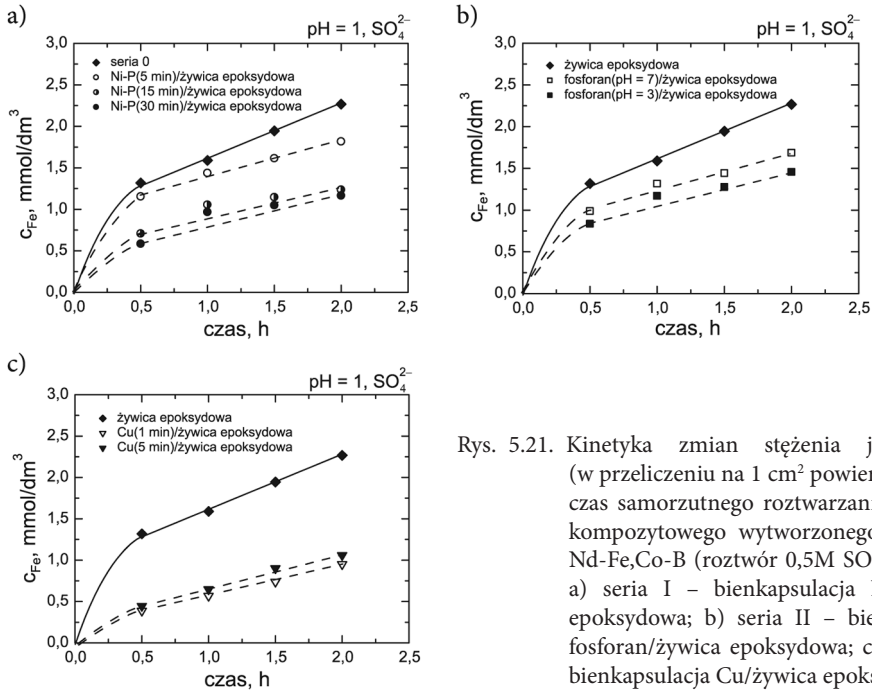
### 5.3.3. Badanie odporności na działanie mediów korozyjnych

Wpływ zastosowanych technik bienkapsulacji na właściwości materiałów magnetycznych na bazie proszku Nd-Fe,Co-B oceniono, przeprowadzając analizę roztworu na obecność jonów  $\text{Fe}^{2+}$  (w przeliczeniu na  $1 \text{ cm}^2$  powierzchni) podczas samorzutnego roztwarzania materiału kompozytowego. Badania przeprowadzono w roztworach siarczanowych o różnym stopniu zakwaszenia ( $\text{pH} = 1-3$ ). Przy założeniu równomierności roztwarzania materiałów (co jest spełnione w przypadku materiałów nanokrystalicznych) szybkość przechodzenia jonów Fe(II) do roztworu jest miarą szybkości korozji materiału [185, 187, 222–224].

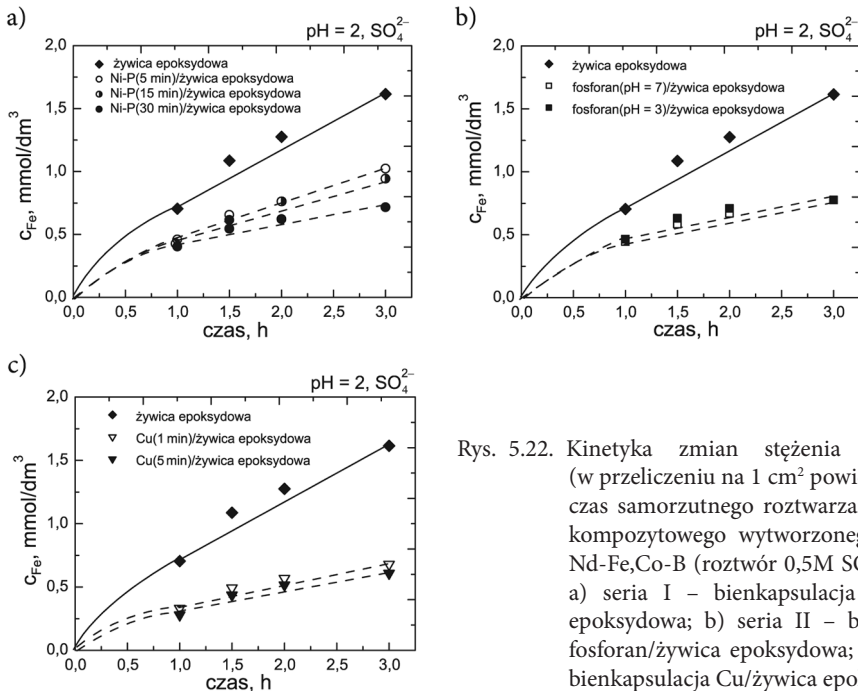
Na Rys. 5.21 i 5.22 przedstawiono kinetykę zmian stężenia jonów Fe(II) dla dwóch zastosowanych wariantów bienkapsulacji proszku Nd-Fe,Co-B (seria I, II i III) w środowisku siarczanowym o  $\text{pH} = 1, 2$  i 3. Jako odnośnik zastosowano próbkę wytworzoną z proszku Nd-Fe,Co-B pokrytego jedynie warstwą spoiwa (seria 0).

We wszystkich badanych roztworach siarczanowych, bez względu na wartość  $\text{pH}$ , zaobserwowano gwałtowny wzrost stężenia jonów Fe(II) w pierwszych minutach ekspozycji (ok. 30 min). Po tym czasie zmiana stężenia jonów Fe(II) w roztworze ma charakter liniowy. Z nachylenia prostoliniowych odcinków wyznaczono szybkość przechodzenia jonów żelaza do roztworu. Wyznaczone wartości, będące miarą szybkości korozji, zamieszczono w Tabeli 5.11.

Zastosowanie techniki bienkapsulacji cząstek proszku w znacznym stopniu wpływa na ograniczenie szybkości przechodzenia jonów Fe(II) do roztworu. Szybkość ta dla wyrobów z materiałów uzyskanych z proszku Nd-Fe,Co-B po bienkapsulacji powłokami Ni-P/żywica epoksydowa (czas kąpieli 30 minut) uległa zmniejszeniu o ok. 50% w porównaniu z szybkością roztwarzania odnośnika. Należy zauważyć, że zastosowanie bienkapsulacji nie ogranicza korozji uszkodzonych czy też odkrytych podczas szlifowania powierzchni stopu Nd-Fe-B. Kinetyczne krzywe trawienia materiałów po bienkapsulacji powłokami Ni-P/żywica i fosforan/żywica



Rys. 5.21. Kinetyka zmian stężenia jonów  $Fe^{2+}$  (w przeliczeniu na  $1\text{ cm}^2$  powierzchni) podczas samorzutnego roztrawiania materiału kompozytowego wytworzonego z proszku Nd-Fe,Co-B (roztwór  $0,5M\ SO_4^{2-}$ , pH = 1): a) seria I – bienkapsulacja Ni-P/żywica epoksydowa; b) seria II – bienkapsulacja fosforan/żywica epoksydowa; c) seria III – bienkapsulacja Cu/żywica epoksydowa



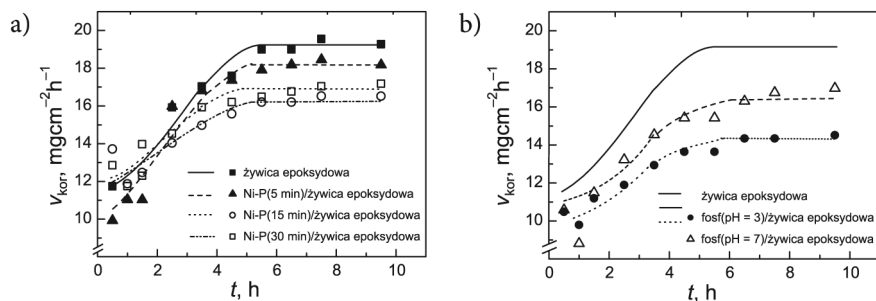
Rys. 5.22. Kinetyka zmian stężenia jonów  $Fe^{2+}$  (w przeliczeniu na  $1\text{ cm}^2$  powierzchni) podczas samorzutnego roztrawiania materiału kompozytowego wytworzonego z proszku Nd-Fe,Co-B (roztwór  $0,5M\ SO_4^{2-}$ , pH = 2): a) seria I – bienkapsulacja Ni-P/żywica epoksydowa; b) seria II – bienkapsulacja fosforan/żywica epoksydowa; c) seria III – bienkapsulacja Cu/żywica epoksydowa

wykonane w zakwaszonym roztworze siarczanowym (pH = 2) również wskazują na istotny wpływ obróbki cząstek proszku na szybkość korozji materiału wiążanego (Rys. 5.23).

Tabela 5.11

Szybkość przechodzenia jonów Fe(II) z materiałów na bazie proszku Nd-Fe,Co-B do roztworu siarczanowego o różnym zakwaszeniu (pH = 1, 2 i 3)

Oznaczenie próbek	0,5M SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , pH = 1	v <sub>Fe(II)</sub> , mg cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>		
		0,5M SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , pH = 2	0,5M SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , pH = 3	
0	<i>as received</i>	0,64	0,48	0,17
I	Ni-P (5 min)/żywica epoksydowa	0,43	0,27	0,14
	Ni-P (15 min)/żywica epoksydowa	0,37	0,25	0,14
	Ni-P (30 min)/żywica epoksydowa	0,33	0,15	0,13
II	fosf. (pH = 3)/żywica epoksydowa	0,40	0,16	0,16
	fosf. (pH = 7)/żywica epoksydowa	0,45	0,17	0,15



Rys. 5.23. Kinetyczne krzywe trawienia materiałów kompozytowych Nd-Fe,Co-B po bienkapsulacji powłoką: a) Ni-P/żywica epoksydowa; b) fosforan/żywica epoksydowa – (roztwór roboczy: 0,5M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> zakwaszony do pH = 2, temperatura 25°C)

W obydwu przypadkach kinetyczne krzywe trawienia porównano z odpowiednią zależnością uzyskaną dla odnośnika – próbki z proszku trawionego poddanej tylko procesowi enkapsulacji żywicą epoksydową. We wszystkich badanych przypadkach szybkość roztwarzania początkowo wzrasta w czasie i ustala się po ok. 5 godzinach ekspozycji w roztworze. Stacjonarne szybkości korozji zebrano w Tabeli 5.12. Czas otrzymywania powłoki Ni-P ma znaczenie drugorzędne, aczkolwiek można wskazać stosunkowo najkorzystniejszy czas – czas 15 minut. Powłoki fosforanowe nakładano w czasie bezprądowej ekspozycji proszków w roztworach fosforanowych, stosując dwa różne stopnie ich zakwaszenia (pH = 3 lub 7). Przedstawione krzywe trawienia wskazują, że wzrost pH roztworu fosforanowego powoduje raczej nie-

korzystne zmiany z punktu widzenia odporności korozyjnej. Powłoki fosforanowe otrzymane w środowisku o  $\text{pH} = 7$  wykazują słabsze zdolności ochronne (są bardziej porowate) niż powłoki otrzymane ze środowiska o niższym  $\text{pH}$ . Dodatkowe próby fosforanowania w zakresie  $\text{pH} = 2-5$  wykazały, że najsilniejsze obniżenie szybkości korozji materiału osiąga się dla kąpeli fosforanowej o  $\text{pH} = 3$ .

Tabela 5.12

Stacjonarna szybkość korozji materiałów wiązanych Nd-Fe,Co-B w zakwaszonym roztworze siarczanowym ( $\text{pH} = 2$ ), w zależności od warunków enkapsulacji/bienkapsulacji proszku

Próbka	$v_{\text{kor}}$ , $\text{mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$
enkapsulacja żywica epoksydowa	19,2±0,1
bienkapsulacja NiP (5 min)/żywica epoksydowa	18,2±0,1
bienkapsulacja NiP (15 min)/żywica epoksydowa	<b>16,2±0,1</b>
bienkapsulacja NiP (30 min)/żywica epoksydowa	16,9±0,1
bienkapsulacja fosf. ( $\text{pH} = 3$ )/żywica epoksydowa	<b>14,3±0,2</b>
bienkapsulacja fosf. ( $\text{pH} = 7$ )/żywica epoksydowa	16,5±0,1

Zastosowanie techniki bienkapsulacji cząstek proszku w znacznym stopniu wpływa zarówno na ograniczenie szybkości przechodzenia jonów Fe(II) do roztworu, jak i szybkość samorzutnego roztwarzania badanych materiałów. Wartości oporu przeniesienia ładunku materiałów wytworzonych z proszku pokrytego jedynie materiałem spoiwa w stosunku do wartości tego oporu materiałów po bienkapsulacji powłokami Ni-P/żywica epoksydowa oraz powłokami fosforan/żywica epoksydowa są większe, co świadczy o hamowaniu procesu korozyjnego. Powłoki na cząstkach proszku ograniczają w pewnym stopniu wnikanie medium korozyjnego w głąb struktury materiału. Takie ograniczenie procesu korozyjnego może wynikać z izolacji cząstek proszku Nd-Fe,Co-B od środowiska zewnętrznego. Również te wyniki potwierdziły, że najefektywniejszą ochronę zapewnia powłoka fosforanowa [185, 187, 222–224].

#### 5.3.4. Analiza parametrów chropowatości powierzchni gotowych kompozytów z proszku Nd-Fe,Co-B

Kompleksowa obróbka proszków obejmowała zabieg trawienia proszków z następującym po nim procesem nakładania powłok i konsolidacją proszków. Dokonano analizy warstwy wierzchniej otrzymanych materiałów magnetycznych Nd-Fe,Co-B. Badania prowadzono głównie na proszkach, których powierzchnia została pokryta warstwami Ni-P oraz konwersyjnymi warstwami fosforanowymi [225–227].

Chropowatość jest jedną z najistotniejszych i zazwyczaj najłatwiej mierzalnych cech warstw powierzchniowych. Chropowatość powierzchni wywiera decydujący wpływ nie tylko na właściwości użytkowe materiału, ale także na proces korozyjny. Gładka powierzchnia jest cechą pożądaną w przypadku wyrobów poddanych działaniu czynników zewnętrznych powodujących powierzchniową degradację wyrobów. Oceny zmiany parametrów chropowatości powierzchni gotowych kompozytowych magnesów wiązanych wykonanych z proszku Nd-Fe,Co-B po procesach bienkapsulacji dokonano na podstawie pomiarów profilometrycznych oraz cyfrowej analizy wyników za pomocą odpowiedniego oprogramowania *TalyProfile Lite*. W ramach przeprowadzonych badań określono parametry stereometryczne profilu:

- $Ra$  – średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości rzędnych profilu w przedziale odcinka elementarnego,
- $Rz$  – wysokość chropowatości wg 10 punktów profilu,
- $Rt$  – całkowita wysokość profilu chropowatości:  $Rt = Rp + Rv$ , gdzie:  $Rp$  – wysokość najwyższego wzniesienia profilu,  $Rv$  – głębokość najniższego wgłębienia profilu.

Wyniki przedstawiono w Tabeli 5.13 i na Rys. 5.24.

Tabela 5.13

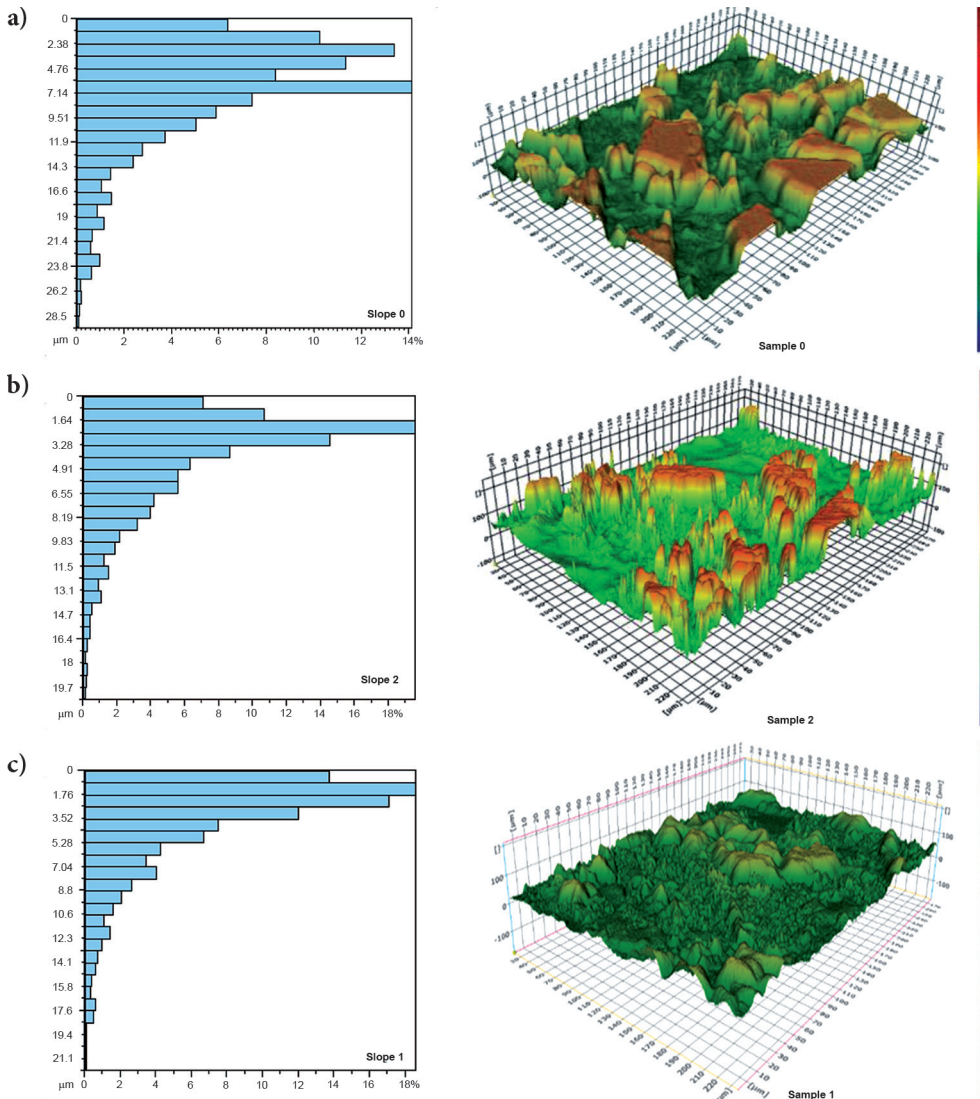
Wybrane parametry chropowatości powierzchni materiałów Nd-Fe,Co-B po bienkapsulacji powłoką:  
a) Ni-P/żywica epoksydowa; b) fosforan/żywica epoksydowa

Parametry [ $\mu\text{m}$ ]	Próbka z serii 0 <i>as received</i>	Próbka z serii I Ni-P (15 min)/żywica epoksydowa	Próbka z serii II fosf. (pH = 3)/żywica epoksydowa
$Ra$	2,61 ± 0,08	2,43 ± 0,05	2,03±0,18
$Rz$	21,22 ± 3,07	18,56 ± 0,17	17,72±0,91
$Rt$	16,14 ± 0,59	14,20 ± 0,16	14,56±0,88

Parametr  $Ra$  dla wszystkich próbek zawiera się w granicach 2–2,6  $\mu\text{m}$ , co pozwala na zakwalifikowanie badanych materiałów do tej samej klasy chropowatości (wg PN-58/M-04252). Największą wartość  $Ra$  osiąga próbka z serii 0 (*as received*), natomiast dla pozostałych próbek parametr ten jest niższy. Również pozostałe ba-



dane parametry  $Rz$  i  $Rt$  największą wartość osiągają dla próbki z serii 0. Można zatem przypuszczać, że największą chropowatość powierzchni wykazuje materiał po enkapsulacji (próbka z serii 0), a proces bienkapsulacji ma wpływ na zmniejszenie chropowatości i wygładzenie powierzchni. Jest to niewątpliwie korzystne z punktu widzenia właściwości eksploatacyjnych.



