OPEN ACCESS LIBRARY

Scientific International Journal of the World Academy
of Materials and Manufacturing Engineering
publishing scientific monographs in Polish or in English only

Published since 1998 as Studies of the Institute of Engineering Materials and Biomaterials

Volume 1 (7) 2012

Anna D. Dobrzańska-Danikiewicz

Metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów

OPEN ACCESS LIBRARY

Scientific International Journal of the World Academy
of Materials and Manufacturing Engineering
publishing scientific monographs in Polish or in English only

Published since 1998 as Studies of the Institute of Engineering Materials and Biomaterials **Volume 1 (7) 2012**

Editor-in-Chief

Prof. Leszek A. Dobrzański – Poland

Editorial Board

Prof. Gilmar Batalha – Brazil
Prof. Emin Bayraktar – France
Prof. Rudolf Kawalla – Germany
Prof. Stanisław Mitura – Poland
Prof. Jerzy Nowacki – Poland
Prof. Ryszard Nowosielski – Poland
Prof. Jerzy Pacyna – Poland
Prof. Zbigniew Rdzawski – Poland
Prof. Maria Richert – Poland
Prof. Maria Helena Robert – Brazil
Prof. Mario Rosso – Italy
Prof. Bozo Smoljan – Croatia
Prof. Mirko Sokovic – Slovenia
Prof. Leszek Wojnar – Poland

Patronage

World Academy of Materials and Manufacturing Engineering

Association of Computational Materials Science and Surface Engineering

Institute of Engineering Materials and Biomaterials of the Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

Abstracting services

Journal is cited by Abstracting Services such as:

The Directory of Open Access Journals

Reading Direct

This journal is a part of Reading Direct, the free of charge alerting service which sends tables of contents by e-mail for this journal and in the promotion period also the full texts of monographs. You can register to Reading Direct at

www.openaccesslibrary.com

Journal Registration

The Journal is registered by the Civil Department of the District Court in Gliwice, Poland

Publisher

International OCSCO World Press
Gliwice 44-100, Poland, ul. S. Konarskiego 18a/366
e-mail: info@openaccesslibrary.com

Bank account: Stowarzyszenie Komputerowej Nauki o Materiałach i Inżynierii Powierzchni
Bank name: ING Bank Śląski
Bank addres: ul. Zwycięstwa 28, 44-100 Gliwice Poland
Account number/ IBAN CODE: PL 76105012981000002300809767
Swift code: INGBPLPW
Gliwice

® 2012 International OCSCO World Press. All rights reserved
♾ The paper used for this Journal meets the requirements of acid-free paper Printed in Poland

Anna D. DOBRZAŃSKA-DANIKIEWICZ

Metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów

Metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów

OPINIODAWCY:

Prof. zw. dr hab. inż. Andrzej Buchacz
(Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania Politechniki Śląskiej w Gliwicach)

Prof. zw. dr hab. Stanisław Mitura
(Instytut Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej Politechniki Koszalińskiej w Koszalinie)

Prof. zw. dr hab. inż. Stanisław Tkaczyk
(Wydział Zarządzania Politechniki Warszawskiej w Warszawie)

Prof. zw. dr hab. inż. Marian Żenkiewicz
(Katedra Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy)

REDAKCJA TECHNICZNA:

Dr inż. Eugeniusz Hajduczek
(Politechnika Śląska – Gliwice)

ŹRÓDŁO FINANSOWANIA:

Druk książki sfinansowano ze środków projektu POIG.01.01.01-00-023/08-03 FORSURF pt. „Foresight wiodących technologii kształtowania własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych", współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ ROZWOJU REGIONALNEGO

ISSN 2083-5191
ISBN 83-89728-98-2
EAN 9788389728982

Spis treści

Streszczenie 5

Abstract 7

1. Wprowadzenie 9

2. Analiza stanu wiedzy 19

2.1. Ogólna klasyfikacja technologii obróbki powierzchni materiałów inżynierskich 20

2.2. Ogólny przegląd metod technologicznych kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich 23

3. Koncepcja i metodyka pracy 32

3.1. Teza i cel pracy 32

3.2. Zakres pracy 33

3.3. Metodyka badań materiałoznawczych 45

3.4. Metodyka badań heurystycznych 51

3.5. Metodyka technologii informacyjnej 56

4. Oryginalne metody i narzędzia analityczne składające się na metodologię komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów 64

4.1. Macierze kontekstowe 65

4.2. E-foresight i metoda e-Delphix 73

4.3. Oryginalna technologia informacyjna 80

4.4. Księga Technologii Krytycznych inżynierii powierzchni materiałów 92

4.5. E-transfer technologii 99

5. Weryfikacja poprawności opracowanej metodologii na podstawie wybranych technologii szczegółowych inżynierii powierzchni materiałów 104

5.1. Metodyka prezentacji wyników weryfikacji doświadczalnej nowo opracowanej metodologii 104

5.2. Reprezentatywny przykład implementacji metodologii w odniesieniu do obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco 109

5.3. Syntetyczny opis weryfikacyjnych badań materiałoznawczo-heurystycznych 136

5.4. Wnioski pośrednie dotyczące weryfikacji doświadczalnej nowo opracowanej metodologii na podstawie wybranych studiów przypadku 189

Spis treści

6. Perspektywy rozwojowe krytycznych technologii inżynierii powierzchni materiałów 199

6.1. Pozycja strategiczna i trendy rozwojowe technologii krytycznych sklasyfikowanych zgodnie z podejściem procesowym 203

6.2. Pozycja strategiczna i trendy rozwojowe technologii krytycznych sklasyfikowanych zgodnie z podejściem konsumenckim 217

7. Wspomagane sieciami neuronowymi makro- i mezoscenariusze przyszłych wydarzeń dotyczących inżynierii powierzchni materiałów 233