Rys. 5.24. Histogramy dla profili chropowatości wykonanych metodą stykową profili oraz obrazy 3D (mikroskop optyczny EPI 3D Olympus, powiększenie 50x) dla materiału Nd-Fe,Co-B: a) *as received*, b) Ni-P/żywica epoksydowa, c) fosforan/żywica epoksydowa

Przeprowadzone testy wykazała zmiany zachodzące w parametrach funkcyjnych opisujących strukturę geometryczną powierzchni wyrobów. Zmiany zachodzą w rozkładzie rzędnych struktury. Zgodnie z tym rozkładem (Rys. 5.24) w próbce po procesie enkapsulacji (próbka z serii 0) widoczny jest większy udział wierzchołków/dolin w głębszych warstwach materiału niż w próbkach z serii I i II, co sugeruje większe rozwinięcie powierzchni próbki z serii 0.

Proces bienkapsulacji powoduje wygładzenie powierzchni wyrobów dla obu badanych metod wytwarzania (próbka z serii I i II), przy czym efekt ten jest bardziej widoczny w przypadku zastosowania bienkapsulacji cząstek proszku fosforan/żywica epoksydowa. Związane jest to z właściwościami samej konwersyjnej powłoki fosforanowej, która charakteryzuje się znaczną porowatością. Zastosowanie dodatkowej powłoki (żywica epoksydowa) powoduje prawdopodobnie częściowe wypełnienie porów w powłoce konwersyjnej [225–227].

## **5.4. Innowacje procesowe w procesie wytwórczym kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe-B po bienkapsulacji**

### **5.4.1. Innowacje procesowe – rozwój i realizacja**

Przemysł bazujący na technologii produkcji kompozytów magnetycznych wiązanych różnego rodzajami tworzyw sztucznych należy zaklasyfikować do branży chemicznej, której głównym kierunkiem działań związanych z rozwojem jest nastawienie się na proekologiczność oraz intensyfikacja innowacyjności. Warto zaznaczyć, że przemysł chemiczny to gałąź przemysłu odpowiedzialna za silne wsparcie potencjału rozwoju nie tylko polskiej gospodarki, ale również gospodarki światowej. Dodatkowo to właśnie przemysł chemiczny jest głównym dostawcą surowców, materiałów i półproduktów do innych gałęzi przemysłu [228, 228–233]. Produkcja w branży chemicznej jest często charakteryzowana jako bardzo kapitałochłonna, wymagająca dużego udziału środków trwałych oraz niosąca za sobą spore ryzyko niepowodzenia. Niemniej jednak jest to jedna z dziedzin gospodarki, która charakteryzowana jest przez największy wskaźnik działań o charakterze innowacyjnym. Co więcej, produkcja opierająca się na procesach specjalnych ukrywa w sobie duży potencjał i możliwości rozwoju, a ze względu na powiązanie z innymi obszarami przemysłu odgrywa kluczową rolę w dostarczaniu innowacyjnych rozwiązań. Złożoność realizacji wyrobów znacznie wzrosła ze względu na wymagania dotyczące ekologicznego i społecznego, a także ekonomicznego zrównoważonego rozwoju. Doprowadziło to do wzrostu popytu na innowacje dotyczące nowych materiałów, technologii produkcji i procesów przetwarzania, a także nowych modeli biznesowych w celu lepszego wykorzystania produktów, materiałów i surowców. Większość innowacji powstaje dzięki cią-

głemu zwiększaniu kompetencji uczestników procesu (zazwyczaj specjalistów z zakresu inżynierii chemicznej i materiałowej, jak również inżynierii produkcji). Choć przełomowe zmiany niekoniecznie pojawiają się w działach badań i rozwoju i jest jednakowo prawdopodobne, że wystąpią na etapie produkcji lub wykorzystania, to bezwzględnie wymagają swojego rzetelnego potwierdzenia [234].

Arbitralnie przyjmując, wśród najważniejszych cech przemysłu opierającego się na procesach specjalnych należy wymienić [235–237]:

- dużą energochłonność produkcji,
- wymagany duży udział kadry specjalistycznej,
- wymaganą znaczną automatyzację procesów,
- duży portfel technologiczny stawiający duże wymagania odnośnie parku maszynowego,
- dużą dynamikę rozwoju,
- wymagane wysokie nakłady na działalność innowacyjną – konieczność współpracy w zakresie B+R,
- zazwyczaj produkcję w systemie „business to business” (B2B),
- skomplikowany transport i magazynowanie,
- dużą zmienność ze względu na zmiany zapisów prawnych,
- znaczne ryzyko inwestycyjne,
- duży nacisk na ochronę środowiska,
- duże prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożeń w obszarze ochrony zdrowia pracowników i społeczeństwa,
- duże prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożeń dla ekosystemu,
- duży nacisk na dbałość i wdrożenie zasad czystszej produkcji i inne.

Rozwój i działania innowacyjne w przemyśle zachęcają do wdrażania innowacji w zakresie nowych komponentów, procesów i materiałów dzięki szybkiej, wirtualnej ocenie alternatywnych pomysłów.

Dzięki prototypowym modelom produktów i urządzeń, jak również modelowym liniom technologicznym, możemy mówić o wydajnym projektowaniu i organizacji – optymalizowaniu zasobów (czas, energia, reagenty, surowce) [234].

Przez procesy innowacyjne rozumie się całokształt czynności niezbędnych do przygotowania i praktycznego zastosowania nowych rozwiązań technicznych, a same procesy innowacyjne z reguły są wynikiem pracy zespołowej (interdyscyplinarnych zespołów pracowniczych), a nawet instytucji. Takie sprzężone procesy wymagają powiązania działań wszystkich współpracowników oraz zapewnienia odpowiednich warunków do realizacji innowacyjnych celów ogólnych [232, 238]. W każdym procesie innowacyjnym niezależnie od charakteru rozwiązań technicznych wyróżnić można następujące fazy:

- faza przygotowania – ujawnienie możliwości powstania nowego rozwiązania technicznego w celu zaspokojenia nowych potrzeb lub zaspokojenia znanych

potrzeb w odmienny sposób, ustalenie celu i kierunku nowego rozwiązania technicznego – w fazie tej duży nacisk stawiany jest na działania w obszarze badań i rozwoju;

- faza realizacji – urzeczywistnienie rozwiązania technicznego w formie prototypu, przekazanie projektu rozwiązania technicznego użytkownikom lub innym jednostkom wdrażającym, użytkowanie (eksploatacja) określonego obiektu technicznego – w fazie tej duży nacisk stawiany jest na proces modelowania i kontroli.

#### 5.4.2. Przygotowanie prototypu urządzenia do zautomatyzowanego procesu enkapsulacji proszku materiałem spoiwa

Biorąc pod uwagę planowanie i organizację procesów z mianem procesów specjalnych (np. procesów obróbki chemicznej lub cieplnej), wymagane jest, by postępować zgodnie z wytycznymi:

**Krok 1** Ocena zdolności przedsiębiorstwa – zebranie wiadomości o procesie technologicznym, z uwzględnieniem umiejętności sterowania parametrami procesu.

**Krok 2** Przegląd danych wejściowych procesu – ocena wyrobu w kontekście możliwości przeprowadzenia zabiegów technologicznych, ocena dostępności metod kontroli i badań jakościowych, ustalenie kryteriów odbioru wyrobu jako spełniającego wymagania.

**Krok 3** Ocena właściwości obrabianego materiału – ocena warunków technicznych obrabianego materiału w kontekście zamówień i dostaw, jak również w odniesieniu do kryteriów doboru pod względem jakości i identyfikowania.

**Krok 4** Ocena właściwości materiałów technologicznych (wspomagających proces) – ocena i ustalenie zasad i warunków dostawy i magazynowania materiałów w kontekście zamówień i dostaw.

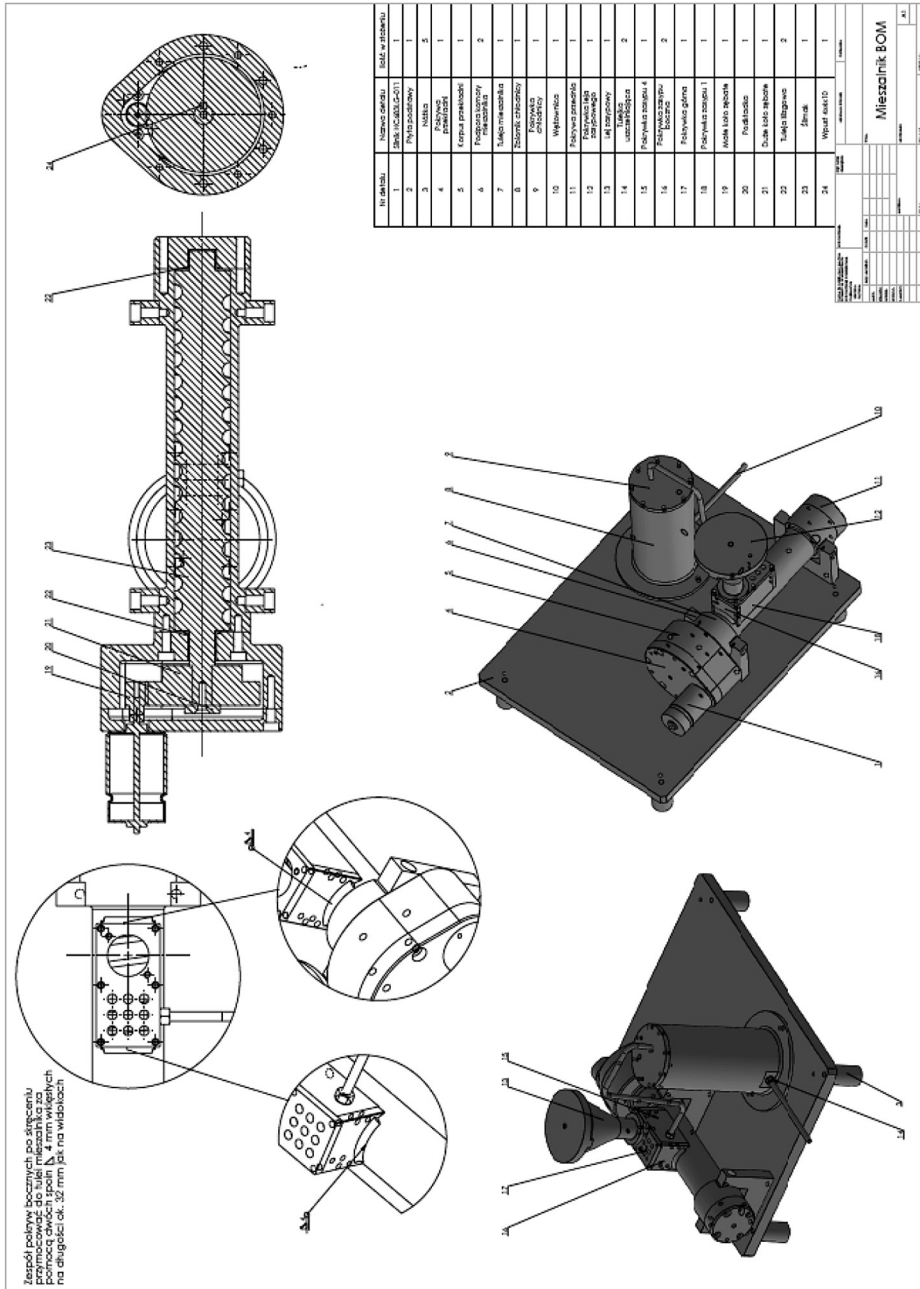
**Krok 5** Planowanie procesu produkcyjnego – tworzenie map procesu:

- w zakresie technologii,
- w zakresie monitorowania,
- w zakresie parku maszynowego,
- w zakresie walidacji.

**Krok 6** Uruchomienie procesu modelowego.

**Krok 7** Nadzór nad procesem w zakresie:

- urządzeń,
- materiału,
- dokumentacji,
- realizacji badań i pomiarów,
- wyrobów niezgodnych.



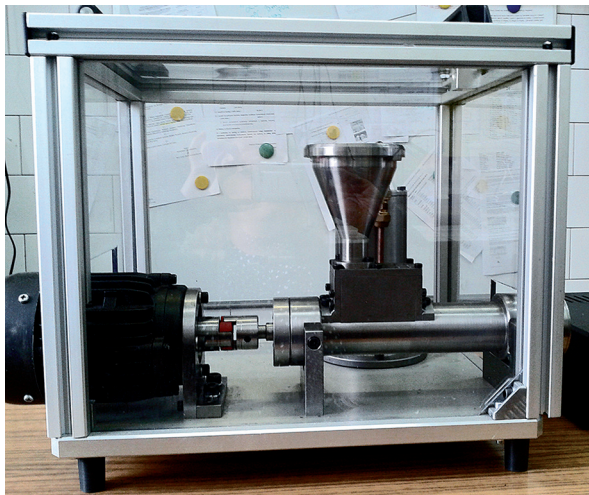
Rys. 5.25. Ogólny projekt urządzenia (mieszalnika) do enkapsulacji cząstek proszków magnetycznych – model konstrukcyjny złożeniowy

**Krok 8** Uruchomienie procesu właściwego.

**Krok 9** Doskonalenie – opracowanie sposobu zgłaszania pomysłów do doskonalenia, wdrożenie zmian zgodnie z cyklem Deminga.

Odnosząc się zatem do głównych celów projektu koncepcyjnego oraz opierając się na zaprezentowanych we wcześniejszych rozdziałach informacjach na temat możliwości technologicznych oraz wyników uzyskanych w zakresie badań i rozwoju procesu produkcji wyrobów z kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B, po procesach bienkapsulacji zaprojektowano i wykonano prototyp urządzenia (mieszalnika) do enkapsulacji cząstek proszków magnetycznych. Na Rys. 5.25 zaprezentowano ogólny projekt urządzenia, natomiast na Rys. 5.26 przedstawiono obraz mieszalnika wykonanego zgodnie z projektem.

Głównym zamierzeniem zaprojektowania i wprowadzenia do linii produkcyjnej urządzenia było umożliwienie oscylacyjnego mieszania wieloskładnikowych mas o wysokiej lepkości, w tym wypadku proszków magnetycznych ze spoiwem polimerowym.



Rys. 5.26. Mieszalnik do enkapsulacji cząstek proszków magnetycznych

Podstawowe elementy urządzenia to mieszalnik zintegrowany z systemem odprowadzającym i skraplającym opary rozpuszczalnika z przestrzeni roboczej mieszalnika, układ napędowy (silnik i przekładnia), system sterujący. Częścią roboczą mieszalnika jest standardowy cylinder z mieszadłem ślimakowym. Zastosowanie tego rozwiązania umożliwia nie tylko dokładne mieszanie, ale również dokładne sterowanie spustem wymieszanych składników kompozytu. Mechanizm spustowy zaprojektowano w ten sposób, by możliwe było bezpośrednie połączenie go z formami do kształtowania mieszanych mas. Natomiast połączenie formy do kształtowania

wyrobów z kompozytów magnetycznych z urządzeniem jest realizowane w taki sposób, by podczas spustu składniki (mieszanka kompozytowa, tj. cząstki proszku magnetycznego pokryte warstwą spoiwa) były wstępnie zagęszczone w komorze formy.

System sterujący urządzeniem umożliwia wybór dwóch trybów pracy: tryb mieszania oraz tryb spustu mieszanki. Dodatkowo możliwa jest płynna regulacja częstotliwości procesu mieszania oraz prędkości obrotów mieszadła ślimakowego.

Przewidując możliwość wykorzystywania do tworzenia mieszanek rozpuszczalników lotnych, urządzenie wyposażono w dodatkowy system umożliwiający odprowadzenie i skraplanie oparów powstających podczas procesu mieszania. Odzyskany w ten sposób rozpuszczalnik można ponownie wykorzystać do procesu technologicznego, co jest niezmiernie istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa.

W ramach przygotowania do uruchomienia procesu zabezpieczania cząstek proszku na większą skalę wykonano prototyp urządzenia, tj. oscylacyjnego mieszalnika do mieszania mas o wysokiej lepkości. Zgodnie z przedstawionym projektem w mieszalniku zastosowano system odprowadzania i skraplania oparów rozpuszczalnika z przestrzeni roboczej mieszalnika oraz połączono spust komory tłoczącej z formami do prasowania próbek. Zastosowanie nowatorskiego urządzenia do enkapsulacji cząstek proszków pozwoliło na odpowiednią homogenizację kompozycji proszkowych, a ponadto wyeliminowało konieczność wielokrotnego przemieszczania proszków do pojemników magazynujących, co w efekcie usprawniło proces produkcji magnesów wiązanych żywicą epoksydową.

#### 5.4.3. Ocena możliwości wdrożenia innowacji procesowej na podstawie statystycznej kontroli procesu

Aby ocenić, czy prototyp oscylacyjnego mieszalnika do mieszania mas o wysokiej lepkości będzie możliwy do produkcji materiałów magnetycznych na bazie proszków po enkapsulacji na skalę przemysłową, przeprowadzono serie procesów próbnych. Najistotniejsze okazało się, by dokonać oceny powtarzalności procesu – powtarzalności pod względem spełnienia kryteriów zatwierdzających wyrób jako zgodny. W produkcji testowej uznano, że parametrem kontrolnym dla oceny stabilności procesu będzie twardość mierzona metodą Brinella. Wybór metody pomiarowej pokierowany był przede wszystkim łatwością wykonania pomiaru oraz dostępnością przedsiębiorstw do narzędzi testujących.

Badania twardości magnesów z proszku Nd-Fe,Co-B po bienkapsulacji wiązanych żywicą epoksydową przeprowadzono metodą Brinella zgodnie z normą PNEN ISO 65061:2002. Ze względu na dużą porowatość magnesów wiązanych do pomiaru wykorzystano węgelnik kulkowy o średnicy 2,5 mm przy obciążeniu 62,5 kg. Twardość Brinella, jako wartość proporcjonalna do stosunku obciążenia  $F$

do powierzchni czaszy kulistej trwałego odcisku  $S$ , obliczano na podstawie zmierzonej średnicy odcisku trwałego ze wzoru (5.1):

$$HB = \frac{0,204F}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (5.1)$$

gdzie:

- $F$  – obciążenie,
- $D$  – średnica kulki wgnętnika,
- $d$  – średnica odcisku trwałego po przyłożeniu obciążenia  $F$ .

W Tabeli 5.14 zestawiono wyniki pomiarów dla 25 detali, każdy detal został poddany badaniu 5-krotnie.

Tabela 5.14

Wyniki pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa

Detal	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	71,5	70,1	69,3	70,2	71,6
2	70,8	71,5	71,6	70,1	67,3
3	69,3	69,6	67,3	71,5	71,6
4	71,5	71,6	70,8	69,6	70,2
5	70,8	69,4	71,5	67,3	67,3
6	68,1	71,3	69,4	71,5	68,3
7	67,3	70,1	68,1	71,6	70,8
8	71,6	70,4	71,3	69,4	71,6
9	68,8	68,3	71,5	70,1	70,1
10	70,4	71,5	70,5	70,8	70,2
11	70,2	71,5	70,2	71,5	67,8
12	68,7	70,8	67,3	69,4	69,8
13	68,1	69,2	71,5	71,6	67,3
14	71,7	71,5	69,4	71,3	69,6
15	71,8	70,2	74,1	68,1	68,5
16	74,4	71,3	70,3	71,5	66,8
17	71,5	68,1	67,3	69,6	71,6
18	70,1	70,8	71,5	71,3	67,3
19	69,9	68,1	69,6	71,5	73,8
20	71,5	68,1	71,3	70,2	71,5
21	69,3	70,2	70,8	71,1	66,8
22	69,6	69,3	69,1	69,6	73,8
23	69,8	70,3	71,6	71,5	72,8
24	71,3	71,6	74,6	71,5	68,1
25	72,1	69,4	71,5	71,1	71,6



Statystyczna kontrola modelowego procesu z wykorzystaniem prototypu urządzenia bazowała na kartach kontrolnych. Na podstawie pomiarów twardości sprawdzano stabilność procesu oraz poszukiwano ewentualnych rozregulowań. Obserwacja trendów zmian miała na celu wczesne podjęcie działań korygujących, zapobiegając tym samym wyjściu kontrolowanego parametru poza określone granice.

W pierwszej kolejności na podstawie zbioru liczącego łącznie  $n = 125$  danych dotyczących pomiarów twardości wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa dokonano kalkulacji podstawowych miar statystycznych, których wyniki przedstawiono w Tabeli 5.15.