7.1. Makroscenariusze a rozwój obszarów tematycznych inżynierii powierzchni materiałów 237

7.2. Makroscenariusze a kluczowe mezoczynniki determinujące rozwój inżynierii powierzchni materiałów 247

8. Utylitarne znaczenie wyników wykonanych prac naukowo-badawczych i nowo opracowanej metodologii 255

9. Podsumowanie i wnioski końcowe 261

Literatura 270

Wykaz skrótów użytych w pracy 286

Metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów

Anna D. Dobrzańska-Danikiewicz

Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska,

ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, Polska

Adres korespondencyjny e-mail: anna.dobrzanska-danikiewicz@polsl.pl

Streszczenie

Cel: *Celem niniejszej monografii naukowej jest opracowanie oryginalnej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, z wykorzystaniem badań strukturalnych oraz własności mechanicznych i innych własności fizykochemicznych materiałów obrobionych z użyciem różnych technologii kształtowania struktury i własności warstw wierzchnich i powłok różnych materiałów inżynierskich oraz badań heurystycznych strategicznego zarządzania wiedzą, w tym macierzy kontekstowych, mapowania drogowego technologii, wieloetapowego badania opinii ekspertów i oceny wzajemnych oddziaływań wspomaganych technologią informacyjną obejmującą organizację wirtualną, platformę internetową oraz sztuczne sieci neuronowe w powiązaniu z modelowaniem metodą Monte Carlo .*

Projekt/metodologia/podejście: *Złożony aparat metodologiczny, służący do diagnozowania kluczowych problemów naukowych, technologicznych, gospodarczych i ekologicznych w obszarze inżynierii powierzchni materiałów inżynierskich oraz określenia kierunków jej rozwoju strategicznego i podejmowania decyzji, zasadniczo dotyczy trzech wzajemnie przenikających się dziedzin wiedzy: inżynierii powierzchni materiałów, wchodzącej w skład inżynierii materiałowej, foresightu technologicznego, jako ogółu działań zmierzających do wybrania najkorzystniejszej wizji przyszłości oraz wskazania dróg jej realizacji, należącego do dziedziny organizacji i zarządzania, oraz technologii informacyjnej, wywodzącej się z informatyki. Niektóre etapy badań wymagały jednak znacznie szerszego spojrzenia na rozpatrywane zagadnienia, i sięganie do aparatu metodologicznego innych dyscyplin nauki, jak choćby statystyki, bądź ekonometrii, badań operacyjnych i zarządzania strategicznego.*

Osiągnięcia: *Zasadniczym osiągnięciem naukowym jest opracowanie metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, obejmującej zwarty opis ciągu działań i czynności ukierunkowanych na wyłonienie i przejrzystą ujednoliconą charakterystykę technologii krytycznych inżynierii powierzchni, wytyczenie strategicznych kierunków rozwojowych oraz opracowanie wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń, porządkującej proces prognozowania, a także usprawniając go i unowocześniając, dzięki zastosowaniu technologii informacyjnej obejmującej organizację wirtualną, platformę internetową i sztuczne sieci neuronowe. Dla udowodnienia tezy pracy*

przyjęto bardzo obszerny zakres badań zastosowany do określania pozycji strategicznej 140 grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w założonym horyzoncie czasowym 20 lat, zgrupowanych w dwóch polach badawczych reprezentujących alternatywne spojrzenia producentów i klientów – potencjalnych użytkowników produktów. Rozpatrzono 3 alternatywne scenariusze przyszłych wydarzeń: optymistyczny, neutralny i pesymistyczny, które utworzono na podstawie wyników badań ankietowych przeprowadzonych drogą elektroniczną wśród kilkuset ekspertów. Z wykorzystaniem wyników badań eksperckich utworzono modele sztucznych sieci neuronowych do kreowania wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń.

Ograniczenia badań/zastosowań: *Praktycznej implementacji wymaga opracowana koncepcja e-transferu technologii, gdyż istnieje możliwość, potrzeba i konieczność zastosowania wyników wykonanych badań w rzeczywistości gospodarczej na poziomie makro, mezo i mikro, a metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju wsparta rozbudowaną technologią informacyjną nadaje się do bezpośredniej aplikacji w innych obszarach wiedzy przy zachowaniu kosztów ekonomicznie uzasadnionych. Długoterminowe efekty wykonanych badań e-foresightowych, szeroko rozpowszechnionych z użyciem Internetu, zgodnie z koncepcją e-transferu technologii, stanowią jeden z zasadniczych czynników przyczyniających się do przyspieszenia zrównoważonego rozwoju kraju i Europy, wzmocnienia gospodarki opartej na wiedzy i innowacji oraz statystycznego wzrostu jakości technologii stosowanych w przemyśle.*

Praktyczne zastosowania: *Wyniki serii badań własnych materiałoznawczo-heurystycznych umożliwiły pozytywną weryfikację poprawności nowo opracowanej metodologii. Jest ona przydatnym i efektywnym narzędziem prognozowania rozwoju, nadającym się do zastosowania w obszarze inżynierii powierzchni materiałów, co w pełni uzasadnia jej wykorzystywanie w dalszych badaniach. Badania heurystyczne pozwalają na otrzymanie wiarygodnych wyników, umożliwiających wytyczenie prognozowanych trendów rozwojowych analizowanych grup technologii i określenie ich pozycji strategicznej na tle innych grup technologii i inżynierii powierzchni materiałów, bez konieczności wspierania ich klasycznymi badaniami materiałoznawczymi.*

Oryginalność/wartość: *W wyniku wykonania licznych badań m.in. materiałoznawczo-heurystycznych, udowodniono tezę naukową postawioną w pracy, że w celu ograniczenia ryzyka prognozowania przyszłościowych kierunków rozwoju technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich, uzasadnione jest zastosowanie komputerowo zintegrowanej metodologii badań materiałoznawczych i heurystycznych strategicznego zarządzania wiedzą. Zasadne jest stosowanie sztucznych sieci neuronowych do kreowania wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń, ponieważ umożliwiają one wygenerowanie alternatywnych prognoz, w postaci wartości prawdopodobieństwa zaistnienia alternatywnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń zależnych od wystąpienia rozpatrywanych warunków lub czynników szczegółowych.*

Słowa kluczowe: *Inżynieria powierzchni materiałów; Badania heurystyczne; Foresight technologiczny; Mapy drogowe technologii; Sieci neuronowe; Zarządzanie wiedzą i informacją*

Cytowania tej monografii powinny być podane w następujący sposób:

A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, Metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, Open Access Library, Volume 1 (7) (2012) 1-289.

Computer integrated development prediction methodology in materials surface engineering

Anna D. Dobrzańska-Danikiewicz

Faculty of Mechanical Engineering, Silesian University of Technology,

Konarskiego St. 18a, 44-100 Gliwice, Poland

Corresponding e-mail address: anna.dobrzanska-danikiewicz@polsl.pl

Abstract

Purpose: *The purpose of this scientific monograph is to establish an original methodology of the computer integrated prediction of materials surface engineering development. On one hand, structural investigations and the investigations of mechanical properties and other physiochemical properties of the materials treated using the various structure and properties formation technologies of surface layers and coatings of different engineering materials were used to develop the methodology. On the other hand, the heuristic research was also performed of strategic knowledge management using contextual matrices, technology roadmapping, multi-stage examination of experts' opinions and the assessment of interactions assisted with information technology encompassing virtual organisation, web platform and artificial neural networks in conjunction with modelling with the Monte Carlo method.*

Design/methodology/approach: *A complex methodological apparatus serving to diagnose the key scientific, technological, economic and ecological issues in the area of engineering materials surface engineering and to identify the directions of its strategic development and decision-making, pertains essentially to the three overlapping fields of knowledge. The fields include materials surface engineering forming part of material engineering, technology foresight, as overall actions aimed at selecting the most beneficial visions of future and indicating the ways to implement the future, being part of the field of organisation and management, and information technology originating from computer science. A much broader view on the issues analysed was required at some stages of the research, however, and the methodological apparatus of other fields of science had to be used, for instance statistics or econometrics, operational research and strategic management.*

Findings: *The underlying scientific goal is to develop a methodology of the computer integrated prediction of materials surface engineering's development including a concise description of the course of actions and activities. The actions and activities are targeted at selecting and characterising, in a clear and harmonised manner, the critical surface engineering technologies, at paving the strategic development directions and at developing the multi-variant probabilistic scenarios of future events. Moreover, the newly established methodology is harmonising the prediction process, and is also improving and modernising the process by using information technology encompassing virtual organisation, web platform and artificial neural networks. In order to prove the thesis of the paper, a very extensive scope of research has been adopted for determining the strategic position of 140 groups of critical*

materials surface engineering technologies with the best development prospects and/or of key significance in industry over the assumed time horizon of 20 years, grouped into the two research fields representing an alternative prospective of producers and customers – the potential users of products. 3 alternative scenarios of future events were considered: optimistic, neutral and pessimistic, created on the basis of the results of surveys made by an electronic way among several hundred experts. The models of artificial neural networks for creating the multi-variant probabilistic scenarios of future events were developed using the results of expert investigations.

Research limitations/implications: *The concept established of technology e-transfer needs to be implemented practically as it is possible, needed and necessary to apply the results of the research performed in the economic reality at the macro-, mezo- and microlevel. The methodology of computer integrated development prediction, supported with extended information technology, is also suitable for direct application in other areas of knowledge, while maintaining economically reasonable costs. The long-term effects of the e-foresight research performed, broadly disseminated via the Internet, represent – in line with the technology e-transfer concept – one of the crucial factors contributing to the accelerated sustainable development of Poland and Europe, a stronger knowledge- and innovation-based economy and statistical growth in the quality of the technologies used in industry.*

Practical implications: *The outcomes of the own materials science and heuristic research have enabled to review whether the newly established methodology is correct. The methodology is a useful and effective tool of development prediction and is suitable for use in the area of materials surface engineering and this fully substantiates its use in the further research. Heuristic research allows to produce credible results enabling to identify the prediction development trends of the analysed groups of technologies and to determine their strategic position against other groups of technologies and materials surface engineering, without having to support them with classical materials science research.*

Originality/ value: *A scientific thesis presented in the paper – i.e. that it is substantiated to employ the computer integrated materials science and heuristic research methodology of strategic knowledge management to lessen the risk of predicting the prospective directions of the engineering materials surface properties and structure formation technology - was proved as a result of carrying out multiple investigations. It is reasonable to use artificial neural networks to create multi-variant probabilistic scenarios of future events as they allow to generate alternative forecasts as a probability that certain alternative macroscenarios of future events occur dependent upon the emergence of the special conditions or factors considered.*

Keywords: *Materials surface engineering; Heuristic research; Technology foresight; Technology roadmaps; Neural networks; Knowledge and information management*

Reference to this monograph should be given in the following way:

A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, Computer integrated development prediction methodology in materials surface engineering, Open Access Library, Volume 1 (7) (2012) 1-289.