Tabela 5.15

Miary statystyczne do analizy zbioru danych dotyczących pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa

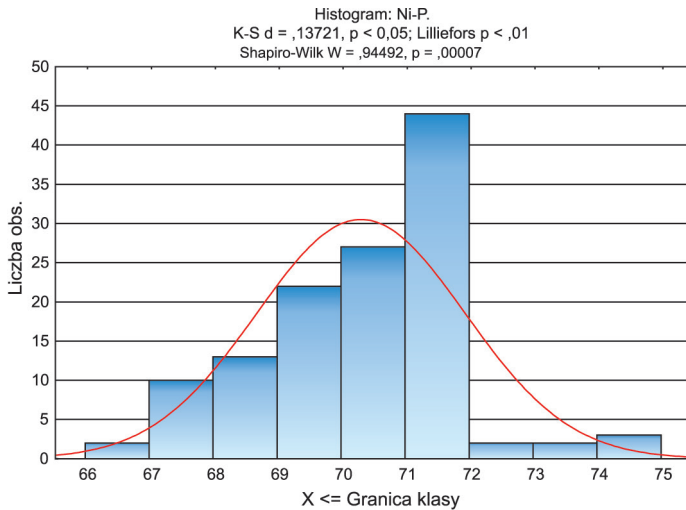
N ważnych	Średnia	Mediana	Moda	Liczność mody	Minimum	Maksimum
125	70,28	70,3	71,5	21	66,8	74,6
Dolny kwartył	Górny kwartył	Rozstęp	Odch. std.	Wsp. zmn.	Skośność	Kurtoza
69,4	71,5	7,8	1,634	2,325	-0,117	0,004

Dla próby badawczej średnia wartość twardości wynosi 70,28 HB (*średnia*), z kolei przeciętne zróżnicowanie wyników  $\pm 1,634$  HB (*odchylenie standardowe*). Najmniejsza odnotowana wartość twardości to 66,8 HB (*min*), z kolei największa to 74,6 HB (*max*), stąd wynika, że rozstęp wyników wynosi 1,3 (*rozstęp*). Zmienność zebranych wyników jest na poziomie 2,325% (*współczynnik zmienności*), co oznacza małe zróżnicowanie. Najczęściej występująca wartość twardości (*moda*) to 71,5 HB, która wystąpiła 21 razy. Wartość środkowa (*mediana*) wynosi 70,3 HB, co oznacza, że:

- 50% wartości twardości było większych od 70,3 HB, a 50% mniejszych od 70,3 HB,
- 25% zebranych wyników twardości ma wartość niższą od 69,4 HB bądź równą jej,
- 75% ma wartość równą 69,4 HB bądź większą od niej (*kwartył pierwszy*),
- 75% zebranych wyników twardości ma wartość równą 71,5 HB bądź niższą od niej,
- 25% wyników twardości jest równa 71,5 HB bądź większa od niej (*kwartył trzeci*).

Rozkład badanej cechy (twardości HB) jest lewostronnie asymetryczny. Potwierdza to wartość współczynnika skośności (*skośność*) mniejsza od 0. Z kolei dodatnia wartość współczynnika skupienia (*kurtoza*) określa, że analizowany rozkład jest bardziej wysmukły niż w przypadku krzywej normalnej.

Na podstawie uzyskanych wyników skonstruowano rozkład empiryczny – histogram dla analizy zebranych danych dotyczących twardości wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa na podstawie 125 zebranych wyników (Rys. 5.27).

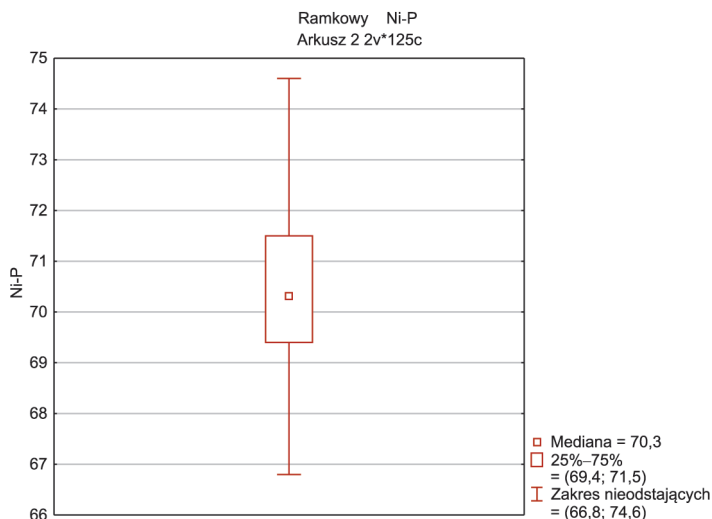


Rys. 5.27. Histogram wyników dotyczących pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa

Histogram potwierdza rozkład lewostronnie asymetryczny zebranych danych dotyczących twardości HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa. Najczęściej występujące wartości twardości zawierały się w przedziale 71–72 HB. Wykonane testy normalności Lillieforsa oraz Shapiro-Wilka wskazują, że analizowany rozkład twardości odbiega od rozkładu normalnego ( $p < 0,05$ ).

Wykorzystano wykres ramka-wąsy (mediana – kwartyle – rozstęp) dla zobrazowania rozkładu twardości w badanej zbiorowości, co uwidacznia Rys. 5.28. Jak wynika z przedstawionego wykresu, 50% środkowych danych dotyczących twardości mieści się w granicach od 69,4 do 71,5 HB. Zakres wartości nieodstających twardości obejmował wartości z przedziału od 66,8 do 74,6 HB.

Oceniono również, czy wyniki z pobranych próbek (5-elementowych) były przewidywalne w czasie. W tym celu skonstruowano kartę kontrolną  $\bar{X} - R$ . Ze względu na fakt, że rozkład zebranych danych jest inny niż normalny granice kontrolne dla karty kontrolnej  $\bar{X}$  obliczono na podstawie wartości kurtozy i skośności rozkładu. Wynik konstrukcji karty kontrolnej  $\bar{X} - R$  przedstawiono na Rys. 5.29.

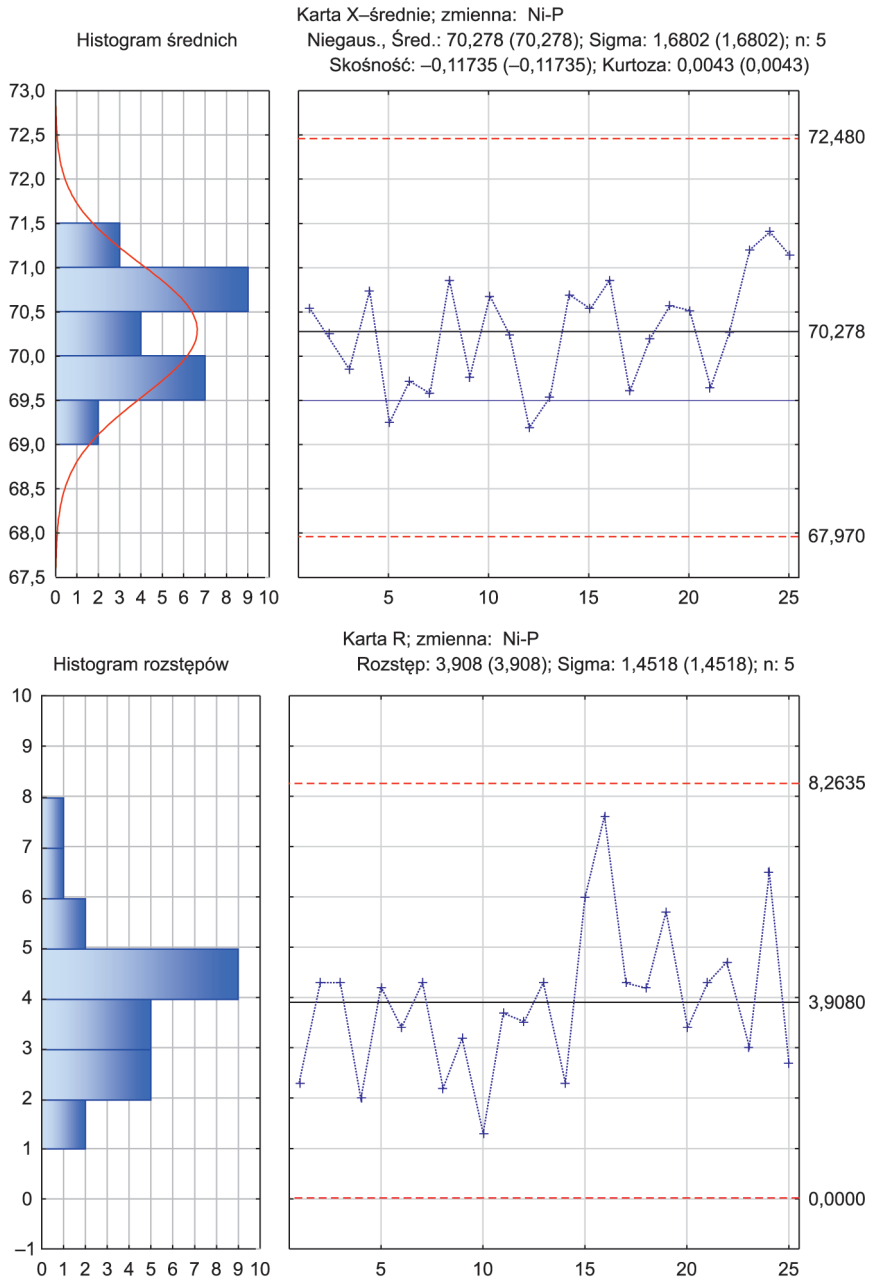


Rys. 5.28. Wykres ramka-wąsy dla analizy rozkładu wartości pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa

Z zaprezentowanych karta kontrolnych  $\bar{X} - R$  dla wartości pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa wynika, że badany parametr jest stabilny (przewidywalny) w czasie. Zarówno na karcie, jak i na karcie  $R$  nie ma punktów wskazujących na rozregulowanie (brak punktów poza granicami kontrolnymi). Nie widać także nielosowych zmian w przebiegu procesu, takich jak trendy czy skoki wartości średniej.

Aby potwierdzić tę hipotezę, zastosowano test konfiguracji (zwany też testem wzorca przebiegu) dla karty  $\bar{X}$ . W celu zdefiniowania sygnałów o rozregulowaniu, obszar poniżej i powyżej linii centralnej został podzielony na trzy strefy: A, B i C – zgodnie z zapisem normy PN-ISO 8258+AC1 (Testy konfiguracji przyczyn wyznaczalnych według Shewarta).

W dalszej analizie wyników w celu zdefiniowania sygnałów o rozregulowaniu przyjęto szerokość granic zdolności procesu  $\pm 3\sigma$ . Co oznacza, że ze względu na oddziaływania różnego rodzaju zakłóceń losowych kontrolowana cecha wahać się będzie wokół wartości średniej. Na podstawie zasady „sześciu sigma” cecha wahać się będzie w zakresie średnio  $\pm 3\sigma$ .



Rys. 5.29. Karta kontrolna  $\bar{X}-R$  dla wartości pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa

Tabela 5.16

Testy konfiguracji dla karty  $\bar{X}$  dla pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa

Strefy A/B/C: 3,000/2,000/1,000 *Sigma Testy konfiguracji	Ni-P ; Testy konfiguracji Karta $\bar{X}$ -średnie Linia centralna: 70,277600 Sigma: 0,751403	
	od próbki	do próbki
9 po tej samej stronie l. centralnej	OK	OK
6 w trendzie rosnącym/malejącym	OK	OK
14 naprzemiennie w górę i w dół	OK	OK
2 z 3 w strefie A lub dalej	OK	OK
4 z 5 w strefie B lub dalej	OK	OK
15 w strefie C	OK	OK
8 poza strefą C	OK	OK

Przeprowadzone testy konfiguracji potwierdzają przyjętą hipotezę, ponieważ na karcie  $\bar{X}$  dla pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa brak jest charakterystycznych układów kolejnych punktów wskazujących na rozregulowanie procesu.

Zastosowanie karty kontrolnej  $\bar{X} - R$  do oceny przewidywalności wartości twardości pozwoliło uzyskać wiele cennych informacji. Parametr twardości w badanym okresie był przewidywalny (brak próbek na karcie kontrolnej poza granicami kontrolnymi i sygnału świadczącego o rozregulowaniu procesu w postaci specyficznych układów punktów).

Aby zobrazować, w których z badanych detali występowały największe i najmniejsze wartości twardości oraz w których próbkach były wyniki mniejsze oraz większe, jak wartość nominalna twardości, wykorzystano mapę kolorów. Wyniki analizy przedstawione zostały na Rys. 5.30. Na podstawie mapy kolorów pomiarów dla kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa można zaobserwować, że jeden detal może być charakteryzowany zarówno przez wyniki najwyższe, jak i wyniki najniższe. Rozrzut wartości mierzonej cechy w obrębie jednego detalu wynika ze specyfiki struktury gotowej wypraski. Jednoosiowe prasowanie proszków w matrycy o cylindrycznym kształcie sprzyja większemu zagęszczeniu materiału proszkowego w obrębie zewnętrznej części objętości detalu (podczas testów twardości nie ustalono procedury nadania kolejności obszarów, na których dokonywano pomiaru).

Próbka	X1	X2	X3	X4	X5	Próbka	X1	X2	X3	X4	X5
1	71,5	70,1	69,3	70,2	71,6	1	71,5	70,1	69,3	70,2	71,6
2	70,8	71,5	71,6	70,1	67,3	2	70,8	71,5	71,6	70,1	67,3
3	69,3	69,6	67,3	71,5	71,6	3	69,3	69,6	67,3	71,5	71,6
4	71,5	71,6	70,8	69,6	70,2	4	71,5	71,6	70,8	69,6	70,2
5	70,8	69,4	71,5	67,3	67,3	5	70,8	69,4	71,5	67,3	67,3
6	68,1	71,3	69,4	71,5	68,3	6	68,1	71,3	69,4	71,5	68,3
7	67,3	70,1	68,1	71,6	70,8	7	67,3	70,1	68,1	71,6	70,8
8	71,6	70,4	71,3	69,4	71,6	8	71,6	70,4	71,3	69,4	71,6
9	68,8	68,3	71,5	70,1	70,1	9	68,8	68,3	71,5	70,1	70,1
10	70,4	71,5	70,5	70,8	70,2	10	70,4	71,5	70,5	70,8	70,2
11	70,2	71,5	70,2	71,5	67,8	11	70,2	71,5	70,2	71,5	67,8
12	68,7	70,8	67,3	69,4	69,8	12	68,7	70,8	67,3	69,4	69,8
13	68,1	69,2	71,5	71,6	67,3	13	68,1	69,2	71,5	71,6	67,3
14	71,7	71,5	69,4	71,3	69,6	14	71,7	71,5	69,4	71,3	69,6
15	71,8	70,2	74,1	68,1	68,5	15	71,8	70,2	74,1	68,1	68,5
16	74,4	71,3	70,3	71,5	66,8	16	74,4	71,3	70,3	71,5	66,8
17	71,5	68,1	67,3	69,6	71,6	17	71,5	68,1	67,3	69,6	71,6
18	70,1	70,8	71,5	71,3	67,3	18	70,1	70,8	71,5	71,3	67,3
19	69,9	68,1	69,6	71,5	73,8	19	69,9	68,1	69,6	71,5	73,8
20	71,5	68,1	71,3	70,2	71,5	20	71,5	68,1	71,3	70,2	71,5
21	69,3	70,2	70,8	71,1	66,8	21	69,3	70,2	70,8	71,1	66,8
22	69,6	69,3	69,1	69,6	73,8	22	69,6	69,3	69,1	69,6	73,8
23	69,8	70,3	71,6	71,5	72,8	23	69,8	70,3	71,6	71,5	72,8
24	71,3	71,6	74,6	71,5	68,1	24	71,3	71,6	74,6	71,5	68,1
25	72,1	69,4	71,5	71,1	71,6	25	72,1	69,4	71,5	71,1	71,6

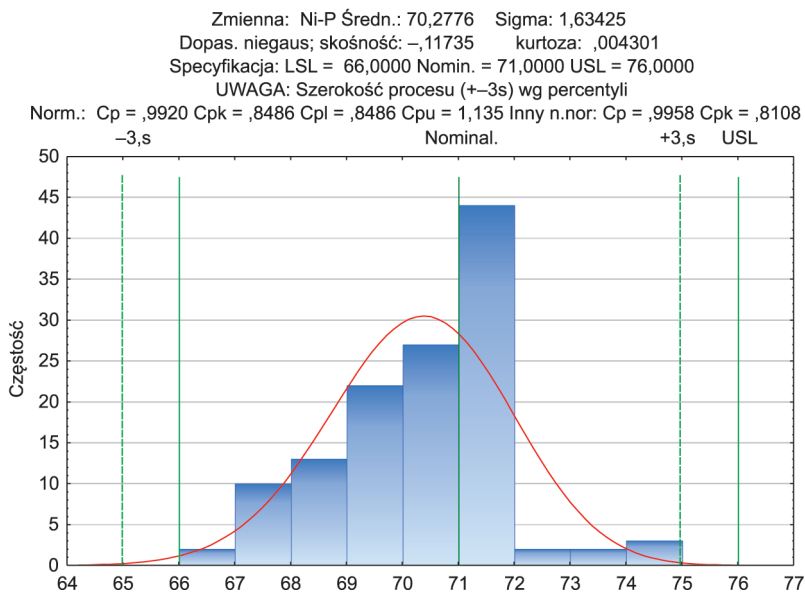
Rys. 5.30. Mapy kolorów do identyfikacji rozkładu wartości pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa w kolejnych próbkach oraz identyfikacji wartości mniejszych lub większych od nominalnej

Dokonano oceny zdolności jakościowej badanego parametru. Do obliczenia wskaźników zdolności  $C_p$  i  $C_{pk}$  potrzebna jest dolna i górna granica tolerancji. Wartość nominalna twardości dla wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa wynosi 71 HB. Dopuszczalne odchylenie to  $\pm 5\%$ , stąd dolna granica tolerancji ( $USL$ ) wynosi 76 HB, natomiast górna ( $LSL$ ) – 66 HB. Ze względu na to, że rozkład badanych danych nie jest rozkładem normalnym szerokość procesu obliczono według percentyli. Wyniki analizy przedstawiono na Rys. 5.31.

Przyjęto szerokość granic zdolności procesu  $\pm 3\sigma$ , a na podstawie przeprowadzonych kalkulacji wyznaczono wskaźnik  $C_p = 0,9958$ . Dodatkowo kurtoza jest różna od 0 ( $k = 0,0042$ ), co oznacza, że rozkład ma charakter leptokurtyczny (wysmukły), zatem dużo uzyskanych wyników twardości jest zbliżonych do wartości średniej.

Ze względu na to, że wskaźnik  $C_{pk} \neq C_p$ , można stwierdzić, że średnia wartość twardości nie jest wycentrowana względem wartości nominalnej. Jest ona przesunięta w stronę wartości mniejszych niż wartość nominalna ( $\bar{X} = 70,278 < X_{nom} = 71$ ).

Porównawczo przeprowadzono również wnikliwą analizę statystyczną dla procesu wytwórczego detali z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie



Rys. 5.31. Położenie i rozkład wyników pomiarów twardości metodą Brinella wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa na tle granic tolerancji

bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa. Podobnie jak w poprzednim przypadku opracowano zbiór wyników pomiarów twardości metodą Brinella – zbiór liczył łącznie  $n = 125$  (Tabela 5.17). Na podstawie danych tabelarycznych dokonano kalkulacji podstawowych miar statystycznych, których wyniki przedstawiono w Tabeli 5.18.