1. Wprowadzenie

Kompleksowe działania, zapewniające postęp oraz spójność społeczną i terytorialną, dotyczące wzrostu poziomu zatrudnienia, wzrostu poziomu inwestycji na badania, rozwój i innowacje, ograniczenia negatywnych skutków zmian klimatu i lepszego wykorzystania źródeł energii, w tym odnawialnych, wzrostu poziomu edukacji oraz redukcji ubóstwa i wykluczenia społecznego, są istotą europejskiej gospodarki opartej na wiedzy i innowacji. Innowacje rozumiane jako cenne, nowatorskie pomysły są podstawą rozwoju gospodarczego dotyczącego produkcji, dystrybucji i wdrożenia wiedzy, będącej produktem i stanowiącej główny przyczynek do zrównoważonego rozwoju. Strumień inwestycji, gwarantujący oczekiwany postęp, powinien być skierowany na najbardziej efektywne dziedziny nauki i gałęzie przemysłu, przynoszące największą wartość dodaną [1-3]. Zakładany rozwój ma być inteligentny, sprzyjający włączeniu społecznemu i zrównoważony [1], pomimo obecnie trudnej sytuacji gospodarczej i towarzyszących jej problemów, dotyczących zmian klimatu, wzrostu zużycia i wyczerpywania się tradycyjnych źródeł energii, bezpieczeństwa żywności, służby zdrowia i postępującego starzenia się społeczeństwa. Współcześnie do najważniejszych cywilizacyjnych priorytetów rozwojowych należy zaliczyć następujące zagadnienia:

- poprawę jakości życia, przejawiającą się troską o zdrowie ludzi i możliwe wydłużenie życia ludzkiego,
- zapewnienie żywności i wody dla ciągle rosnącej populacji ludzkiej wraz z likwidacją głodu w strefach globu z nim związanych oraz wzrostem poziomu technologicznego upraw, hodowli, przetwórstwa i magazynowania żywności,
- zrównoważony rozwój, umożliwiający najwyższy osiągalny poziom technologiczny wytwarzania dóbr użytku codziennego, najlepiej spełniających oczekiwania ludzi, przy obserwowanej tendencji do miniaturyzacji wszelkich urządzeń technicznych i związanym z tym rozwojem nanotechnologii,
- jak najlepszą ochronę środowiska naturalnego, przy właściwej gospodarce zasobami naturalnymi surowców, oraz sprostanie stale wzrastającemu zapotrzebowaniu na energię, przy rozwijającej się gospodarce energetycznej z wykorzystaniem wszelkich alternatywnych i proekologicznych źródeł energii, a także jej przesyłu, akumulowania i przetwórstwa,
- sprostanie wymogom szeroko rozumianej ogólnoświatowej komunikacji, obejmującej zarówno wymianę i przesył informacji, jak i szybki, bezpieczny transport przede wszystkim

ludzi, ale również dóbr materialnych, przy minimalizacji zużycia energii oraz masy stosowanych urządzeń i środków transportu.

Jak wskazuje doświadczenie oraz retrospekcja historyczna, osiąganie każdego z wymienionych celów wymaga rozwoju inżynierii materiałowej oraz związanych z tym technologii procesów materiałowych, a nade wszystko stosowania coraz to nowocześniejszych materiałów, najlepiej spełniających wymagania stawiane przez producentów dóbr powszechnego użytku, oferowanych jako produkty na rynku. W ciągu ponad 50-lecia swej historii inżynieria materiałowa i nauka o materiałach wypracowały swój paradygmat [4], stanowiący, że w celu zaspokojenia funkcji użytkowych produktów konieczne jest zaprojektowanie i zastosowanie materiałów inżynierskich, które, poddane odpowiednim procesom technologicznym kształtowania postaci geometrycznej, a szczególnie struktury, zapewnią odpowiednie własności fizykochemiczne materiału [5, 6]. Powszechne jest obecnie oczekiwanie na wytwarzanie materiałów o własnościach wymaganych przez użytkowników produktów [7, 8], istotnie wpływające na rozwój metodologii projektowania materiałowego produktów. Dostarczanie materiałów o pożądanej strukturze i własnościach fizykochemicznych, spełniających wymagania funkcjonalne, podporządkowane potrzebom klienta i funkcjom użytkowym produktów, obecnie coraz częściej stanowi obowiązującą praktykę projektową (ang.: *materials on demand*). Doświadczenia projektowe, technologiczne i eksploatacyjne licznych produktów wskazują przy tym, że wymagane początkowo zapewnienie oczekiwanych własności w równym stopniu na całym przekroju produktu nie znajduje racjonalnego uzasadnienia w obliczeniach inżynierskich i rzeczywistych oczekiwaniach. Wielokrotnie odmienne wymagania stawia się bowiem rdzeniowi materiału, a najczęściej produktu lub jego elementu, a inne powierzchni lub warstwie powierzchniowej. Tradycyjną metodą wpływania na własności warstwy powierzchniowej poprzez zmianę jej struktury w wyniku lokalnej zmiany składu chemicznego, a przez to fazowego, jest obróbka cieplno-chemiczna, w tym najpowszechniejsze nawęglanie [9, 10] i azotowanie [11-17]. Najbardziej ogólnym celem tych działań jest uzyskanie w strefie okołopowierzchniowej struktury zbliżonej do kompozytowej. Dlatego na przestrzeni dziesięcioleci opracowano wiele technologii kształtowania struktury warstwy wierzchniej, nanoszenia powłok, w tym wielo-, a nawet kilkusetwarstwowych, a także wytwarzania materiałów powierzchniowo gradientowych. Najkorzystniejsze zestawienie własności rdzenia i warstwy powierzchniowej wytworzonego elementu, gwarantujące jego wymagane własności użytkowe, można uzyskać poprzez dobór materiału rdzenia i technologii,

zapewniających jego własności (np. obróbki cieplnej lub cieplno-plastycznej), i przez równoczesny wybór technologii warstwy powierzchniowej, decydującej o własnościach użytkowych wielu produktów i ich elementów. Dostosowywanie własności (ang.: *tailoring*) różnych elementów wytwarzanych z różnych grup materiałów inżynierskich, w tym konstrukcyjnych, narzędziowych, funkcjonalnych oraz biomedycznych, do wymogów eksploatacyjnych metodami inżynierii powierzchni jest coraz częściej stosowane w wielu gałęziach przemysłu [8, 17-22], w tym: budowy maszyn [9, 23-25], maszynowym [26], narzędziowym [27-29], samochodowym [30-35], lotniczym [36-38], okrętowym [39], biomedycznym [40-47], precyzyjnym, wyposażenia medycznego [48], urządzeń sanitarnych [49], przetwórstwa materiałów polimerowych [50] oraz w energetyce [51-52], budownictwie, elektrotechnice, mechatronice, elektronice [53-54], optyce [55], optoelektronice, a także przy wytwarzaniu broni strzeleckiej [56], biżuterii i w reklamie [57]. Należy ponadto podkreślić, że jest ono przedmiotem stałego i coraz większego zainteresowania ośrodków naukowych na całym świecie [58-72].