Tabela 5.17

Wyniki pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa

Detal	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	77,7	78,3	76,8	76,5	78,3
2	77,1	76,9	73,3	77,3	76,9
3	76,7	76,4	76,5	76,8	76,5
4	77,4	77,3	77,9	76,9	77,1
5	77,9	79,1	73,3	76,8	77,4
6	76,9	76,6	77,9	77,8	78,3
7	76,5	77,3	76,8	76,9	76,6
8	79,8	76,8	77,1	77,3	76,4
9	78,3	77,4	75,5	78,0	77,1

10	77,4	79,1	79,9	76,9	78,8
11	75,9	77,3	76,9	79,8	76,6
12	76,8	76,5	76,4	77,3	78,3
13	77,1	77,0	79,8	76,7	76,8
14	74,9	77,3	79,4	75,2	73,1
15	79,1	76,9	79,3	77,3	77,4
16	77,8	80,1	75,3	76,7	77,1
17	76,8	75,1	79,4	77,8	77,4
18	77,1	78,3	76,7	77,3	76,9
19	76,4	79,4	72,8	79,4	77,1
20	76,9	76,6	77,4	76,8	76,9
21	77,9	77,3	77,8	76,8	76,7
22	78,3	76,7	76,9	76,6	76,9
23	73,1	77,1	77,4	77,3	77,1
24	77,9	76,6	73,3	77,8	76,7
25	77,3	76,7	76,9	76,9	79,1

Tabela 5.18

Miary statystyczne do analizy zbioru danych dotyczących pomiarów twardości metodą HB wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa

N ważnych	Średnia	Mediana	Moda	Liczność mody	Minimum	Maksimum
125	77,14	77,1	76,9	15	72,8	80,1
Dolny kwartyl	Górny kwartyl	Rozstęp	Odch. std.	Wsp. zmn.	Skośność	Kurtoza
76,7	77,8	7,3	1,341	1,739	-0,736	2,450

Średnia wartość twardości wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa wynosi 77,14 HB (*średnia*), a przeciętne zróżnicowanie wyników  $\pm 1,341$  HB (*odchylenie standardowe*). Najmniejsza odnotowana wartość twardości to 72,8 HB (*min*), z kolei największa to 80,1 HB (*max*), stąd wynika, że rozstęp wyników wynosi 7,3 (*rozstęp*). Zmienność zebranych wyników jest na poziomie 1,739% (*współczynnik zmienności*), co oznacza małe zróżnicowanie. Najczęściej występująca wartość twardości (*moda*) to 76,9 HB, która wystąpiła 15 razy. Wartość środkowa (*mediana*) wynosi 77,1 HB, co oznacza, że:

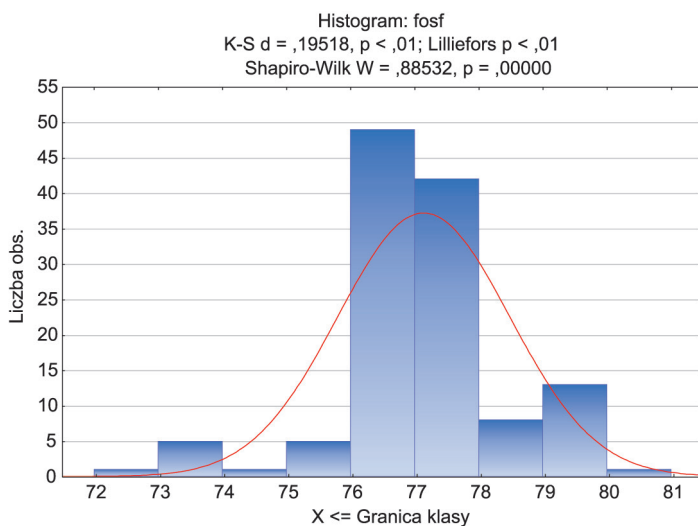
- 50% wartości twardości było większych od 77,1 HB, a 50% mniejszych od 76,7 HB,
- 25% zebranych wyników twardości ma wartość niższą od 69,4 HB bądź równą jej,



- 75% ma wartość równą 76,7 HB bądź większą od niej (*kwartył pierwszy*),
- 75% zebranych wyników twardości ma wartość niższą od 77,8 HB bądź równą jej,
- 25% wyników twardości jest równa 77,8 HB bądź większa od niej (*kwartył trzeci*).

Rozkład badanej cechy jest wyraźnie lewostronnie asymetryczny. Potwierdza to wartość współczynnika skośności (*skośność*) dużo mniejsza od 0. Z kolei dodatnia wartość współczynnika skupienia (*kurtoza*) określa, że analizowany rozkład jest wyraźnie bardziej wysmukły niż w przypadku krzywej normalnej.

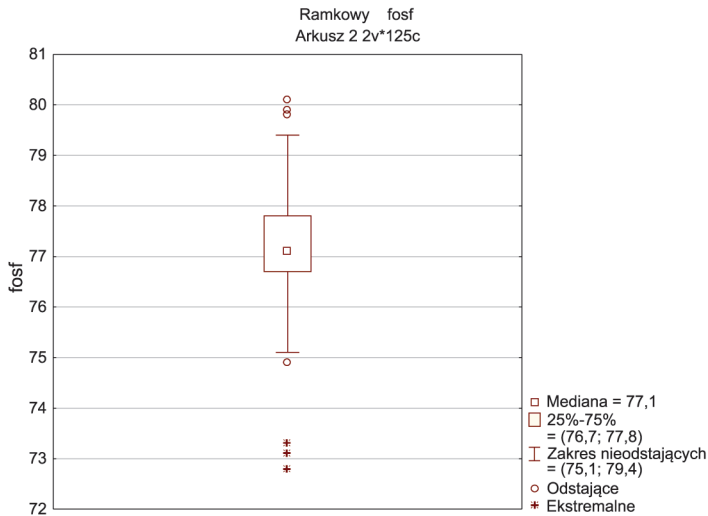
Na podstawie uzyskanych wyników i do analizy zebranych danych skonstruowano również rozkład empiryczny dotyczący twardości wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa. Rozkład empiryczny – histogram – wyznaczono na podstawie 125 zebranych wyników (Rys. 5.32).



Rys. 5.32. Histogram wyników dotyczących pomiarów twardości metodą Brinella dla wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa

Histogram skonstruowany na podstawie wyników pomiarów twardości metodą Brinella dla wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa potwierdza rozkład lewostronnie asymetryczny.

Najczęściej występujące wartości twardości zawierały się w przedziale 76–77 HB. Wykonane testy normalności Lillieforsa oraz Shapiro-Wilka wskazują, że analizowany rozkład wyników pomiaru twardości odbiega od rozkładu normalnego ( $p < 0,05$ ).



Rys. 5.33. Wykres ramka-wąsy dla analizy rozkładu wartości pomiarów twardości metodą Brinella dla wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa

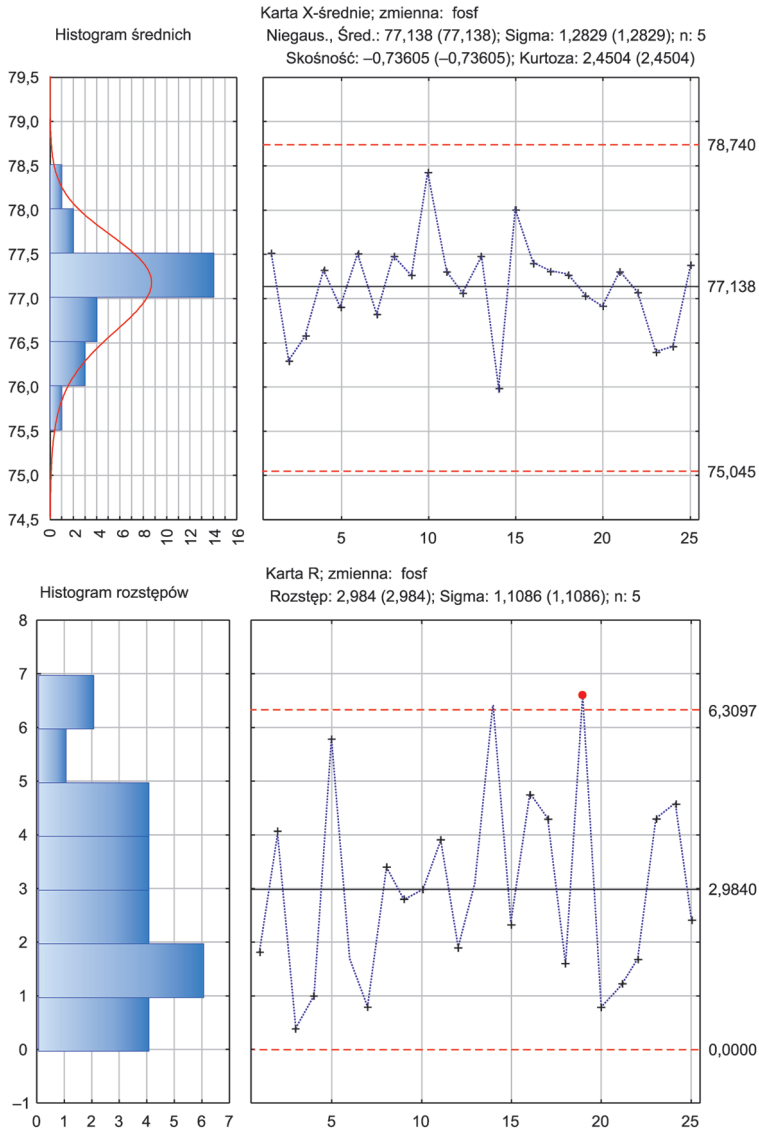
Dla zobrazowania rozkładu wartości pomiarów twardości metodą Brinella dla wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa wykorzystano wykres ramka-wąsy (mediana – kwartyle – rozstęp) – Rys. 5.33.

Jak wynika z przedstawionego wykresu, połowa danych dotyczących twardości mieści się w granicach od 76,7 do 77,1 HB. Zakres wartości nieodstających obejmował wartości z przedziału od 77,1 do 79,4 HB. Widoczne są punkty odstające i ekstremalne. Punkty odstające to takie wartości twardości, które różnią się od średniej o więcej niż dwa odchylenia standardowe, z kolei punkty ekstremalne różnią się od wartości średniej o trzy odchylenia standardowe.

Oceniono również, czy wyniki z pobranych próbek są stabilne i przewidywalne w czasie (przewidywalne). W tym celu skonstruowano kartę kontrolną  $\bar{X} - R$ . Ze względu na fakt, że rozkład zebranych danych jest inny niż normalny granice kontrolne dla karty kontrolnej  $\bar{X}$  obliczono na podstawie wartości kurtozy i skośności rozkładu. Wyniki konstrukcji karty kontrolnej  $\bar{X} - R$  zaprezentowane zostały na Rys. 5.34.

Na podstawie karty kontrolnej  $\bar{X} - R$  wartości pomiarów twardości metodą Brinella wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa można stwierdzić, że badany parametr jest stabilny w czasie. Na karcie  $\bar{X}$  nie pojawiają się punkty wskazujące na rozregulowanie (brak punktów poza granicami kontrolnymi). Podobnie jak w przypadku poprzed-

niego pomiaru parametrów twardości (dla bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa), nie widać także nielosowych zmian w przebiegu procesu, takich jak trendy czy skoki wartości średniej. Aby potwierdzić tę hipotezę, również zastosowano testy konfiguracji dla karty  $\bar{X}$ .



Rys. 5.34. Karta kontrolna  $\bar{X}-R$  dla wartości pomiarów twardości metodą Brinella wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa

Tabela 5.19

Testy konfiguracji dla karty  $\bar{X}$  dla pomiarów twardości metodą Brinell wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa

Strefy A/B/C: 3,000/2,000/1,000 *Sigma Testy konfiguracji	Testy konfiguracji Karta $\bar{X}$ -średnie Linia centralna: 70,277600 Sigma: 0,751403	
	od próbki	do próbki
9 po tej samej stronie l. centralnej	OK	OK
6 w trendzie rosnącym/malejącym	OK	OK
14 naprzemiennie w górę i w dół	OK	OK
2 z 3 w strefie A lub dalej	OK	OK
4 z 5 w strefie B lub dalej	OK	OK
15 w strefie C	OK	OK
8 poza strefą C	OK	OK

Przeprowadzone testy konfiguracji potwierdzają przyjętą hipotezę – brak charakterystycznych układów kolejnych punktów wskazujących na rozregulowanie procesu. Karta kontrolna R wykazała rozregulowanie dla detalu nr 19, w którym to odnotowano najmniejszą wartość twardości ( $X_{\min}$ ) w całym zbiorze danych. Czy wynik ten należy uznać za błąd gruby? Karta informuje także, że w przypadku detalu nr 14 punkt jest na górnej granicy kontrolnej, co świadczy o pojawieniu się w próbce wyniku znacznie odbiegającego od pozostałych co do wartości (była to druga co do wartości, najmniejsza wartość twardości w całym zbiorze).

Zastosowanie karty kontrolnej  $\bar{X} - R$  do oceny przewidywalności wartości twardości pozwoliło określić, że parametr twardości w badanym okresie był przewidywalny (brak próbek na karcie kontrolnej poza granicami kontrolnymi i sygnału świadczącego o rozregulowaniu procesu w postaci specyficznych układów punktów).

Wykorzystano mapę kolorów w celu zorientowania się, w których detalach występowały największe i najmniejsze wartości twardości mierzone metodą Brinella oraz w których próbkach były wyniki mniejsze oraz większe od wartości nominalnej. Wyniki analizy przedstawiono na Rys. 5.35. Podobnie jak w przypadku pomiarów dla kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa również dla tej grupy wyrobów na podstawie mapy kolorów można zaobserwować, że jeden detal może być charakteryzowany zarówno przez wyniki najwyższe, jak i wyniki najniższe. Jedynie pojedyncze detale mają przewagę skrajnych wyników (np. detal 3). Rozrzut wartości mierzonej cechy w obrębie jednego detalu wynika ze specyfiki struktury gotowej wypraski.

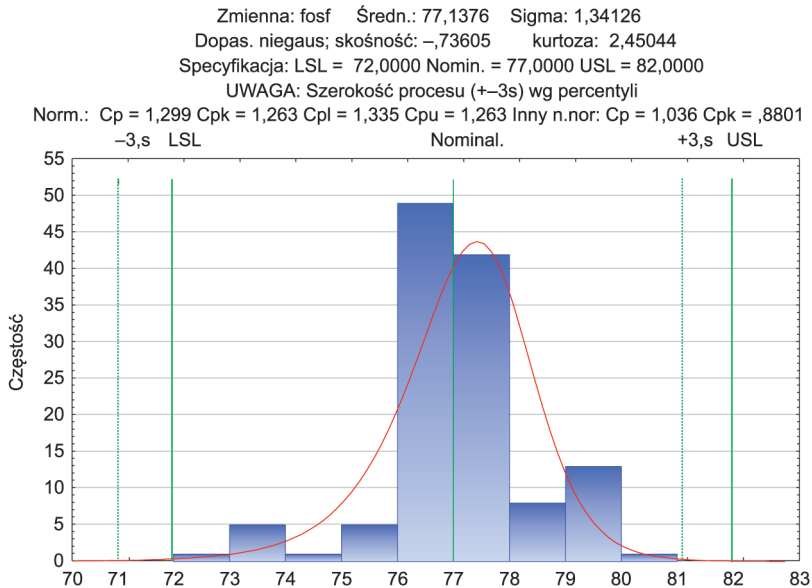
Próbka	X1	X2	X3	X4	X5	Próbka	X1	X2	X3	X4	X5
1	77,7	78,3	76,8	76,5	78,3	1	77,7	78,3	76,8	76,5	78,3
2	77,1	76,9	73,3	77,3	76,9	2	77,1	76,9	73,3	77,3	76,9
3	76,7	76,4	76,5	76,8	76,5	3	76,7	76,4	76,5	76,8	76,5
4	77,4	77,3	77,9	76,9	77,1	4	77,4	77,3	77,9	76,9	77,1
5	77,9	79,1	73,3	76,8	77,4	5	77,9	79,1	73,3	76,8	77,4
6	76,9	76,6	77,9	77,8	78,3	6	76,9	76,6	77,9	77,8	78,3
7	76,5	77,3	76,8	76,9	76,6	7	76,5	77,3	76,8	76,9	76,6
8	79,8	76,8	77,1	77,3	76,4	8	79,8	76,8	77,1	77,3	76,4
9	78,3	77,4	75,5	78,0	77,1	9	78,3	77,4	75,5	78,0	77,1
10	77,4	79,1	79,9	76,9	78,8	10	77,4	79,1	79,9	76,9	78,8
11	75,9	77,3	76,9	79,8	76,6	11	75,9	77,3	76,9	79,8	76,6
12	76,8	76,5	76,4	77,3	78,3	12	76,8	76,5	76,4	77,3	78,3
13	77,1	77,0	79,8	76,7	76,8	13	77,1	77,0	79,8	76,7	76,8
14	74,9	77,3	79,4	75,2	73,1	14	74,9	77,3	79,4	75,2	73,1
15	79,1	76,9	79,3	77,3	77,4	15	79,1	76,9	79,3	77,3	77,4
16	77,8	80,1	75,3	76,7	77,1	16	77,8	80,1	75,3	76,7	77,1
17	76,8	75,1	79,4	77,8	77,4	17	76,8	75,1	79,4	77,8	77,4
18	77,1	78,3	76,7	77,3	76,9	18	77,1	78,3	76,7	77,3	76,9
19	76,4	79,4	72,8	79,4	77,1	19	76,4	79,4	72,8	79,4	77,1
20	76,9	76,6	77,4	76,8	76,9	20	76,9	76,6	77,4	76,8	76,9
21	77,9	77,3	77,8	76,8	76,7	21	77,9	77,3	77,8	76,8	76,7
22	78,3	76,7	76,9	76,6	76,9	22	78,3	76,7	76,9	76,6	76,9
23	73,1	77,1	77,4	77,3	77,1	23	73,1	77,1	77,4	77,3	77,1
24	77,9	76,6	73,3	77,8	76,7	24	77,9	76,6	73,3	77,8	76,7
25	77,3	76,7	76,9	76,9	79,1	25	77,3	76,7	76,9	76,9	79,1

Rys. 5.35. Mapy kolorów do identyfikacji rozkładu wartości pomiarów twardości metodą Brinella dla wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie biekapsulacji fosforan/żywica epoksydowa w kolejnych próbkach oraz identyfikacji wartości mniejszych lub większych od nominalnej

Dokonano oceny zdolności jakościowej na podstawie parametru twardości metodą Brinella dla wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie biekapsulacji fosforan/żywica epoksydowa – oceny dokonano na podstawie identyfikacji wartości mniejszych lub większych od nominalnej. Do obliczenia wskaźników zdolności  $C_p$  i  $C_{pk}$  wykorzystano dolną i górną granicę tolerancji. Wartość nominalna twardości wynosi 77 HB. Przyjęto, że dopuszczalne odchylenie to  $\pm 5\%$ , stąd dolna granica tolerancji ( $USL$ ) wynosi 82 HB, natomiast górna ( $LSL$ ) – 72 HB. Ze względu, że rozkład badanych danych nie jest rozkładem normalnym, szerokość procesu obliczono wg percentyli – Rys. 5.36.

Otrzymany wynik wskaźnika  $C_p = 1,036$  mówi nam, że rozrzut badanego procesu jest 1,036 razy mniejszy od przyjętych granic tolerancji. Ze względu na to, że wskaźnik  $C_{pk} \neq C_p$ , można stwierdzić, że parametr twardości (jego średnia wartość) nie jest wycentrowany względem wartości nominalnej. Jest on przesunięty w stronę wartości większych niż wartość nominalna ( $\bar{X} = 77,137 > X_{nom} = 77$ ).