Właściwe ukształtowanie struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich bardzo często decyduje o możliwościach aplikacyjnych wielu produktów, w istotny sposób wpływając na poprawę ich własności użytkowych [73-78]. Inne wymagania, odnoszące się do własności powierzchni, w tym m.in. gładkości lub tekstury i chropowatości, koloru i estetyki pokryć, przezroczystości, refleksyjności lub absorpcyjności promieniowania świetlnego, ciepła lub fal dźwiękowych, zdolności wchłaniania lub nie cieczy lub powietrza, odporności na zużycie [79], adhezyjności, możliwości naśladowania innych materiałów, np. drewna, skóry lub szkła [80], zapewnienia niskiego tarcia w trudnych warunkach eksploatacyjnych [81-82], pozwalają dobrać właściwą strukturę materiałów i zapewnić ich podstawowe własności mechaniczne, ale także w dużej mierze decydują o doborze procesów technologicznych zarówno elementów konstrukcyjnych, jak i narzędzi oraz innych produktów wykonywanych odpowiednio ze wszystkich grup materiałów inżynierskich. Warstwy powierzchniowe, mając różne przeznaczenie, mogą zatem zapewnić produktom wymagane własności fizyczne, mechaniczne, trybologiczne, magnetyczne [83-84], antykorozyjne [85-87], przewodność elektryczną lub cieplną oraz odporność na działanie temperatury [88, 89]. Warstwy te mogą także spełniać funkcje dekoracyjne, ochronno-dekoracyjne i bariery dyfuzyjnej oraz nadać produktom estetyczny wygląd zewnętrzny i pożądaną fakturę powierzchni.

W ramach prowadzonych prac własnych dokonano pełnego przeglądu współczesnych technologii obróbki, decydujących o kształtowaniu struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich, również tych wykazujących strukturę nanometryczną, a rezultaty wsparte wynikami uprzednio wykonanych badań własnych [90-98], wraz z ogólnym poglądem dotyczącym obecnego stanu technologii inżynierii powierzchni materiałów, wydano w formie książkowej [99]. Przeprowadzona analiza światowego i krajowego piśmiennictwa na temat obróbki powierzchniowej materiałów inżynierskich wskazuje, że stan wiedzy, w zakresie klasycznych technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych poszczególnych grup materiałów inżynierskich, jest dobrze opisany w kraju [78, 100-105] i za granicą [81, 106-111] w podstawowych podręcznikach inżynierii materiałowej i inżynierii powierzchni. Ponadto opublikowano liczne prace i przeglądy monograficzne [112-129]. Projekty badawcze i liczne publikacje [130-150] z tego obszaru tematycznego opisują wiele szczegółów zjawisk i mechanizmów, zachodzących w różnych materiałach, będących wynikiem obróbki powierzchniowej, wpływającej na własności różnych produktów. Informacje dostępne w literaturze dotyczą ponad 500 szczegółowych technologii obróbki powierzchniowej i ich licznych odmian technologicznych, stosowanych w produkcji wszystkich podstawowych grup materiałów inżynierskich. O ile klasyczne technologie kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich, jak już zaznaczono, są szeroko i systematycznie opracowane w literaturze przedmiotu, o tyle wiele nowoczesnych i szczegółowych metod technologicznych inżynierii powierzchni wymaga takiego usystematyzowania i hierarchizacji. W szczególności należy uwzględnić możliwości poprawy własności eksploatacyjnych produktów, w których je zastosowano, jak i poszerzoną interpretację zjawisk i/ lub przemian, przebiegających w warstwach powierzchniowych, oraz kontrole technologiczne i inwestycyjne. Problem ma ważne znaczenie gospodarcze i dotyczy nie tylko awangardowych technologii, wdrożonych we wiodących dużych przedsiębiorstwach, lecz wymaga przede wszystkim ustawicznego poprawiania jakości i trwałości większości produktów rynkowych, z wykorzystaniem szerokiego wachlarza dostępnych technologii inżynierii powierzchni, w małych i średnich przedsiębiorstwach, jak również podmiotach zatrudniających do 9 pracowników włącznie, zwanych *mikroprzedsiębiorstwami*.

Odpowiedni dobór technologii inżynierii powierzchni, jako ważnego działu inżynierii materiałowej, wymaga najczęściej złożonej i kosztownej aparatury technologicznej i niezbędnej

infrastruktury przemysłowej [151]. Biorąc pod uwagę, że przeciętny czas amortyzacji specjalistycznych urządzeń, umożliwiających produkcję przemysłową, z użyciem nowoczesnych technologii inżynierii powierzchni materiałów, wynosi ok. 20 lat, niezwykle istotnym zagadnieniem staje się trafność wyboru technologii wraz z właściwymi decyzjami, dotyczącymi poczynionych inwestycji. Urządzenia i maszyny, umożliwiające realizację coraz bardziej specjalistycznych procesów technologicznych obróbki powierzchniowej, cechuje coraz większa unikatowość, co powoduje, że są one dedykowane produkcji ściśle określonych produktów z użyciem konkretnych technologii wytwarzania, a koszty ich nabycia są coraz wyższe. Ponadto w celu zapewnienia wymaganej wydajności systemu produkcyjnego i ciągłości realizacji zleceń produkcyjnych, niejednokrotnie wykonywanych na zlecenie klienta (ang.: *Make-to-Order* – MTO), konieczne jest wyposażenie przedsiębiorstwa produkcyjnego w odpowiednio dużą liczbę maszyn i urządzeń, zapewniających synchronizację przepływu realizowanej produkcji gniazdowej lub liniowej. Należy zatem zwrócić uwagę na skalę niezbędnych inwestycji i wagę decyzji menadżera o zakupie kosztownych urządzeń, decydujących o rentowności przedsięwzięcia, a w długiej perspektywie czasowej wpływających na sukces lub porażkę danego przedsiębiorstwa. W tym kontekście, ewentualne podjęcie błędnej decyzji, w zakresie wyboru technologii oraz związanego z tym zakupu dużego zestawu kosztownych maszyn i urządzeń nieprzynoszących oczekiwanej wartości dodanej, może przesądzić nie tylko o wyeliminowaniu danego przedsiębiorstwa z rynku, lecz także o utracie potencjalnych korzyści, zarówno przez indywidualnego przedsiębiorcę, jak i, szerzej rzecz ujmując, przez gospodarkę ogółem, co z punktu widzenia rozwoju strategicznego w skali makro jest ważnym zagadnieniem. Zatem identyfikacja stosowanych technologii i pożądanego ich rozwoju wraz ze wskazaniem produktów, w odniesieniu do których należy je zastosować, oraz ustalenie trendów rozwojowych priorytetowych innowacyjnych technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich oraz kierunków badań strategicznych w tym zakresie, w długookresowej perspektywie co najmniej przyszłego 20-lecia, ma kluczowe znaczenie dla rozwoju gospodarczego w ciągu najbliższych dziesięcioleci i decyduje o konkurencyjności gospodarki krajowej. Wymaga to prowadzenia wiarygodnych badań naukowych nad perspektywami rozwoju nauki i technologii, a metoda prób i błędów, jako obarczona niemal stuprocentowym ryzykiem, nie może być stosowana przy podejmowaniu tak ważnych decyzji, dotyczących wyboru kierunków rozwoju badań, technologii i inwestycji, służących przyszłości zarówno w skali przedsiębiorstwa, jak i gospodarki krajowej lub globalnej.

W związku z uświadomioną koniecznością podjęcia badań naukowych, służących prognozowaniu rozwoju tak ważnej dziedziny, jaką jest inżynieria materiałowa, dotycząca praktycznie wszystkich aspektów życia i gospodarki, w ostatniej dekadzie podjęto liczne badania w tym obszarze, zarówno na świecie [7, 8, 152], jak i w kraju [153-158], natomiast w ramach prac własnych wykonano systematyczne badania naukowe z zakresu inżynierii powierzchni materiałów [159]. Krótko-, średnio- i długoterminowe prognozowanie jest współcześnie obecne w wielu dziedzinach życia, nauki i gospodarki, począwszy od meteorologii (prognozy pogody), poprzez politykę (sondaże przedwyborcze), marketing (badania potencjalnego zapotrzebowania na produkt), ekonomię (spodziewana wartość wskaźników makroekonomicznych: produktu krajowego brutto (PKB), inflacji, bezrobocia, kursów walut i wskaźników notowań giełdowych), demografię (spodziewany przyrost naturalny i średnia długość życia), ekologię (przewidywany wpływ emisji gazów na efekt cieplarniany), energetykę (przewidywanie liczby dostępnych zasobów nieodnawialnych), astronautykę (przewidywanie obiektów i zjawisk napotkanych przez statki kosmiczne) na diagnostyce technicznej kończąc. Szerokie spektrum metod, stosowanych praktycznie w różnych obszarach prognozowania przyszłości, jest obarczone ryzykiem, wynikającym z faktu, że nie jest wykluczone pojawienie się niespodziankowego scenariusza przyszłych wydarzeń, przynoszącego okoliczności diametralnie zmieniające ich bieg. Statystycznie rzecz ujmując scenariusz niespodziankowy ma jednak miejsce niezwykle rzadko, a bieżące korzyści, wynikające z odejścia od metody prób i błędów na rzecz wspomaganego naukowo przewidywania, kształtowania i zarządzania przyszłością, równoważą to ryzyko z naddatkiem.

Zrealizowane własne badania materiałoznawczo-heurystyczne [159] miały na celu: identyfikację i ujednoliconą charakterystykę krytycznych technologii inżynierii powierzchni materiałów, rozumianych jako priorytetowe technologie o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w założonym horyzoncie czasowym 20 lat, wskazanie kierunków rozwoju najkorzystniejszych rozwiązań technologicznych, dotyczących kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych produktów i ich elementów, oraz utworzenie alternatywnych możliwych scenariuszy przyszłych wydarzeń. Wykonane badania służą wyłonieniu najbardziej efektywnych i koniecznych do upowszechnienia w przemyśle technologii, zapewniających polepszenie własności użytkowych, trwałości i niezawodności produktów, które pod względem nowoczesności i relacji *jakość-cena* najbardziej nadają się do efektywnej implementacji w przemyśle. Cel strategiczny wykonanych materiałoznawczych

i e-foresightowych badań, a rozumiany jako długoterminowy i implikujący długofalowe konsekwencje, obejmuje rozpowszechnianie wyników tych badań i animację towarzyszącej im debaty publicznej oraz wzrost świadomości przedsiębiorców w analizowanym zakresie, w realny sposób przekładające się na statystyczny wzrost jakości technologii implementowanych w przemyśle, a także zrównoważony rozwój oraz wzmocnienie gospodarki opartej na wiedzy i innowacji.