Na Rys. 5.37 zaprezentowano porównanie wyników uzyskanych podczas statystycznej analizy procesu dla pomiarów twardości metodą Brinella wyrobów z kom-

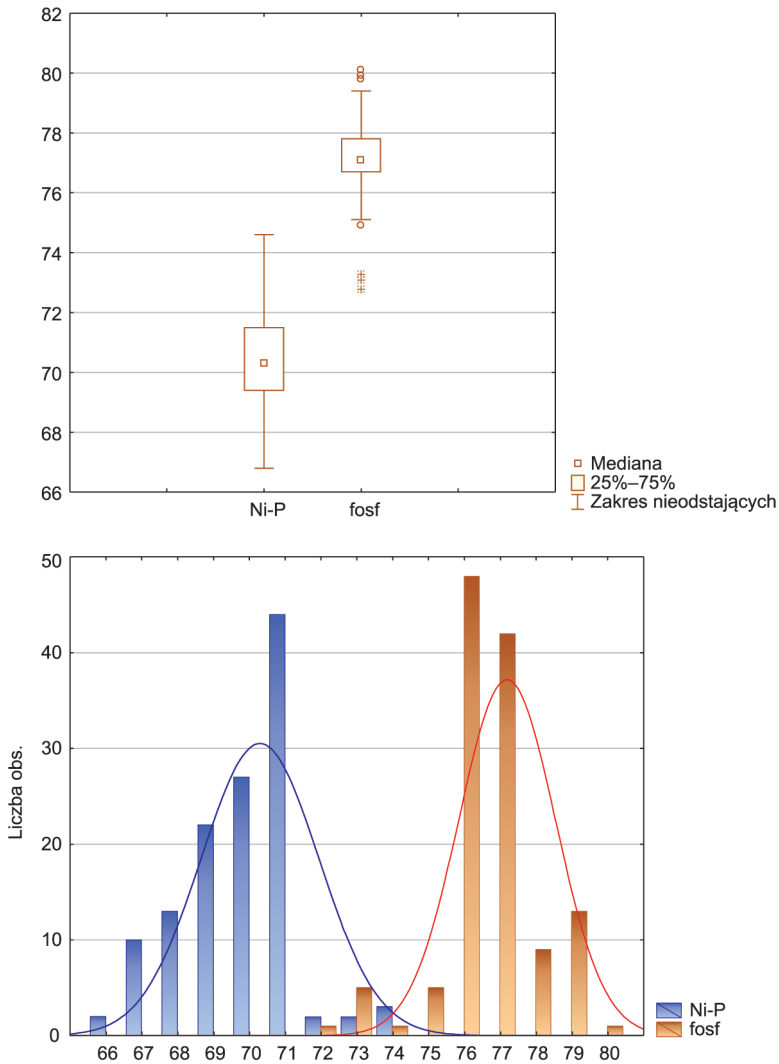


Rys. 5.36. Położenie i rozkład wyników pomiarów twardości metodą Brinella wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji fosforan/żywica epoksydowa na tle granic tolerancji

pozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie dwóch rodzajów bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa oraz fosforan/żywica epoksydowa.

Porównania dokonano na podstawie wykresu ramka-wąsy oraz histogramu wyników pomiarów twardości metodą Brinella. Na podstawie przeprowadzonej statystycznej kontroli procesu, której głównymi parametrami były: ocena wyśrodkowania (miary położenia) i rozrzut (rozproszenie wartości cech wyrobu) można jednoznacznie stwierdzić, że oba zaproponowane procesy są stabilne i przewidywalne w swoim przebiegu. Niewielkie przesunięcie oraz znaczne rozproszenie wyników pomiarów dla kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji wynika ze specyfiki struktury gotowej wypraski. Tak przeprowadzona analiza statystyczna dowodzi, że zaproponowane innowacyjne zabiegi bienkapsulacji cząstek proszku magnetycznego przed procesem konsolidacji (prasowanie, utwardzanie) w znacznym stopniu korzystnie wpływa na produkt końcowy.

Na podstawie przeprowadzonych badań za optymalne powłoki, które w pierwszym etapie enkapsulacji najkorzystniej chronią materiał magnetyczny Nd-Fe,Co-B uznano powłoki: Ni-P (30 min) oraz fosforanową (pH = 3). Powłoka Ni-P (30 min) ma charakter wielowarstwowy i nawet w obszarach nieciągłości nie zostaje odsłonięta powierzchnia proszku magnetycznego. Również konwersyjna warstwa fosforanowa otrzymana w zakwaszonych roztworach fosforanowych (pH = 3) całko-



Rys. 5.37. Porównanie statystycznej analizy procesu do pomiarów twardości metodą Brinella wyrobów z kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie dwóch rodzajów bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa oraz fosforan/żywica epoksydowa: a) wykres ramka-wąsy dla analizy rozkładu wartości pomiarów twardości metodą Brinella; b) histogram wyników dotyczących pomiarów twardości metodą Brinella

wicie pokrywa powierzchnię cząstek proszku, a w efekcie stanowi szczelną barierę dla czynników zewnętrznych.

Zastosowanie techniki bienkapsulacji cząstek proszku w znacznym stopniu wpływa zarówno na ograniczenie szybkości przechodzenia jonów Fe(II) do roztworu,

jak i szybkość samorzutnego roztwarzania badanych materiałów. Wartości oporu przeniesienia ładunku materiałów wytworzonych z proszku pokrytego jedynie materiałem spoiwa w stosunku do wartości tego oporu materiałów po bienkapsulacji powłokami Ni-P/żywica epoksydowa oraz powłokami fosforan/żywica epoksydowa są większe, co świadczy o hamowaniu procesu korozyjnego. Takie wielowarstwowe zabezpieczenie powierzchni cząstek proszku (izolacji cząstek proszku Nd-Fe,Co-B od środowiska zewnętrznego) ogranicza w pewnym stopniu wnikanie medium korozyjnego w głąb struktury materiału.

Również najkorzystniejsze właściwości magnetyczne uzyskano dla dielektromagnesów wykonanych z proszku Nd-Fe,Co-B po zabiegu bienkapsulacji powłokami fosforan/żywica epoksydowa oraz Ni-P/żywica epoksydowa. A co najważniejsze, pokrycie cząstek proszku powłokami ochronnymi w żadnym z przypadków nie spowoduje pogorszenia parametrów magnetycznych.

Proces bienkapsulacji powoduje wygładzenie powierzchni wyrobów dla obu badanych metod produkcji, przy czym efekt ten jest bardziej widoczny w przypadku zastosowania bienkapsulacji cząstek proszku fosforan/żywica epoksydowa. Związane jest to z właściwościami samej konwersyjnej powłoki fosforanowej, która charakteryzuje się znaczną porowatością, co sprzyja wnikaniu materiału spoiwa w jej pory, dzięki czemu tworzy się bardziej trwałe i jednorodne połączenie.

Zastosowanie bienkapsulacji Ni-P/żywica epoksydowa oraz fosforan/żywica epoksydowa powoduje ponadto nieznaczne wzmocnienie kruchych cząstek proszku, redukując możliwość pęknięcia podczas działania mechanicznych sił zewnętrznych. Należy jednak zwrócić uwagę na różnice w wartości twardości. Zastosowanie warstwy fosforanowej w odniesieniu do powłoki Ni-P sprzyja wzmocnieniu kruchych cząstek proszku, czego efektem są wyższe wartości twardości mierzonej metodą Brinella.





## PODSUMOWANIE

Niniejsze opracowanie, pomimo dużego nacisku na zaprezentowanie technik planowania i organizacji procesów w odniesieniu do zasad inżynierii produkcji, posiada znamiona pracy interdyscyplinarnej, w której prócz kluczowych zagadnień z inżynierii produkcji pojawiają się treści z zakresu inżynierii jakości, inżynierii mechanicznej, inżynierii materiałowej, a nawet inżynierii chemicznej.

Zgodnie ze strukturą treść pracy odnosi się do problemów związanych z:

1. Organizacją procesów produkcyjnych i technologicznych w świetle zmian przemysłu;
2. Usystematyzowaniem parametrów użytkowych dla wyrobów z materiałów magnetycznie trwałych na bazie pierwiastków ziem rzadkich – w odniesieniu do zmienności technik produkcji;
3. Kryteriami jakości dla wybranej grupy produktów – w procesie produkcji wyrobów z kompozytów magnetycznych;
4. Projektowaniem procesu produkcyjnego z wykorzystaniem narzędzi *Lean Production – Value Stream Mapping* w oparciu o szeroki zakres danych dotyczących produkcji i doskonalenia wyrobów z kompozytów magnetycznych;
5. Kreowaniem innowacji produktowej i procesowej w branży kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B w odniesieniu do ekonomii i potrzeb rynku.

Układ pracy ma na celu zwrócenie uwagi na zakres i znaczenie informacji niezbędnych do planowania, projektowania, organizacji i doskonalenia procesów produkcyjnych. Natomiast podmiotem niniejszego opracowania są procesy produkcji wyrobów z kompozytów magnetycznych na bazie proszku Nd-Fe,Co-B w świetle zmian zachodzących w globalnym podejściu do przemysłu oraz zmieniających się zasad projektowania wyrobów z materiałów o ograniczonej dostępności. Przemysł bazujący na technologii produkcji kompozytów magnetycznych wiązanych różnymi rodzajami tworzyw sztucznych należy zaklasyfikować do branży chemicznej, której głównym kierunkiem działań związanych z rozwojem jest nastawienie się na proekologiczność oraz intensyfikacja innowacyjności. W pracy podjęto próbę przybliżenia problemu, jaki stanowi deficyt metali z grupy lantanowców (tzw. metali ziem rzadkich) oraz wpływ tych niedoborów na globalny rynek i rozwój najnowszych technologii.

Biorąc pod uwagę, że wyroby z materiałów magnetycznych są niemal niezbędne w funkcjonowaniu dzisiejszego społeczeństwa, co więcej, zakłada się, że tendencja

rozwoju tej branży ma charakter wykładniczy, to ograniczenia handlowe oraz zapisy z inicjatywy materiałowej, dalszy rozwój kierują w stronę doskonalenia i modyfikowania istniejących technologii produkcji i przetwarzania. Dodatkowo obserwuje się duży nacisk na wykorzystywanie surowców (metali ziem rzadkich), które już są na rynku oraz minimalizowanie strat materiałowych w procesach produkcyjnych.

Proces produkcji materiałów kompozytowych o właściwościach magnetycznych jest procesem bardzo złożonym i w zależności od specyfikacji zamówienia może ulegać licznym transformacjom. Ze względu na bardzo dużą zmienność procesu wytwórczego kluczowe jest, aby system produkcyjny miał znamiona rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego, czyli aby posiadał zalety zarówno produkcji seryjnej, jak i elastycznych systemów produkcyjnych. Głównym celem niniejszej pracy było wskazania kierunków rozwoju innowacji produktowej i procesowej w procesach wytwórczych kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B. Na podstawie wytycznych i informacji na temat dostępnych technologii produkcji wytypowano kierunki rozwoju innowacji produktowej i procesowej. Kierunki te zdefiniowano na podstawie celów szczegółowych:

1. Zmniejszyć straty materiałowe (ograniczyć marnotrawstwo) w obszarze składowania i magazynowania;
2. Zminimalizować utlenianie się proszków magnetycznych na etapie magazynowania i przetwarzania – zastosować wieloetapowy układ zabezpieczeń.
3. Zwiększyć homogenizację kompozycji proszkowej;
4. Ograniczyć degradację materiału kompozytowego podczas eksploatacji (bez zmiany obszaru zastosowania);
5. Wprowadzić zmiany w technologii produkcji bez straty dla najważniejszych właściwości, czyli właściwości magnetycznych.

Analiza wstępnego projektu procesu zwizualizowana na podstawie mapy strumienia wartości (VSM) pozwoliła również na wytypowanie dwóch krytycznych kierunków rozwoju produktu i technologii. W odniesieniu do informacji o samorzutnej degradacji surowców na etapie składowania i przetwarzania oraz na podstawie licznych badań w zakresie rozwoju technologii poszukiwano metod, które:

- umożliwią przywrócenie pierwotnych cech materiału proszkowego (rewitalizacja surowca),
- będą zapobiegały powierzchniowemu utlenianiu proszków na bazie Nd-Fe,Co-B na każdym etapie przetwarzania.

Rozwiązaniem dla krytycznych obszarów procesu okazuje się być:

- w odniesieniu do proszków już powierzchniowo-utlenionych – technika wstępnego przygotowania powierzchni poprzez trawienie cząstek proszku w wodnych roztworach słabych kwasów organicznych lub też w roztworach związków kompleksujących, np. trawienie w wodnych roztworach kwasu cytrynowego lub szczawiowego;

- w odniesieniu do utleniania proszków na bazie Nd-Fe,Co-B na każdym etapie przetwarzania – technika zabezpieczania powierzchni cząstek proszków warstwami i powłokami ochronnymi, np. enkapsulacja – pokrywanie powierzchni cząstek proszku materiałem spoiwa lub bienkapsulacja – pokrywanie cząstek proszku powłoką metaliczną lub konwersyjną warstwą fosforanową oraz materiałem spoiwa. Naniesienia na powierzchnię cząstki proszku szczelnej powłoki ochronnej (enkapsulacja lub bienkapsulacja) umożliwią znaczne ograniczenie strat materiałowych na wszystkich etapach procesu produkcyjnego. Powłoki tego typu mają na celu zabezpieczenie powierzchni metalu przed intensywnym utlenianiem podczas operacji technologicznych.

W ramach planowania koncepcji produkcji innowacyjnych materiałów inżynierskich wytypowano techniczne kryteria jakościowe dla rodziny wyrobów z kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B – arbitralnie wytypowano cztery grupy właściwości, które stanowić mogą podstawę w rozwoju produktu:

- właściwości magnetyczne,
- właściwości mechaniczne,
- odporność korozyjna,
- właściwości tribologiczne.

Przyjęto, że dla tego typu wyrobów właściwości magnetyczne to wymóg konieczny, natomiast pozostałe wskazane charakterystyki odnoszą się do wytrzymałości eksploatacyjnej gotowego wyrobu. Zatem kryteria jakości odnoszące się do wytrzymałości eksploatacyjnej zdefiniowano na podstawie zestawu parametrów:

- mechanicznych – twardość, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie,
- elektrochemicznych – szybkość korozji określana w przyspieszonych testach na korozję atmosferyczną,
- tribologicznych – parametry chropowatości powierzchni gotowych wyrobów.

Stwierdzono, że zaproponowane kierunki rozwoju produktu na podstawie szeregu parametrów z kryterium wytrzymałości eksploatacyjnej mają korzystny wpływ w aspekcie wskazanych celów szczegółowych pracy. Dodanie operacji technologicznych, takich jak trawienie cząstek proszku w wodnych roztworach słabych kwasów organicznych lub też w roztworach związków kompleksujących oraz zabezpieczenie powierzchni metalu w procesach enkapsulacji i bienkapsulacji korzystnie wpływa na wytrzymałość eksploatacyjną wyrobu, gdyż skutecznie chroni przed intensywnym utlenianiem powierzchni cząstek proszku podczas operacji technologicznych. Techniki trawienia i zabezpieczania powierzchni cząstek proszku przyczyniają się do zwiększenia homogenizacji i równomiernego rozprowadzenia materiału spoiwa w objętości kompozytu magnetycznego. W pewnym stopniu ograniczają uszkodzenia mechaniczne na wszystkich etapach procesu produkcyjnego, a finalnie sprzyjają hamowaniu procesów korozyjnych gotowych materiałów.

Zgodnie z założeniem projektu koncepcyjnego zmodyfikowano proces produkcji magneśców wiązanych poprzez dodanie czterech dodatkowych operacji:

1. Wstępne trawienie powierzchni cząstek proszku – w 5% roztworze kwasu szczawiowego;
2. Pokrywanie cząstek proszku powłokami ochronnymi – proces enkapsulacji proszku konwersyjnymi powłokami fosforanowymi przeprowadzono w roztworach zawierających jony fosforanowe, w roztworze zakwaszonym do  $\text{pH} = 3$  lub powłoką metaliczną Ni-P;
3. Mieszanie cząstek proszku z materiałem spoiwa w postaci acetonowego roztworu – proces ponownej enkapsulacji proszku materiałem spoiwa (operacja 2 i 3 daje efekt bienkapsulacji cząstek proszku dwoma barierami ochronnymi);
4. Suszenie i odparowanie rozpuszczalnika.

Słabą stroną operacji 3 był fakt, że po odparowaniu rozpuszczalnika tworzyły się aglomeraty proszków, a powierzchnia cząstek nie była w nich równomiernie zabezpieczona dlatego też udoskonalenie procesu obejmowało projekt urządzenia (mieszalnika) do automatycznej enkapsulacji cząstek proszków magnetycznych. W ramach przygotowania do komercjalizacji procesu zabezpieczania cząstek proszku wykonano prototyp urządzenia, tj. oscylacyjnego mieszalnika do mieszania mas o wysokiej lepkości. Zgodnie z przedstawionym projektem w mieszalniku zastosowano system odprowadzania i skraplania oparów rozpuszczalnika z przestrzeni roboczej mieszalnika oraz połączono spust komory tłoczącej z formami do prasowania próbek. Użycie nowatorskiego urządzenia do enkapsulacji cząstek proszków pozwoliło na odpowiednią homogenizację kompozycji proszkowych i usprawniło proces produkcji magneśców wiązanych żywicą epoksydową.

W ramach walidacji procesu dokonano oceny powtarzalności procesu – powtarzalności pod względem spełnienia kryteriów zatwierdzających wyrób jako zgodny. Statystyczna kontrola modelowego procesu z wykorzystaniem prototypu urządzenia bazowała między innymi na kartach kontrolnych. Na podstawie pomiarów twardości sprawdzono stabilność procesu. Obserwacja trendów zmian miała na celu wczesne podjęcie działań korygujących i wprowadzenia zmian w projekcie. Na podstawie przeprowadzonej statystycznej kontroli procesu, której głównymi parametrami były ocena wyśrodkowania (miary położenia) i rozrzut (rozproszenie wartości cech wyrobu) można jednoznacznie stwierdzić, że procesy są stabilne i przewidywalne w swoim przebiegu. Niewielkie przesunięcie oraz znaczne rozproszenie wyników pomiarów dla kompozytu magnetycznego na bazie Nd-Fe,Co-B po procesie bienkapsulacji wynika ze specyfiki struktury gotowego wyrobu.

Należy zaznaczyć, że wyniki badań i analiz przedstawionych w niniejszym opracowaniu stały się podstawą do rozwoju dalszych prac badawczych nad możliwościami zastosowania, zmiennością procesu produkcji oraz doбором kryteriów jakościowych dla wyrobów z kompozytowych magneśców na bazie proszku Nd-Fe,Co-B po

procesie enkapsulacji. W konsekwencji przygotowano dwa zgłoszenia do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej i na drodze oficjalnej decyzji UP zostały oba uznane za wynalazki, natomiast tylko poz. 2 została objęta prawem ochronnym.