Diagnozowanie kluczowych problemów naukowych, technologicznych, gospodarczych i ekologicznych inżynierii powierzchni materiałów oraz określenie kierunków rozwoju strategicznego tych badań i wskazówek, dotyczących podejmowania decyzji, wymaga wykorzystania odpowiedniego aparatu metodologicznego zasadniczo dotyczącego trzech wzajemnie przenikających się dziedzin wiedzy: inżynierii powierzchni, foresightu technologicznego oraz technologii informacyjnej [160], obejmującej organizację wirtualną, platformę internetową i sztuczną inteligencję. Na niektórych etapach badań konieczne było jednak znacznie szersze spojrzenie na rozpatrywane zagadnienia, co wymagało różnego podejścia i zastosowania metod czerpiących z innych obszarów wiedzy szczegółowej. W początkowej fazie badań przeprowadzono analizę perspektyw rozwojowych kilkuset grup technologii szczegółowych, zawierającą ocenę stanu zagadnienia, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi, co przedstawiono w odrębnym własnym opracowaniu książkowym [76]. W celu analizy perspektyw rozwojowych technologii zastosowano następujące metody organizacji, pracy i zarządzania: ekstrapolację trendów, skanowanie środowiska, analizę STEEP (ang.: ***S**ocial **T**echnological **E**conomic **E**cological **P**olitical and legal*), analizę SWOT (ang.: ***S**trengths **W**eaknesses **O**pportunities **T**hreats*), panele eksperckie, burze mózgów, *benchmarking*, analizę wielokryterialną, symulacje i modelowanie komputerowe oraz analizę ekonometryczną i statystyczną. W wyniku przeprowadzonych prac wyłoniono po 10 technologii krytycznych, w ramach każdego z czternastu obszarów tematycznych, zgrupowanych w ramach dwóch pól badawczych odpowiadających dwojakiemu spojrzeniu na rozpatrywane zagadnienia, odmiennemu dla producenta i dla klienta. Zbiór 140 technologii krytycznych poddano szczegółowej analizie w ramach trzech iteracji badań eksperckich wykonanych z wykorzystaniem metody e-Delphix [161], będącej zmodyfikowaną wersją klasycznej metody delfickiej [162-168], różniącej się od pierwowzoru głównie elektroniczną drogą ankietyzacji oraz wzrastającym poziomem ogólności pytań, stawianych ekspertom w kolejnych iteracjach badań. W badaniach tych, na różnych etapach prac, uczestniczyło

ogółem blisko 400 niezależnych ekspertów krajowych i zagranicznych reprezentujących środowiska naukowe, biznesowe i administrację publiczną, którzy wypełnili ok. 800 wielopytaniowych, w większości elektronicznych, lecz także tradycyjnych, kwestionariuszy ankietowych i przeprowadzili dyskusje tematyczne podczas 10 paneli eksperckich i międzynarodowej konferencji. Wyniki badań eksperckich, wraz z wynikami klasycznych eksperymentów materiałoznawczych, stanowiły dane pierwotne wykorzystane na dalszych etapach prowadzonych prac.

Skala i stopień skomplikowania badań, prowadzonych równolegle w odniesieniu do kilkunastu obszarów tematycznych, na różnych poziomach szczegółowości, zdeterminowały konieczność opracowania wspomaganej komputerowo metodologii porządkującej, unowocześniającej i usprawniającej ich przebieg. Zadaniu temu dedykowano autorską metodologię komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, sformułowaną i sformalizowaną w niniejszej pracy, na którą składa się zarówno metodyka interdyscyplinarnych badań, obejmująca zbiór oryginalnie dobranych znanych metod i narzędzi analitycznych stosowanych w inżynierii materiałowej, zarządzaniu i informatyce, jak i oryginalna koncepcja metodologiczna, umożliwiająca wykonanie dalszej części badań, stanowiąca o wartości naukowej niniejszej pracy, obejmująca: macierze kontekstowe, Księgę Technologii Krytycznych inżynierii powierzchni materiałów oraz wspomagane sieciami neuronowymi kreowanie alternatywnych scenariuszy przyszłych wydarzeń. Zbiór macierzy kontekstowych zawiera w szczególności: dendrologiczne macierze wartości technologii, meteorologiczne macierze oddziaływania otoczenia i macierze strategii dla technologii. Macierze te stanowią narzędzia graficznej analizy porównawczej poszczególnych technologii lub ich grup, pozwalając na: ich zobiektywizowaną ocenę w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, określenie rekomendowanych strategii postępowania, w odniesieniu do poszczególnych technologii lub ich grup, a także wytyczenie ścieżek ich rozwoju strategicznego. Na Księgę Technologii Krytycznych składa się zbiór kilkuset map drogowych i kart informacyjnych technologii stanowiących wygodne narzędzie analizy porównawczej pod względem wybranego kryterium materiałoznawczego, technologicznego lub ekonomicznego. Alternatywne scenariusze przyszłych wydarzeń utworzono na podstawie wyników badań ankietowych, przeprowadzonych drogą elektroniczną wśród kilkuset ekspertów, które to wyniki są danymi wejściowymi zaimplementowanymi do sieci neuronowych w postaci zbiorów uczącego, walidacyjnego i testowego. Utworzonych dziewięć modeli sieci neuronowych, z których do

wygenerowania ostatecznych wyników badań wybrano siedem najlepiej spełniających postawione kryteria, umożliwia losowe poszukiwanie rozwiązań z użyciem metody Monte Carlo, i uzyskanie wyników końcowych w postaci wartości prawdopodobieństwa zaistnienia poszczególnych wariantów wydarzeń, zależnych od wystąpienia zdefiniowanych początkowo czynników szczegółowych. Z konieczności, w niniejszej pracy możliwe było przedstawienie wyłącznie wybranych przykładów obszernych rezultatów badań uzyskanych w wyniku aplikacji opracowanej oryginalnej metodologii.