1. *Kompozyt magnetyczny dla układów retencyjnych w medycynie odtwórczej* – numer zgłoszenia P 410312 (2016-06-06, 12/2016, P003 – Zgłoszenia wynalazków lub wzorów użytkowych A1).
2. *Sposób otrzymywania kompozytu magnetycznego dla układów retencyjnych w medycynie odtwórczej* – numer zgłoszenia P 410312 – numer prawa wyłącznego PAT.226565.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] (1998) National Research Council Visionary Manufacturing Challenges for 2020. The National Academies Press, Washington
- [2] (2004) European Commission. Manufuture: a vision for 2020. Assuring the future of manufacturing in Europe, report of the High-Level Group. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg
- [3] Lee J, Bagheri B, Kao H-A (2015) A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* 3: 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
- [4] Stock T, Seliger G (2016) Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP* 40: 536–541. doi: 10.1016/j.procir.2016.01.129
- [5] Francalanza E, Borg J, Vella P et al. (2018) An ‘Industry 4.0’ digital model fostering integrated product development. 2018 IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT): 95–99. doi: 10.1109/ICMIMT.2018.8340428
- [6] Almada-Lobo F (2015) The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management* 3(4): 16–21. doi: 10.24840/2183-0606\_003.004\_0003
- [7] Fu Y, Ding J, Wang H et al. (2018) Two-objective stochastic flow-shop scheduling with deteriorating and learning effect in Industry 4.0-based manufacturing system. *Applied Soft Computing* 68: 847–855. doi: 10.1016/j.asoc.2017.12.009
- [8] Liao Y, Deschamps F, Loures EdFR et al. (2016) Past, present and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research* 55(12): 3609–3629. doi: 10.1080/00207543.2017.1308576
- [9] European Factories of the Future Research Association (ed) (2016) *Factories 4.0 and Beyond*, Working Document, Recommendations for the Work Programme 18-19-20 of the FoF PPP Under Horizon 2020. EFFRA Office, Brussels
- [10] Matthyssens P (2019) Reconceptualizing value innovation for Industry 4.0 and the Industrial Internet of Things. *Jnl of Bus & Indus Marketing* 3(4): 16. doi: 10.1108/JBIM-11-2018-0348
- [11] Uhlmann E, Hohwieler E, Geisert C (2017) Intelligent production systems in the era of Industrie 4.0 – changing mindsets and business models. *Journal of Machine Engineering* 17(2): 5–24



- [12] (2010) PROJEKT EUROPA 2030. Wyzwania i szanse: Sprawozdanie dla Rady Europejskiej sporządzone przez Grupę Refleksji dotyczące przyszłości UE do roku 2030. Urząd Publikacji Unii Europejskiej, Luksemburg
- [13] Hamrol A, Mantura W (2002) Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- [14] Ingaldi M (2017) Wybrane zagadnienia inżynierii produkcji. Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedżerów Jakości i Produkcji, Częstochowa
- [15] Bennett D (1986) Production Systems Design. Butterworths
- [16] Hitomi K (2017) Manufacturing Systems Engineering. Routledge
- [17] de Araujo LF, de Queiroz AA (2009) A Conceptual Model for Production Leveling (Heijunka) Implementation in Batch Production Systems: Advances in Production Management Systems. New Challenges, New Approaches. IFIP Advances in Information and Communication Technology: 81–88
- [18] Churchman Ch (1968) The Systems Approach. Dell Publishing Company, New York
- [19] Borkowski S, Ulewicz R (2008) Zarządzanie produkcją. Oficyna Wydawnicza Humanitas, Sosnowiec
- [20] Hubka V, Eder WE (1988) Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design. Springer-Verlag, New York
- [21] Bellgran M, Säfssten EK (2009) Production Development: Design and Operation of Production Systems. Springer Science & Business Media
- [22] Kuhn A (2008) Prozessorientierte Sichtweise in Produktion und Logistik: In: Arnold D, Kuhn A, Furmans K, Isermann H and Tempelmeier H (Hrsg.), Handbuch Logistik
- [23] Wagner K, Patzak G (2007) Performance Excellence – Der Praxisleitfaden zum effektiven Prozessmanagement. Carl Hanser Verlag München, Wien
- [24] Romiszowski AJ (2016) Designing Instructional Systems. Routledge
- [25] Rösiö C, Bruch J (2018) Exploring the design process of reconfigurable industrial production systems. Jnl of Manu Tech Mngmnt 29(1): 85–103. doi: 10.1108/JMTM-06-2016-0090
- [26] Bellgran M, Säfssten EK (2010) Production Development: Design and Operation of Production Systems. Springer-Verlag, London
- [27] Garetti M, Taisch M (2012) Sustainable manufacturing: trends and research challenges. Production Planning & Control: The Management of Operations 23(2/3): 83–104
- [28] Kurkkio M, Frishammar J, Lichtenthaler U (2011) Where process development begins: a multiple case study of front end activities in process firms. Technovation 31(9): 490–504

- 
- [29] Riedel JCKH, Pawar KS (1997) The consideration of production aspects during product design stages. *Integrated Mfg Systems* 8(4): 208–214. doi: 10.1108/09576069710182027
- [30] Lewandowski J, Skołod B, Plinta D (2018) Organizacja systemów produkcyjnych. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne S.A., Warszawa
- [31] Jaciow M (2016) Standaryzacja vs adaptacja procesów badawczych na rynkach międzynarodowych – dylematy metodologiczne. *Studia Ekonomiczne* 270: 104–111
- [32] Perry DA, Olson B, Blessner P et al. (2016) Evaluating the Systems Engineering Problem Management Process for Industrial Manufacturing Problems. *Syst. Engin.* 19(2): 133–145. doi: 10.1002/sys.21340
- [33] Brzeziński M (2000) Organizacja produkcji. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin
- [34] Greer CR, Lei D (2012) Collaborative Innovation with Customers: A Review of the Literature and Suggestions for Future Research. *International Journal of Management Reviews* 14(1): 63–84. doi: 10.1111/j.1468-2370.2011.00310.x
- [35] Wang F, Li H, Liu A (2018) A novel method for determining the key customer requirements and innovation goals in customer collaborative product innovation. *J Intell Manuf* 29(1): 211–225. doi: 10.1007/s10845-015-1102-0
- [36] Otsuka A, Nagata F (2018) Quality design method using process capability index based on Monte-Carlo method and real-coded genetic algorithm. *International Journal of Production Economics* 204: 358–364. doi: 10.1016/j.ijpe.2018.08.016
- [37] Wallin J, Parida V, Isaksson O (2015) Understanding product-service system innovation capabilities development for manufacturing companies. *Jnl of Manu Tech Mngmnt* 26(5): 763–787. doi: 10.1108/JMTM-05-2013-0055
- [38] Szczepańska K (2010) Kompleksowe zarządzanie jakością, przeszłość i terażniejszość. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- [39] Bullinger HJ, Warschat J (eds) (2012) *Concurrent Simultaneous Engineering Systems: The Way to Successful Product Development*. Springer Science & Business Media, London
- [40] Chesbrough H, Vanhaverbeke W, West J (eds) (2006) *Open Innovation: Researching a New Paradigm*. Oxford University Press on Demand, Oxford
- [41] Durlik I (2007) *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych: Część 1. Placet*, Warszawa
- [42] Kawecka-Endler, A (2004) Organizacja technicznego przygotowania produkcji – prac rozwojowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań
- [43] Oettmeier K, Hofmann E (2017) Additive manufacturing technology adoption: An empirical analysis of general and supply chain-related determinants. *J Bus Econ* 87(1): 97–124. doi: 10.1007/s11573-016-0806-8

- [44] Koren Y (2010) *The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey
- [45] Koren Y, Heisel U, Jovane F et al. (1999) Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 42(2): 527–540
- [46] Koren Y, Wang W, Gu X (2016) Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 55(5): 1227–1242. doi: 10.1080/00207543.2016.1145821
- [47] Narongwanich W, Duenyas I, Birge JR (2002) *Optimal Portfolio of Reconfigurable and Dedicated Capacity Under Uncertainty*. Technical Report. University of Michigan ERC-RMS, Michigan
- [48] Koren Y, Gu X, Guo W (2018) Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering* 13(2): 121–136. doi: 10.1007/s11465-018-0483-0
- [49] Abdi MR, Labib AW (2003) A design strategy for reconfigurable manufacturing systems (RMSs) using analytical hierarchical process (AHP): a case study. *International Journal of Production Research* 40(10): 2273–2299
- [50] Gyulai D, Pfeiffer A, Kádár B et al. (2016) Simulation-based Production Planning and Execution Control for Reconfigurable Assembly Cells. *Procedia CIRP* 57: 445–450. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.077
- [51] Singh A, Gupta S, Asjad M et al. (2017) Reconfigurable manufacturing systems: journey and the road ahead. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management* 8(10): 1849–1857. doi: 10.1007/s13198-017-0610-z
- [52] Povey B (1996) *Continuous business improvement – linking the key improvement processes for your critical longterm success*. McGraw-Hill, London
- [53] Kuhlmann P, Hempen S, Edtmayr T et al. (2013) Systematic and Continuous Improvement of Value Streams. *IFAC Proceedings Volumes* 46(9): 993–997. doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00257
- [54] Borkowski S, Ulewicz R (2009) *Instrumenty doskonalenia procesów produkcyjnych. Instruments of Production Processes Improvement*. Wydawnictwo PTM, Warszawa
- [55] Imai M (1986) *The Key to Japan's Competitive Success*. Random House, New York
- [56] Kamińska B (2015) Kaizen as a Method of Management Improvement in Small Production Companies. *Przedsiębiorczość i Zarządzanie* 16(2): 157–170. doi: 10.1515/eam-2015-0024
- [57] Gołębiowski M, Janasz W, Prozorowicz M (1999) *Zarządzanie jakością w przedsiębiorstwie*. Wydawnictwo Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin

- 
- [58] Łukasiński W. (2012) *Doskonalenie organizacji zarządzanej projakościowo z wykorzystaniem modeli samooceny*, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków
- [59] Tyagi S, Choudhary A, Cai X et al. (2015) Value stream mapping to reduce the lead-time of a product development process. *International Journal of Production Economics* 160: 202–212. doi: 10.1016/j.ijpe.2014.11.002
- [60] Bevilacqua M, Ciarapica FE, Mazzuto G et al. (2013) Visual Management implementation and evaluation through mental workload analysis. *IFAC Proceedings Volumes* 46(7): 294–299. doi: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00065
- [61] Deuse J, Rother M, Hempen S (2009) Managing continuous innovation in a manufacturing environment. CD-Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Continuous Innovation Network (CINet) Conference “Enhancing the Innovation Environment” Brisbane, Australia
- [62] de Boer MA, Lammertsma K (2013) Scarcity of rare earth elements. *ChemSusChem* 6(11): 2045–2055. doi: 10.1002/cssc.201200794
- [63] Mancheri NA (2016) An Overview of Chinese Rare Earth Export Restrictions and Implications. *Rare Earths Industry. Technological, Economic, and Environmental Implications*: 21–36. doi: 10.1016/B978-0-12-802328-0.00002-4
- [64] Pothen F, Fink K (2015) A Political Economy of China’s Export Restrictions on Rare Earth Elements. *SSRN Journal*. doi: 10.2139/ssrn.2619123
- [65] Mancheri NA (2015) World trade in rare earths, Chinese export restrictions, and implications. *Resources Policy* 46: 262–271. doi: 10.1016/j.resourpol.2015.10.009
- [66] Zepf V (2016) An Overview of the Usefulness and Strategic Value of Rare Earth Metals. *Rare Earths Industry. Technological, Economic, and Environmental Implications*: 3–17. doi: 10.1016/B978-0-12-802328-0.00001-2
- [67] ERECON (2015) Strengthening the European rare earths supply-chain. A report by the European Rare Earths Competence Network (ERECON). European Commission. [http://prometia.eu/wp-content/uploads/2014/06/ERECON-report\\_web.pdf](http://prometia.eu/wp-content/uploads/2014/06/ERECON-report_web.pdf) EUROSTAT
- [68] Guyonnet D, Planchon M, Rollat A et al. (2015) Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. *Journal of Cleaner Production* 107: 215–228. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.123
- [69] Kirchmayr HR (1996) Review article. Permanent magnets and hard magnetic materials. *Linguistics* 34(6): 84. doi: 10.1515/ling.1996.34.6.1247
- [70] Hono K, Sepehri-Amin H (2012) Strategy for high-coercivity Nd-Fe-B magnets. *Scripta Materialia* 67(6): 530–535. doi: 10.1016/j.scriptamat.2012.06.038
- [71] Leonowicz M, Wysocki JJ (2005) *Współczesne magnesy*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa

- [72] Sepehri-Amin H, Ohkubo T, Hono K (2013) The mechanism of coercivity enhancement by the grain boundary diffusion process of Nd-Fe-B sintered magnets. *Acta Materialia* 61(6): 1982–1990. doi: 10.1016/j.actamat.2012.12.018
- [73] Xiao J, Otaigbe JU, Jiles DC (2000) Modeling of magnetic properties of polymer bonded Nd-Fe-B magnets with surface modifications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 218(1): 60–66. doi: 10.1016/S0304-8853(00)00047-0
- [74] Morrish AH (1970) *Fizyczne podstawy magnetyzmu*. PWN, Warszawa
- [75] Morrish AH (1965) *The Physical Principles of Magnetism*. Wiley, New York
- [76] Grössinger R (2008) Characterisation of hard magnetic materials. *Journal of Electrical Engineering* 59(7): 15–20
- [77] Kaleta J (2013) *Materiały magnetyczne SMART: Budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław
- [78] Wac-Włodarczyk A (2012) *Materiały magnetyczne. Modelowanie i zastosowania*. Politechnika Lubelska, Lublin
- [79] Fidler J, Schrefl T, Hoefinger S et al. (2004) Recent Developments in Hard Magnetic Bulk Materials. *ChemInform* 35(27): 455. doi: 10.1002/chin.200427200
- [80] Dobrzański LA (2002) *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. WNT, Warszawa
- [81] Collocott SJ, Dunlop JB (2008) The fluctuation field and anomalous magnetic viscosity in commercial NdFeB alloys, AlNiCo and the bulk amorphous ferromagnets Nd<sub>60</sub>Fe<sub>30</sub>Al<sub>10</sub> and Nd<sub>60</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>10</sub>Al<sub>10</sub>. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320: 2089–2093
- [82] Qiu Q, Li Q, Su J et al. (2008) Simulation to improve the magnetic field in the straight section of the rectangular planar DC magnetron. *Vacuum* 82: 657–663
- [83] Leonowicz M (1996) *Nowoczesne materiały magnetycznie twarde*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- [84] Witkowski A, Leonowicz M, Kaszuwara W (2004) Nanocrystalline barium ferrites processed by mechanical alloying. *Inżynieria Materiałowa* 3(245–248)
- [85] Tokuhara K, Ohtsu Y, Ono F et al. (1985) Magnetization and torque measurements on Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B single crystals. *Solid State Communications* 56: 333–336
- [86] Croat JJ, Herbst JF, Lee RW et al. (1984) Pr-Fe and Nd-Fe-based materials: A new class of high-performance permanent magnets. *Journal of Applied Physics* 55: 2078–2082
- [87] Ślusarek B (2000) Stan obecny i perspektywy rozwoju magnesów trwałych. *Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej. Konferencje, Postępy w elektrotechnologii* 37(12): 111–116

- [88] Schneider G, Henig ET, Petzow G et al. (1986) Phase relation in the system Nd-Fe-B. *Zeitschrift für Metallkunde* 77: 755–761
- [89] Herbst JF, Croat JJ, Pinkerton FE et al. (1984) Relationships between crystal structure and magnetic properties in Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B. *Physical Review B* 29: 4176–4178
- [90] Givord D, Li HS, Moreau JM (1984) Magnetic properties and crystal structure of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B. *Solid State Communications* 50: 497–499
- [91] Boller H, Oesterreicher H (1984) On the structure of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B. *Journal of Less Common Metals* 103: 5
- [92] Shoemaker CB, Shoemaker DP, Fruchart R (1985) L'analogie des modes d'insertion et d'empilement dans les phases Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, Mn<sub>5</sub>SiC, et Fe<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>. *Journal of Solid State Chemistry* 59(1): 54–59
- [93] Fernengel W, Rodewald W, Blank R et al. (1999) The influence of Co on the corrosion resistance of sintered NdFeB magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 196–197: 288–290. doi: 10.1016/S0304-8853(98)00706-9
- [94] Gurrappa I (2002) Suitability of Nd–Fe–B permanent magnets for biomedical applications—a corrosion study. *Journal of Alloys and Compounds* 339 (1–2): 241–247. doi: 10.1016/S0925-8388(01)02005-9
- [95] Kim AS, Camp FE, Lizzi T (1996) Hydrogen induced corrosion mechanism in NdFeB magnets. *J. Appl. Phys.* 79(8): 4840. doi: 10.1063/1.361626
- [96] Li JJ, Li AH, Zhu MG et al. (2011) Study on corrosion behaviors of sintered Nd–Fe–B magnets in different environmental conditions. *Journal of Applied Physics* 109(7): 07A744. doi: 10.1063/1.3565196
- [97] Mottram RS, Williams AJ, Harris IR (2000) Blending additions of cobalt to Nd<sub>16</sub>Fe<sub>76</sub>B<sub>8</sub> milled powder to produce sintered magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 217: 27–34. doi: 10.1016/S0304-8853(00)00109-8
- [98] Sagawa M, Fujimura S, Yamamoto IL et al. (1985): New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe. *Journal of Applied Physics* 57: 2083–2087. doi: 10.1063/1.333572
- [99] Yu LQ, Wen YH, Yan M (2004) Effects of Dy and Nb on the magnetic properties and corrosion resistance of sintered NdFeB. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 283(2-3): 353–356. doi: 10.1016/j.jmmm.2004.06.006
- [100] Adler E, Rodewald W, Wall B (1991) Temperature stability and corrosion behavior of sintered Nd-Dy-Fe-Co-TM-B magnets. *J. Appl. Phys.* 70(10): 6637. doi: 10.1063/1.349833
- [101] Fidler J, Bernardi J (1991) Transmission electron microscope characterization of cast and hot-worked R-Fe-B: Cu (R = Nd, Pr) permanent magnets. *J. Appl. Phys.* 70(10): 6456–6458. doi: 10.1063/1.349929

- [102] Knoch KG, Grieb B, Henig ET et al. (1990) Upgraded Nd-Fe-B-AD (AD=Al,Ga) magnets: Wettability and microstructure. *IEEE Trans. Magn.* 26(5): 1951–1953. doi: 10.1109/20.104918
- [103] Mottram RS, Williams AJ, Harris IR (2001) The effects of blending additions of copper and cobalt to Nd<sub>16</sub>Fe<sub>76</sub>B<sub>8</sub> milled powder to produce sintered magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 234(1): 80–89. doi: 10.1016/S0304-8853(01)00067-1
- [104] Hirosawa S, Mino S, Tomizawa H (1991) Improved corrosion resistance and magnetic properties of Nd-Fe-B-type sintered magnets with Mo and Co. *J. Appl. Phys.* 69(8): 5844–5846. doi: 10.1063/1.347845
- [105] Koestler C, Ramesh R, Echer CJ et al. (1989) Microstructure of melt spun Nd-Fe-Co-B magnets. *Acta Metallurgica* 37(7): 1945–1955. doi: 10.1016/0001-6160(89)90079-5
- [106] Sagawa M, Fujimura S, Togawa N et al. (1984) New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe. *J. Appl. Phys.* 55(6): 2083–2087. doi: 10.1063/1.333572
- [107] Bala H, Pawłowska G, Szymura S et al. (1990) Corrosion characteristics of Nd-Fe-B sintered magnets containing various alloying elements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 87(3): L255–L259. doi: 10.1016/0304-8853(90)90757-H
- [108] El-Moneim AA, Gebert A, Uhlemann M et al. (2002) The influence of Co and Ga additions on the corrosion behavior of nanocrystalline NdFeB magnets. *Corrosion Science* 44(8): 1857–1874. doi: 10.1016/S0010-938X(01)00163-9
- [109] Filip O, El-Aziz AM, Hermann R et al. (2001) Effect of Al additives and annealing time on microstructure and corrosion resistance of Nd–Fe–B alloys. *Materials Letters* 51(3): 213–218. doi: 10.1016/S0167-577X(01)00292-0
- [110] Isotahdon E, Huttunen-Saarivirta E, Kuokkala V-T et al. (2012) Corrosion behaviour of sintered Nd–Fe–B magnets. *Materials Chemistry and Physics* 135(2–3): 762–771. doi: 10.1016/j.matchemphys.2012.05.056
- [111] Pawłowska G, Bala H, Kaszuwara W et al. (2005) Atmospheric corrosion of NdFeB type magnets manufactured by different methods. *Ochrona przed Korozją* 26(1): 27–30
- [112] Skulj I, Douvalis AP, Harris IR (2006) Characterisation of oxidation products of modified Nd–Fe–B type magnets. *Journal of Alloys and Compounds* 407(1–2): 304–313. doi: 10.1016/j.jallcom.2005.06.033
- [113] Szymura S, Bala H, Pawłowska G et al. (1991) Modification of the magnetic properties and corrosion resistance of Nd-Fe-B permanent magnets with addition of cobalt. *Journal of the Less Common Metals* 175(2): 185–198. doi: 10.1016/0022-5088(91)90003-M

- 
- [114] Kim AS, Camp FE (1995) Effect of minor grain boundary additives on the magnetic properties of NdFeB magnets. *IEEE Trans. Magn.* 31(6): 3620–3622. doi: 10.1109/20.489588
- [115] Nozières JP, Taylor DW, Bala H et al. (1992) Corrosion behaviour of hot-worked Nd-Fe-B and Nd-Fe-Cu-B permanent magnets. *Journal of Alloys and Compounds* 186(2): 201–208. doi: 10.1016/0925-8388(92)90005-T
- [116] Ragg OM, Harris IR (1997) A study of the effects of the addition of various amounts of Cu to sintered Nd-Fe-B magnets. *Journal of Alloys and Compounds* 256(1–2): 252–257. doi: 10.1016/S0925-8388(96)02962-3
- [117] Zhang P, Ma T, Liang L et al. (2014) Improvement of corrosion resistance of Cu and Nb co-added Nd-Fe-B sintered magnets. *Materials Chemistry and Physics* 147(3): 982–986. doi: 10.1016/j.matchemphys.2014.06.046
- [118] Filip O, El-Aziz AM, Hermann R et al. (2001) Effect of Al additives and annealing time on microstructure and corrosion resistance of Nd-Fe-B alloys. *Materials Letters* 51(3): 213–218. doi: 10.1016/S0167-577X(01)00292-0
- [119] Katter M, Zapf L, Blank R et al. (2001) Corrosion mechanism of RE-Fe-Co-Cu-Ga-Al-B magnets. *IEEE Trans. Magn.* 37(4): 2474–2476. doi: 10.1109/20.951207
- [120] Le Breton JM, Teillet J (1991) Mössbauer and X-ray study of NdFeB type permanent magnets oxidation: Effect of Al and Nb addition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 101(1–3): 347–348. doi: 10.1016/0304-8853(91)90774-5
- [121] Parmar H, Xiao T, Yaoying Z et al. (2018) Improved Corrosion Resistance of Co,Al-Alloyed NdFeB Magnetic Nanostructures Processed by Microwave Synthesis Techniques. *IEEE Trans. Magn.* 54(11): 1–5. doi: 10.1109/TMAG.2018.2838599
- [122] Bala H, Szymura S, Rabinovich YM et al. (1990) Studies on sintered permanent magnets RE-Fe-M-Co-B (RE = Nd, Pr, Dy, Tb; M = Si, Al, Cr). *Rev. Phys. Appl. (Paris)* 25(12): 1205–1211. doi: 10.1051/rphysap:0199000250120120500
- [123] Gurrappa I, Pandian S (2013) Corrosion characteristics of Nd-Fe-B permanent magnets in different environments. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 41(1): 57–61. doi: 10.1179/174327806X94018
- [124] Hirosawa S, Kanekiyo H, Miyoshi T (2004) Unusual effects of Ti and C additions on structural and magnetic properties of Nd-Fe-B nanocomposite magnets in a B-rich and Nd-poor composition range. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 281(1): 58–67. doi: 10.1016/j.jmmm.2004.03.046
- [125] Sunada S, Majima K, Akasofu Y et al. (2006) Corrosion assessment of Nd-Fe-B alloy with Co addition through impedance measurements. *Journal of Alloys and Compounds* 408–412: 1373–1376. doi: 10.1016/j.jallcom.2005.04.039



- [126] LUO J, Rango P de, Fruchart D et al. (2009) Hydrogen absorption of NdDyFeCoNbCuB sintered magnets. *Journal of Rare Earths* 27(3): 520–524. doi: 10.1016/S1002-0721(08)60281-1
- [127] Madaah Hosseini HR, Dadoo A, Dolati A et al. (2006) A study on the corrosion behavior of the (Nd, MM)<sub>2</sub>(Fe, Co, Ni)<sub>14</sub>B-type sintered magnets. *Journal of Alloys and Compounds* 419(1–2): 337–341. doi: 10.1016/j.jallcom.2005.10.013
- [128] Book D, Harris IR (1995) Hydrogen absorption/desorption and HDDR studies on Nd<sub>16</sub>Fe<sub>76</sub>B<sub>8</sub> and Nd<sub>11.8</sub>Fe<sub>82.3</sub>B<sub>5.9</sub>. *Journal of Alloys and Compounds* 221(1–2): 187–192. doi: 10.1016/0925-8388(94)01433-7
- [129] Chen Y, Li X, Chen XL et al. (2000) Phase Relation, Crystal Structures, and Magnetic Properties of Nd–Co–B Borides. *Chem. Mater.* 12(5): 1240–1247. doi: 10.1021/cm990462f
- [130] Umehara I, Lu Y, Lu QF et al. (1998) High field magnetic properties in single crystal Nd<sub>3</sub>Co. *J. Appl. Phys.* 83(11): 6961–6963. doi: 10.1063/1.367850
- [131] Chin TS, Chang RT, Tsai WT et al. (1988) Electrochemical behavior of rare-earth magnet alloys in various solutions. *IEEE Trans. Magn.* 24(2): 1927–1929. doi: 10.1109/20.11648
- [132] Saliba-Silva A, Faria RN, Baker MA et al. (2004) Improving the corrosion resistance of NdFeB magnets: An electrochemical and surface analytical study. *Surface and Coatings Technology* 185(2–3): 321–328. doi: 10.1016/j.surfcoat.2003.12.015
- [133] Vystavkina V, Brekharya G, Vasil'yeva E et al. (2004) Magnetic properties and microstructure of Nd–Fe–B–C magnets with Cu addition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 284: 69–76. doi: 10.1016/j.jmmm.2004.06.018
- [134] Bala H, Trepak NM, Szymura S et al. (2001) Corrosion protection of Nd-Fe-B type permanent magnets by zinc phosphate surface conversion coatings. *Intermetallics* 9(6): 515–519. doi: 10.1016/S0966-9795(01)00035-8
- [135] Dong X, Wang D, Zeng Y (2014) Effect of mechanical attrition on microstructure and properties of electro-deposition coatings on NdFeB. *Journal of Rare Earths* 32(9): 867–873. doi: 10.1016/S1002-0721(14)60155-1
- [136] Isotahdon E, Huttunen-Saarivirta E, Kuokkala V-T et al. (2014) Corrosion protection provided by electrolytic nickel and tin coatings for Nd-Fe-B magnets. *Journal of Alloys and Compounds* 585: 203–213. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.09.135
- [137] Ma C, Liu X, Zhou C (2014) Cold-Sprayed Al Coating for Corrosion Protection of Sintered NdFeB. *J Therm Spray Tech* 23(3): 456–462. doi: 10.1007/s11666-013-9994-8

- [138] Mao S, Yang H, Song Z et al. (2011) Corrosion behaviour of sintered NdFeB deposited with an aluminium coating. *Corrosion Science* 53(5): 1887–1894. doi: 10.1016/j.corsci.2011.02.006
- [139] Moore M, Sueptitz R, Gebert A et al. (2014) Impact of magnetization state on the corrosion of sintered Nd-Fe-B magnets for e-motor applications. *Materials and Corrosion* 65(9): 891–896. doi: 10.1002/maco.201206978
- [140] Yan M, Ying HG, Ma TY (2009) Preparation of coatings with high adhesion strength and high corrosion resistance on sintered Nd-Fe-B magnets through electroless plating. *Materials Chemistry and Physics* 113(2–3): 764–767. doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.08.048
- [141] Zheng J, Chen H, Qiao L et al. (2014) Double coating protection of Nd-Fe-B magnets: Intergranular phosphating treatment and copper plating. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 371: 1–4. doi: 10.1016/j.jmmm.2014.07.004
- [142] Fabiano F, Celegato F, Giordano A et al. (2014) Assessment of corrosion resistance of Nd-Fe-B magnets by silanization for orthodontic applications. *Physica B: Condensed Matter* 435: 92–95. doi: 10.1016/j.physb.2013.10.021
- [143] Xu JL, Huang ZX, Luo JM et al. (2014) Effect of titania particles on the microstructure and properties of the epoxy resin coatings on sintered NdFeB permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 355: 31–36. doi: 10.1016/j.jmmm.2013.11.050
- [144] Zheng L, Li W, Zhu M et al. (2013) Microstructure, magnetic and electrical properties of the composite magnets of Nd-Fe-B powders coated with silica layer. *Journal of Alloys and Compounds* 560: 80–83. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.01.107
- [145] Chen H, Wang Q, Dong H et al. (2015) Electroless Plating of Ni-P-W Coatings Containing Scattered Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on Sintered NdFeB Substrate. *Mat. Res.* 18(5): 1089–1096. doi: 10.1590/1516-1439.032015
- [146] Du J, Zhang P, Cai Z et al. (2010) Effect of ion plating ZrN/TiN multilayer coating on the corrosion resistance and anti-wear properties of NdFeB magnet. *Fenmo Yejin Jishu/Powder Metallurgy Technology* 28: 269–272+278
- [147] Lee HU, Lee G, Park JC et al. (2014) Efficient visible-light responsive TiO<sub>2</sub> nanoparticles incorporated magnetic carbon photocatalysts. *Chemical Engineering Journal* 240: 91–98. doi: 10.1016/j.ccej.2013.11.054
- [148] Martins EA, Oliveira MCL, Rossi JL et al. (2011) EIS investigation of the corrosion resistance of uncoated and coated Nd-Fe-B magnets in PBS solution. *J. Braz. Chem. Soc.* 22(2): 264–271. doi: 10.1590/S0103-50532011000200011
- [149] Saliba-Silva AM, Oliveira MCLd, Costa I (2005) Effect of molybdate on phosphating of Nd-Fe-B magnets for corrosion protection. *Mat. Res.* 8(2): 147–150. doi: 10.1590/S1516-14392005000200009

- [150] Takeuchi ST, Azambuja DS, Costa I (2006) Cerium conversion layer for improving the corrosion resistance of phosphated NdFeB magnets. *Surface and Coatings Technology* 201(6): 3670–3675. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.140
- [151] Ali A, Ahmad A, Deen KM (2009) Multilayer ceramic coating for impeding corrosion of sintered NdFeB magnets. *Journal of Rare Earths* 27(6): 1003–1007. doi: 10.1016/S1002-0721(08)60357-9
- [152] Suppan G, Ruehrig M, Kanitz A et al. (2015) Electroplating Dysprosium from IL-Based Solutions: A Promising Electrochemical Step to Produce Stronger High Performance Nd(Dy)-Fe-B Sintered Magnets. *J. Electrochem. Soc.* 162(8): D382–D388. doi: 10.1149/2.0911508jes
- [153] Hong-zu XIE, Jun-tao ZHAO, Yong-jiang YU New Achievements in NdFeB Mass Production
- [154] Leonowicz M (1993) Strukturalne uwarunkowania własności magnetycznych spiekanych magnezów Nd-Fe-B. Rozprawa habilitacyjna, Warszawa
- [155] Seelam UMR, Ohkubo T, Abe T et al. (2014) Faceted shell structure in grain boundary diffusion-processed sintered Nd–Fe–B magnets. *Journal of Alloys and Compounds* 617: 884–892. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.07.166
- [156] Sepehri-Amin H, Ohkubo T, Shima T et al. (2012) Grain boundary and interface chemistry of an Nd–Fe–B-based sintered magnet. *Acta Materialia* 60(3): 819–830. doi: 10.1016/j.actamat.2011.10.043
- [157] Koestler C, Chandramouli M, Thomas G et al. (1992) Microstructure of mechanically alloyed Nd 16 Fe 76 B 8 -magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 110(3): 264–274. doi: 10.1016/0304-8853(92)90211-6
- [158] Liu X, Hu L, Wang E (2013) Cold compaction behavior of nano-structured Nd–Fe–B alloy powders prepared by different processes. *Journal of Alloys and Compounds* 551: 682–687. doi: 10.1016/j.jallcom.2012.10.192
- [159] Schultz L, Wecker J (1988) Hard magnetic properties of Nd-Fe-B formed by mechanical alloying and solid state reaction. *Materials Science and Engineering* 99(1–2): 127–130. doi: 10.1016/0025-5416(88)90307-2
- [160] Shukla S, Banas A, Ramanujan RV (2011) Atomistic mechanism of cyclic phase transitions in Nd–Fe–B based intermetallics. *Intermetallics* 19(8): 1265–1273. doi: 10.1016/j.intermet.2011.04.006
- [161] Chen Z, Miller D, Herchenroeder J (2010) High performance nanostructured Nd–Fe–B fine powder prepared by melt spinning and jet milling. *J. Appl. Phys.* 107(9): 09A730. doi: 10.1063/1.3348544
- [162] Ślusarek B (1999) Anizotropowe diektromagnesy prasowane ze stopu Nd-Fe-B. *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania* 40(12): 33
- [163] Wnuk I (2004) Właściwości magnetyczne oraz procesy przemagnesowania nanokrystalicznych magnezów Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/a-Fe o różnej wielkości ziarn. Rozprawa doktorska, Częstochowa

- [164] Leonowicz M, Wysłocki JJ (2005) Współczesne magnesy. WNT, Warszawa
- [165] Liszkowski P, Turek K, Figiel H (2000) The influence of decrepitation on the diffusion kinetics of hydrogen in Nd–Fe–B. *Journal of Alloys and Compounds* 307(1–2): 297–303. doi: 10.1016/S0925-8388(00)00844-6
- [166] Nakamura M, Matsuura M, Tezuka N et al. (2013) Preparation of ultrafine jet-milled powders for Nd-Fe-B sintered magnets using hydrogenation–disproportionation–desorption–recombination and hydrogen decrepitation processes. *Appl. Phys. Lett.* 103(2): 22404. doi: 10.1063/1.4813399
- [167] Hamano M (1995) Overview and outlook of bonded magnets in Japan. *Journal of Alloys and Compounds* 222(1–2): 8–12. doi: 10.1016/0925-8388(94)04903-3
- [168] Skomski R (2016) Permanent Magnets: History, Current Research, and Outlook: In: Zhukov A. (ed) *Novel Functional Magnetic Materials*. Springer Series in Materials Science 231. Springer, Cham
- [169] Handstein A, Wecker J, Schnitzke K et al. (1996) Mechanically alloyed anisotropic Nd-Fe-B powder. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 157–158: 15–16. doi: 10.1016/0304-8853(96)80017-5
- [170] Liu W, Cao L, Wu J et al. (2003) Characterization of Melt-Spun NdFeB Magnets Prepared by Explosive Compaction. *Mater. Trans.* 44(10): 2094–2098. doi: 10.2320/matertrans.44.2094
- [171] Paszkowski L, Skalski A, Biało D (2008) Wpływ budowy kompozytów i warunków wtryskiwania na maksymalną gęstość energii magnetycznej (BH) max dielektromagnesów. *Kompozyty* 8(3): 28
- [172] Ślusarek B (2001) *Dielektromagnesy Nd-Fe-B*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław
- [173] Dobrzański LA, Drak M (2004) Structure and properties of composite materials with polymer matrix reinforced Nd–Fe–B hard magnetic nanostructured particles. *Journal of Materials Processing Technology* 157: 650–657
- [174] Wysłocka E, Ulewicz R (2015) Magnets: history, the current state and the future. 24<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials (METAL 2015), Ostrava: 1680–1686
- [175] Zhai F, Sun A, Yuan D et al. (2011) Epoxy resin effect on anisotropic Nd-Fe-B rubber-bonded magnets performance. *Journal of Alloys and Compounds* 509(3): 687–690. doi: 10.1016/j.jallcom.2010.09.210
- [176] Kapustka K, Ziegmann G, Klimecka-Tatar D (2017) Technological and ecological safety in aspect of chemical properties of recycled neodymium magnets – electric motors and hard disk. *PEA* 17: 36–39. doi: 10.30657/pea.2017.17.08

- [177] Klimecka-Tatar D, Pietraszek J, Midor K (2016) Zarządzanie jakością w procesach specjalnych. Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedżerów Jakości i Produkcji, Częstochowa
- [178] Liker JK, Convis GL (2016) Droga Toyoty do Lean leadership. MT Biznes
- [179] Łukasiński W, Sikora T (2008) Filozofia TQM szansą na skuteczne zarządzanie organizacją. *Problemy Jakości* 11: 16–21
- [180] Liker JK (2016) Droga Toyoty. 14 zasad zarządzania wiodącej firmy produkcyjnej świata, MT Biznes
- [181] Grudzień Ł, Hamrol A (2016) Information quality in design process documentation of quality management systems. *International Journal of Information Management* 36(4):599–606. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2016.03.011
- [182] Kiefer J, Allegretti S, Breckle T (2017) Quality- and Lifecycle-oriented Production Engineering in Automotive Industry. *Procedia CIRP* 62: 446–451. doi: 10.1016/j.procir.2016.06.086
- [183] Kowalik K, Klimecka-Tatar D (2017) TQM i Lean Management jako koncepcje zarządzania rozwojem przedsiębiorstwa nastawionego na doskonalenie jakości: W: Wielgórka D. (red.) Wybrane problemy zarządzania nowoczesną organizacją we współczesnej gospodarce Wydawnictwo Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej: 48–57
- [184] Nan H, Zhu L, Liu H et al. (2015) Protection of NdFeB magnets by corrosion resistance phytic acid conversion film. *Applied Surface Science* 355: 1215–1221. doi: 10.1016/j.apsusc.2015.07.167
- [185] Pawłowska G, Klimecka-Tatar D, Mazik A (2012) Wpływ izolacji cząstek proszku na szybkość korozji magnesów wiązanych RE-M-B w zakwaszonym roztworze siarczanowym, *Ochrona przed Korozją* (11): 531–533
- [186] Klimecka-Tatar D, Bala H, Pawłowska G (2010) Wpływ mikroenkapsulacji cząstek proszku MQP-B na odporność korozyjną i właściwości użytkowe wiązanych di elektromagnesów, *Ochrona przed Korozją* 53(3): 124–127
- [187] Klimecka-Tatar D, Pawłowska G 13. Effect of Nd-Fe-B powders biencapsulation Ni-Pepoxy resin and phosphateepoxy resin coating on the dissolution kinetics of materials bonded in sulphate solutions, rozdz
- [188] Relich M, Pawlewski P (2018) A case-based reasoning approach to cost estimation of new product development. *Neurocomputing* 272: 40–45. doi: 10.1016/j.neucom.2017.05.092
- [189] Womack JP, Jones DT (2008) Lean thinking – szcuple myślenie Eliminowanie marnotrawstwa i tworzenie wartości w przedsiębiorstwie. ProdPress.com, Wrocław
- [190] Spagnol GS, Min LL, Newbold D (2013) Lean principles in Healthcare: An overview of challenges and improvements. *IFAC Proceedings Volumes* 46(24): 229–234. doi: 10.3182/20130911-3-BR-3021.00035

- 
- [191] Ulewicz R, Kucęba R (2016) Identification of Problems of Implementation of Lean Concept in the SME Sector. *Economics and Management* 8(1): 19–25
- [192] Ulewicz R, Mazur M (2015) Doskonalenie transportu wewnętrznego z wykorzystaniem koncepcji LEAN – studium przypadku. *Przegląd Organizacji* 7(906): 6–13
- [193] Haefner B, Kraemer A, Stauss T et al. (2014) Quality Value Stream Mapping. *Procedia CIRP* 17: 254–259. doi: 10.1016/j.procir.2014.01.093
- [194] Klimecka-Tatar D (2017) Value stream mapping as Lean production tool to improve the production process organization – case study in packaging manufacturing. *Production Engineering Archives* 17: 40–44. doi: 10.30657/pea.2017.17.09
- [195] Rother M, Shook J (2008) *Learning to see: value-stream mapping to create value and eliminate muda*. Lean Enterprise Institute, Cambridge, MA
- [196] Ali NB, Petersen K, Schneider K (2016) FLOW-assisted value stream mapping in the early phases of large-scale software development. *Journal of Systems and Software* 111: 213–227. doi: 10.1016/j.jss.2015.10.013
- [197] Bevilacqua M, Ciarapica FE, Mazzuto G et al. (2013) Visual Management implementation and evaluation through mental workload analysis. *IFAC Proceedings Volumes* 46(7): 294–299. doi: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00065
- [198] Klimecka-Tatar D (2016) Lean Techniques as Elements of Reengineering Support in Ever-Elvolving Enterprise: W: Hutny A, Warzecha M (red.) *Inżynieria procesów produkcji. Wybrane aspekty*. Monografie nr 6: 80–87. Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa
- [199] Kowalik K, Klimecka-Tatar D (2017) Mapowanie strumienia wartości w procesie obsługi klienta w przedsiębiorstwie usługowym. *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej* 2(1): 9–11
- [200] Edtmayr T, Sunk A, Sihn W (2016) An Approach to Integrate Parameters and Indicators of Sustainability Management into Value Stream Mapping. *Procedia CIRP* 41: 289–294. doi: 10.1016/j.procir.2015.08.037
- [201] Jereb B, Rosak-Szyrocka J (2014) Quality of Investments in Logistics. *Production Engineering Archives* 2(1): 6–8
- [202] Pacana A (2017) *Metoda 5S*. Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedżerów Jakości i Produkcji, Częstochowa
- [203] Selejda J, Klimecka-Tatar D, Knop K et al. (2012) *Metoda 5S. Zastosowanie, wdrażanie i narzędzia wspomagające*. Wyd. Verlag Dashofer
- [204] Pacana A, Ingaldi Manuela, Czakowska A (2016) *Zarządzanie bezpieczeństwem i produkcją z uwzględnieniem Lean Manufacturing*. Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedżerów Jakości i Produkcji, Częstochowa

- [205] Kianto A, Sáenz J, Aramburu N (2017) Knowledge-based human resource management practices, intellectual capital and innovation. *Journal of Business Research* 81: 11–20. doi: 10.1016/j.jbusres.2017.07.018
- [206] Resta B, Powell D, Gaiardelli P et al. (2015) Towards a framework for lean operations in product-oriented product service systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9: 12–22. doi: 10.1016/j.cirpj.2015.01.008
- [207] Romero LF, Arce A (2017) Applying Value Stream Mapping in Manufacturing: A Systematic Literature Review. *IFAC-PapersOnLine* 50(1): 1075–1086. doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.385
- [208] Stofkova J, Borkowski S (2007) Praktyka zarządzania jakością wyrobów i usług. Oficyna Wydawnicza Humanitas, Sosnowiec
- [209] Andrés-López E, González-Requena I, Sanz-Lobera A (2015) Lean Service: Reassessment of Lean Manufacturing for Service Activities. *Procedia Engineering* 132: 23–30. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.463
- [210] Werner D, Cruz C (2013) Precision Difference Management using a Common Sub-vector to Extend the Extended VSM Method. *Procedia Computer Science* 18: 1179–1188. doi: 10.1016/j.procs.2013.05.284
- [211] White G, Nallur V, Clarke S (2017) Quality of service approaches in IoT: A systematic mapping. *Journal of Systems and Software* 132: 186–203. doi: 10.1016/j.jss.2017.05.125
- [212] Carvalho L, Goodyear P (2017) Design, learning networks and service innovation. *Design Studies*. doi: 10.1016/j.destud.2017.09.003
- [213] Kurdve M, Shahbazi S, Wendin M et al. (2015) Waste flow mapping to improve sustainability of waste management: A case study approach. *Journal of Cleaner Production* 98: 304–315. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.076
- [214] Griffin RW (2017) Podstawy zarządzania organizacjami, 3<sup>rd</sup> edn. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- [215] Klimecka-Tatar D (2018) Context of production engineering in management model of Value Stream Mapping according to manufacturing industry. *Production Engineering Archives* 21: 32–35. doi: 10.30657/pea.2018.21.07
- [216] Klimecka-Tatar D (2009) Modyfikowanie właściwości fizykochemicznych magnesów poprzez chemiczną obróbkę nanokrystalicznego proszku na bazie Nd-Fe-B. Rozprawa doktorska. Politechnika Częstochowska, Częstochowa
- [217] Klimecka-Tatar D, Bala H, Ślusarek B, Jagielska-Wiaderek K (2009) The effect of consolidation method on electrochemical corrosion of polymer bonded Nd-Fe-B type magnetic material. *Archives of Metallurgy and Materials* 54(1): 247–256

- [218] Klimecka-Tatar D (2014) The Powdered Magnets Technology Improvement by Biencapsulation Method and Its Effect on Mechanical Properties. *Manufacturing Technology* 14(1)
- [219] Knop K, Ingaldi M, Śmiałek-Starczynowska M (2018) Reduction of Errors of the Conformity Assessment During the Visual Inspection of Electrical Devices: In: Hamrol A, Ciszak O, Legutko S, Jurczyk M (red.) *Advances in Manufacturing. 5<sup>th</sup> International Scientific-Technical Conference MANUFACTURING 2017*, Poznań, Polska. *Lecture Notes in Mechanical Engineering, Advances in Manufacturing*. doi: 10.1007/978-3-319-68619-6\_83
- [220] Knop K, Mielczarek K (2018) Using 5W-1H and 4M Methods to Analyse and Solve the Problem with the Visual Inspection Process – case study. *MATEC Web Conf.* 183(5-6): 3006. doi: 10.1051/mateconf/201818303006
- [221] Klimecka-Tatar D, Bala H, Pawłowska G (2011) Wpływ enkapsulacji cząstek proszków Nd-M-B powłokami Ni-P na szybkość korozji atmosferycznej magnesów wiązanych, *Ochrona przed Korozją* 54(4-5): 147-148
- [222] Pawłowska G, Klimecka-Tatar D, Mazik A (2013) The Effect of Nd-Fe,Co-B Powder Biencapsulation with Cu/Epoxy Resin Coating on The Corrosion Behavior in Sulphate Solution of Bonded Magnets. *Ochrona przed Korozją* 56(4): 174-176
- [223] Klimecka-Tatar D, Pawłowska G, Bala H (2011) Wpływ enkapsulacji cząstek proszku Nd-M-B powłoką Ni-P na szybkość korozji magnesów w zakwaszonych roztworach siarczanowych. *Ochrona przed Korozją* 54(7): 387-390
- [224] Pawłowska G, Klimecka-Tatar D, Mazik A (2013) Wpływ bienkapsulacji proszków Nd<sub>12</sub>Fe<sub>77</sub>Co<sub>5</sub>B<sub>6</sub> na kinetykę roztwarzania materiałów wiązanych w zakwaszonych roztworach siarczanowych, *Hutnik. Wiadomości hu. Hutnik – Wiadomości Hutnicze* (5): 398-403
- [225] Klimecka-Tatar D, Pawłowska G, Radomska K (2013) Effect of the Nd-Fe,Co-B Powder Biencapsulation with Ni-P/Epoxy Resin and Phosphate/Epoxy Resin Coatings on the Potentiokinetic Characteristic of Bonded Magnets in the Phosphate Solution. *Ochrona przed Korozją* 56(5): 187-190
- [226] Klimecka-Tatar D, Pawłowska G, Radomska K (2013) Effect of the Nd-Fe,Co-B powder biencapsulation with Ni-Pepoxy resin and phosphateepoxy resin coatings on the potentiokinetic characteristic of Bondem 56(5): 187-190
- [227] Klimecka-Tatar D, Pawłowska G, Szymura S et al. (2012) Wpływ izolacji cząstek proszku na szybkość korozji magnesów wiązanych RE-M-B w zakwaszonym roztworze siarczanowym. *Ochrona przed Korozją* (11): 505-508
- [228] Bryan KA, Lemus J (2017) The direction of innovation. *Journal of Economic Theory* 172: 247-272. doi: 10.1016/j.jet.2017.09.005



- [229] Brzóška J (2016) Innovation as a factor of steel sector companies value growth. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza* 68(2): 17–23
- [230] David J.C. Constable (2017) The practice of chemistry still needs to change. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. New Synthetic Methods* 2017, 7: 60–62
- [231] Głuszewski W (2015) Innowacje w przemyśle tworzyw polimerowych. *Innovation in the plastics industry. PTJ* 58(3): 34–35
- [232] (2008) *Podręcznik OSLO. Zasady gromadzenia i interpretacji danych dotyczących innowacji technologicznych*, OECD i Eurostat, Warszawa
- [233] Walrave B, Talmar M, Podoynitsyna KS et al. (2017) A multi-level perspective on innovation ecosystems for path-breaking innovation. *Technological Forecasting and Social Change*. doi: 10.1016/j.techfore.2017.04.011
- [234] Sivard G, Shariatzadeh N, Lindberg L (2014) Engineering Innovation Factory. *Procedia CIRP* 25: 414–419. doi: 10.1016/j.procir.2014.10.057
- [235] Baran J, Ryszko Adam Opracowywanie i wdrażanie ekoinnowacji technicznych a ekoprojektowanie – integracja procesów i wskazówki metodyczne ich realizacji: W: Knosala R (red.) *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*. 34–46
- [236] Batten MP, Rubio-Martinez M, Hadley T et al. (2015) Continuous flow production of metal-organic frameworks. *Current Opinion in Chemical Engineering* 8: 55–59. doi: 10.1016/j.coche.2015.02.001
- [237] Fitzpatrick DE, Ley SV (2017) Engineering chemistry for the future of chemical synthesis. *Tetrahedron*. doi: 10.1016/j.tet.2017.08.050
- [238] Dembińska-Cyran I, Hołub-Iwan J, Perenc J (2004) *Zarządzanie relacjami z klientem*. Difin S.A., Warszawa

# PROJEKTOWANIE I PLANOWANIE KIERUNKÓW ROZWOJU INNOWACJI PROCESOWYCH I PRODUKTOWYCH W PROCESIE WYTWARZANIA WYBRANEJ GRUPY KOMPOZYTÓW MAGNETYCZNYCH

## Streszczenie

Treść niniejszej monografii odnosi się do problemów związanych z organizacją procesów produkcyjnych i technologicznych, jak również do rozwoju innowacji procesowych i produktowych w produkcji wybranej grupy kompozytów magnetycznych. Proces produkcji materiałów kompozytowych o unikalnych właściwościach magnetycznych jest procesem bardzo złożonym, a ze względu na bardzo dużą zmienność procesu wytwórczego kluczowe jest, aby system produkcyjny miał znamiona rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego, czyli aby posiadał zalety zarówno produkcji seryjnej, jak i elastycznych systemów produkcyjnych. Ogólna struktura opracowania obejmuje między innymi tematykę: organizacji procesów produkcyjnych i technologicznych w świetle zmian przemysłu, ustalenia zestawu kryteriów jakości dla wybranej grupy produktów, usystematyzowania parametrów użytkowych dla wyrobów z materiałów magnetycznie trwałych w odniesieniu do zmienności technik produkcji, projektowania procesu produkcyjnego z wykorzystaniem narzędzi *Lean Production*, jak również tematykę kreowania innowacji produktowych i procesowych w branży kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B w odniesieniu do ekonomii i potrzeb rynku.

Główny cel niniejszej pracy odnosi się do wskazania kierunków rozwoju innowacji produktowych i procesowych w procesach wytwórczych kompozytów magnetycznych na bazie proszków Nd-Fe,Co-B. Analiza wstępnego projektu procesu na podstawie mapy strumienia wartości (VSM) pozwoliła na wytypowanie dwóch krytycznych kierunków rozwoju produktu i technologii. Pierwszy z nich obejmował przywrócenie pierwotnych cech materiału proszkowego wobec samorzutnej degradacji materiału w warunkach magazynowania i przetwarzania oraz zapobieganie utlenianiu proszków na bazie Nd-Fe,Co-B na każdym etapie przetwarzania.

Rozwiązaniami krytycznymi dla omawianych procesów produkcyjnych okazały się być techniki wstępnego przygotowania powierzchni cząstek proszku poprzez trawienie oraz enkapsulację (biekapsulację) powierzchni cząstek proszku magnetycz-

nego. W odniesieniu do proszków już powierzchniowo utlenionych zastosowano trawienie cząstek proszku w wodnych roztworach słabych kwasów organicznych lub też w roztworach związków kompleksujących, np. trawienie w wodnych roztworach kwasu cytrynowego lub szczawowego. Natomiast w odniesieniu do zabezpieczenia powierzchni zastosowano technikę zabezpieczania powierzchni cząstek proszków warstwami i powłokami ochronnymi. Powłoki tego typu mają na celu zabezpieczenie powierzchni metalu przed intensywnym utlenianiem podczas operacji technologicznych.

Stwierdzono, że zaproponowane kierunki rozwoju produktu w oparciu o szereg parametrów z kryterium wytrzymałości eksploatacyjnej mają korzystny wpływ w aspekcie wskazanych celów szczegółowych pracy. Dodanie operacji technologicznych takich, jak trawienie cząstek proszku w wodnych roztworach słabych kwasów organicznych lub też w roztworach związków kompleksujących oraz zabezpieczenie powierzchni metalu w procesach enkapsulacji i enkapsulacji korzystnie wpływa na wytrzymałość eksploatacyjną wyrobu, gdyż skutecznie chroni przed intensywnym utlenianiem powierzchni cząstek proszku podczas operacji technologicznych. Techniki trawienia i zabezpieczania powierzchni cząstek proszku przyczyniają się do zwiększenia homogenizacji i równomiernego rozproszczenia materiału spoiwa w objętości kompozytu magnetycznego. W pewnym stopniu ograniczają uszkodzenia mechaniczne na wszystkich etapach procesu produkcyjnego, a finalnie sprzyjają hamowaniu procesów korozyjnych gotowych materiałów.

Oceny skuteczności zastosowanych zmian w organizacji procesu dokonano na podstawie analizy powtarzalności procesu – powtarzalności pod względem spełnienia kryteriów zatwierdzających wyrób jako zgodny. Na podstawie przeprowadzonej statystycznej kontroli procesu można jednoznacznie stwierdzić, że procesy są stabilne i przewidywalne w swoim przebiegu, co dowodzi o możliwościach wdrożenia wskazanych innowacji.

## DESIGNING AND PLANNING OF THE PROCESS AND PRODUCT INNOVATIONS DEVELOPMENT DIRECTIONS IN THE PROCESS OF PRODUCING A SELECTED GROUP OF MAGNETIC COMPOSITES

### Abstract

The content of this monograph refers to problems related to the organization of production and technological processes, as well as to the development of process and product innovations in the production of a selected group of magnetic composites. The production process of composite materials with unique magnetic properties is a very complex process, and due to the very high variability it is crucial that the production system has the features of a reconfigurable production system, that is, it has the advantages of both serial production and flexible production systems. The overall structure of the study covers, among others, the themes of: organization of production and technological processes in the light of industry changes, establishing a set of quality criteria for a selected group of products, systematizing user parameters for products made of magnetically permanent materials with respect to variation of production techniques, designing the production process using *Lean tools*, as well as the themes of creating product and process innovations in the field of magnetic composites based on Nd-Fe,Co-B powders in relation to economics and market needs.

The main goal of this work is to indicate the directions of product and process innovations development in the production of magnetic composites based on Nd-Fe,Co-B powders. The analysis of the initial process design based on the value stream mapping (VSM) allowed for the selection of two critical directions of product and technology development. The first one is in the context of spontaneous material degradation, and the second one, in the context of the surface oxidation inhibition.

The critical solutions for the discussed production processes have been the techniques of pre-treatment of the powder particles surface by etching and encapsulation of magnetic powder particles. With respect to the powders surface already oxidized, the powder particles have been exposed in aqueous solutions of weak organic acids or in solutions of complexing compounds, e.g. etching in

aqueous solutions of citric acid or oxalic acid. However, with regard to surface protection, a technique of protecting surface coatings have been used. The powder particles single- or double-layer coating has been intended to protect the metal surface against intense oxidation during technological operations.

It has been found that the proposed directions of product development based on a number of operational parameters have a beneficial effect in terms of the specific work objectives indicated. The addition of technological operations such as the etching of powder particles in aqueous solutions of weak organic acids or in solutions of complexing compounds and the protection of the metal surface by encapsulation or biencapsulation positively affects the operational strength of the product. It effectively protects against intensive oxidation of the powder particles surface during technological operations. The techniques of powder particles etching and biencapsulation contribute to increased homogenization and uniform distribution of the binder material in the volume of the magnetic composite. To some extent, they limit mechanical damage at all stages of the production process, and ultimately favor the inhibition of corrosion processes of final materials.

The effectiveness evaluation of the changes applied to the process organization has been made on the basis of the process repeatability analysis – repeatability in terms of meeting the criteria approving the product as compatible. On the basis of statistical control of the process it can be clearly stated that the processes are stable and predictable in their course, which proves the indicated innovations implementation possibilities.

# **DESIGN UND PLANUNG DER PROZESS- UND PRODUKTIONSINNOVATIONEN IM DER HERSTELLUNGSPROZESS VON MAGNETISCHEN VERBUNDWERKSTOFFE**

## **Zusammenfassung**

In der Monographie bezieht sich auf Probleme im Zusammenhang mit der Organisation von Produktions- und technologischen Prozessen sowie der Entwicklung von Prozess- und Produktinnovationen bei der Herstellung einer ausgewählten Gruppe von magnetischen Verbundwerkstoffen. Der Herstellungsprozess von Verbundwerkstoffen mit einzigartigen magnetischen Eigenschaften ist ein sehr komplexer Prozess. Aufgrund der sehr hohen Variabilität ist es entscheidend, dass das Produktionssysteme die Eigenschaften eines bestimmten Produktionssystem aufweist, d.h. die Vorteile sowohl der Serienproduktion als auch der flexiblen Produktionssysteme bietet. Die Gesamtstruktur der Studie umfasst unter anderem die Themen: Organisation von Produktions- und technologischen- Prozessen im Hinblick auf Branchenveränderungen, Festlegung eines Satzes von Qualitätskriterien für eine ausgewählte Produktgruppe, Systematisierung von Parametern für Produkt aus magnetischen Materialien unter Berücksichtigung der Variation von Produktionsprozess mit Lean-Tools sowie die Themen der Schaffung von Produkt. Der weitere Teil des Projektes ist Prozessinnovationen im Bereich magnetischer Verbundwerkstoffe auf Basis von Nd-Fe,Co-B-Pulver in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Marktbedürfnisse entwickelt.

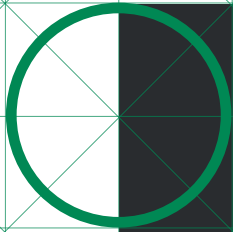
Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die Entwicklung von Produkt- und Prozessinnovationen bei der Herstellung von magnetischen Verbundwerkstoffen auf Basis von Nd-Fe,Co-B- Pulver aufzuzeigen. Die Analyse des Ersten Prozessdesigns auf der Grundlage des Wertstrom-Mapping (VSM) ermöglicht die Auswahl von zwei kritischen Richtungsweisen der Produkt- und Technologieentwicklung. Der erste ist im Zusammenhang mit dem spontanen Materialabbau und der zweite im Rahmen der Oberflächenoxidationshemmung.

Die kritischen Lösungen für die diskutierten Produktionsprozesse sind die Verfahren der Vorbehandlung der Pulveroberfläche durch Ätzen und Verkapseln

von magnetischen Pulverpartikeln. Im Hinblick auf die bereits oxidierte Pulveroberfläche wurden die Pulverpartikel in wässrigen Lösungen schwacher organischer Säuren oder in Lösungen von Komplexverbindungen, z.B. Ätzen in wässrigen Lösungen von Zitronensäure oder Oxalsäure, freigesetzt. Im Bereich des Oberflächenschutzes wird jedoch eine Technik zum Schutz von Oberflächenbeschichtungen eingesetzt. Die ein- oder zweischichtige Beschichtung der Pulverpartikel soll die Metalloberfläche vor intensive Oxidation während des technologischen Betriebs schützen.

Es wurde festgestellt, dass die vorgeschlagenen Entwicklungsrichtungen für Produkte, die auf einer Reihe von Betriebsparametern basieren, sich positive auf die angegebenen spezifischen Arbeitsziele auswirken. Die Zugabe von technologischen Verfahren wie das Ätzen von Pulverpartikeln in wässrigen Lösungen organische Säuren oder in Lösungen von Komplexbildern und der Schutz der Metalloberfläche durch Verkapslung wirkt sich positive auf die Betriebsfestigkeit des Produkts aus. Es schützt wirksam von einer intensiven Oxidation der Oberfläche während des technologischen Prozesses. Die Methoden des Ätzens von Pulverpartikeln und der Verkapslung führen zu einer erhöhten Homogenisierung und gleichmäßigen Verteilung des Bindemittels im Volumen des magnetischen Verbund. Bis zu einem gewissen Grad begrenzen sie mechanische Einwirkungen auf alle Phasen des Produktionsprozesses und fördern letztlich die Vermeidung von Korrosionsprozessen der Endmaterialien.

Die Wirkungsanalyse an der Prozessorganisation wird auf der Grundlage der Analyse der Prozessreproduzierbarkeit bestimmt. Die Reproduzierbarkeit ist im Hinblick auf die Erfüllung der Kriterien für die Genehmigung des Produkts als kompatibel nachgewiesen. Auf die Grundlage der statistischen Kontrolle des Prozesses sind in ihrem Verlauf stabil und planbar, was die aufgezeigten Umsetzungsmöglichkeiten von Innovationen belegt.



ISBN 978-83-65991-69-0  
e-ISBN 978-83-65991-72-0