W celu zweryfikowania poprawności nowo opracowanej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów wykonano serię materiałoznawczo-heurystycznych badań własnych, w odniesieniu do wybranych grup technologii szczegółowych, obejmujących: obróbkę laserową stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco [92, 97], laserowe przetapianie i wtapianie cząstek węglików w warstwę powierzchniową odlewniczych stopów magnezu [90, 169, 170], fizyczne osadzanie z fazy gazowej (PVD) powłok na stop miedzi z cynkiem [91, 171], wybrane technologie obróbki cieplno-chemicznej stali [93], fizyczne lub chemiczne osadzanie z fazy gazowej powłok (PVD/CVD) na spiekane materiały narzędziowe [94, 172, 173], teksturowanie krzemu polikrystalicznego do celów fotowoltaiki [95, 174], wytwarzanie spiekanych materiałów gradientowych klasyczną metodą metalurgii proszków [96] oraz wybrane technologie modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich [98]. Szczegółowe wyniki tych badań, służących zobiektywizowanej ocenie wartości technologii na tle mikro- i makrootoczenia oraz określeniu ich perspektyw rozwojowych w ciągu najbliższych 20 lat, przedstawiono we własnym obszernym anglojęzycznym opracowaniu książkowym [161] wraz z metodyką otwartego upowszechniania wiedzy w tym zakresie w ramach e-transferu technologii i wiedzy [175]. W publikacji [76] przedstawiono wyniki oceny poszczególnych technologii obróbki powierzchni materiałów, dokonanej według opracowanych uprzednio ujednoliconych kryteriów materiałoznawczych, technologicznych i ekonomicznych. W niniejszej pracy własnej zaprezentowano natomiast założenia koncepcyjne oryginalnej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów wraz z przykładami jej praktycznej weryfikacji, syntetycznymi wynikami wykonanych badań własnych oraz opisem ich utylitarnego znaczenia i możliwości praktycznej implementacji w rzeczywistości gospodarczej, co jest zwieńczeniem wszystkich prowadzonych w ostatnich latach prac naukowo-badawczych w tym zakresie. Praca ta w istocie dotyczy rozwoju aparatu metodologicznego inżynierii materiałowej i z jednej

strony – pomimo, a z drugiej – dzięki wykorzystaniu szerokiego zakresu metod badawczych i doświadczalnych kilku dyscyplin naukowych przyczynia się istotnie do postępu naukowego w dyscyplinie inżynieria materiałowa, gdyż jej celem jest opracowanie, weryfikacja doświadczalna i udostępnienie oryginalnej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów inżynierskich.

2. Analiza stanu wiedzy

W niniejszym rozdziale pracy przedstawiono analizę stanu wiedzy, dotyczącej ogólnych trendów rozwojowych i najbardziej perspektywicznych obszarów inżynierii powierzchni materiałów. W toku prac dokonano, na podstawie analizy światowej i krajowej literatury, pełnego przeglądu ponad 500 technologii szczegółowych inżynierii materiałów i ich licznych odmian technologicznych, w odniesieniu do wszystkich podstawowych grup materiałów inżynierskich. Rezultaty tych studiów literaturowych wsparte wynikami uprzednio wykonanych badań własnych [90-98, 169-174] zamieszczono w odrębnym kilkusetstronicowym opracowaniu książkowym [99]. W związku z tym, w niniejszej pracy zestawiono jedynie w syntetyczny sposób ogólny pogląd na temat roli inżynierii powierzchni we współczesnej inżynierii materiałowej i inżynierii wytwarzania, przy założeniu że wszelkie szczegóły i rozwinięcie tej koncepcji na podstawie istniejącego stanu wiedzy zostały opisane w wymienionej publikacji [99].

Podstawowa grupa zagadnień inżynierii powierzchni materiałów inżynierskich dotyczy kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych przez wytworzenie warunków termodynamicznych do przebiegu zjawisk strukturalnych i/lub przemian fazowych, wpływających na własności warstw powierzchniowych, jak również przez nanoszenie pokryć i powłok zapewniających wymagane własności produktów lub ich elementów. Spełnienie postulatu dostarczenia materiałów na żądanie najczęściej nie jest w istotny sposób związane z zapewnieniem odpowiednich własności rdzenia, przenoszącego wyłącznie obciążenia mechaniczne, lecz głównie polega na wdrożeniu – zawartej w nim integralnie i niejako domyślnie – idei odpowiedniego ukształtowania własności warstwy powierzchniowej [5-8, 73-77].

Metody inżynierii powierzchni są także często stosowane do uzupełniania ubytków w eksploatowanych długotrwale elementach maszyn i urządzeń, a także w procesach tzw. *remanufacturingu* do kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych ponownie przerabianych elementów konstrukcyjnych [176]. Należy ponadto zauważyć, że w trakcie eksploatacji produktów i ich elementów własności warstw powierzchniowych ulegają zwykle znacznej degradacji, w wyniku zmian struktury w tym obszarze [177-178], spowodowanych m.in. korozją metali i stopów, zużyciem trybologicznym, zużyciem i niszczeniem narzędzi skrawających i zużyciem narzędzi do pracy na gorąco [179]. Mechanizmy zużycia należy uwzględniać już na etapie projektowania materiałowego i technologicznego produktów,

traktując je jako czynniki analogiczne do obróbki powierzchniowej, gdyż w istocie wpływają one decydująco na jej strukturę i własności, z reguły jednak są to zmiany niekorzystne i nasilające się z upływem czasu eksploatacji produktu [74, 78, 89].

2.1. Ogólna klasyfikacja technologii obróbki powierzchni materiałów inżynierskich

Warstwy powierzchniowe można sklasyfikować jako warstwy wierzchnie, ograniczone powierzchnią obrabianego elementu i obejmujące obszar materiału o strukturze i własnościach różniących się od własności rdzenia, albo jako powłoki, będące warstwą materiału najczęściej różniącego się składem fazowym, chemicznym i strukturą od rdzenia, naniesione trwale na powierzchnię podłoża. Metody wytwarzania warstw powierzchniowych, w zależności od rodzaju zjawisk przebiegających podczas tych procesów, można podzielić na następujące grupy, pozwalające na uzyskanie odpowiedniego rodzaju warstwy powierzchniowej o zróżnicowanej grubości i przeznaczeniu [74, 75, 99]:

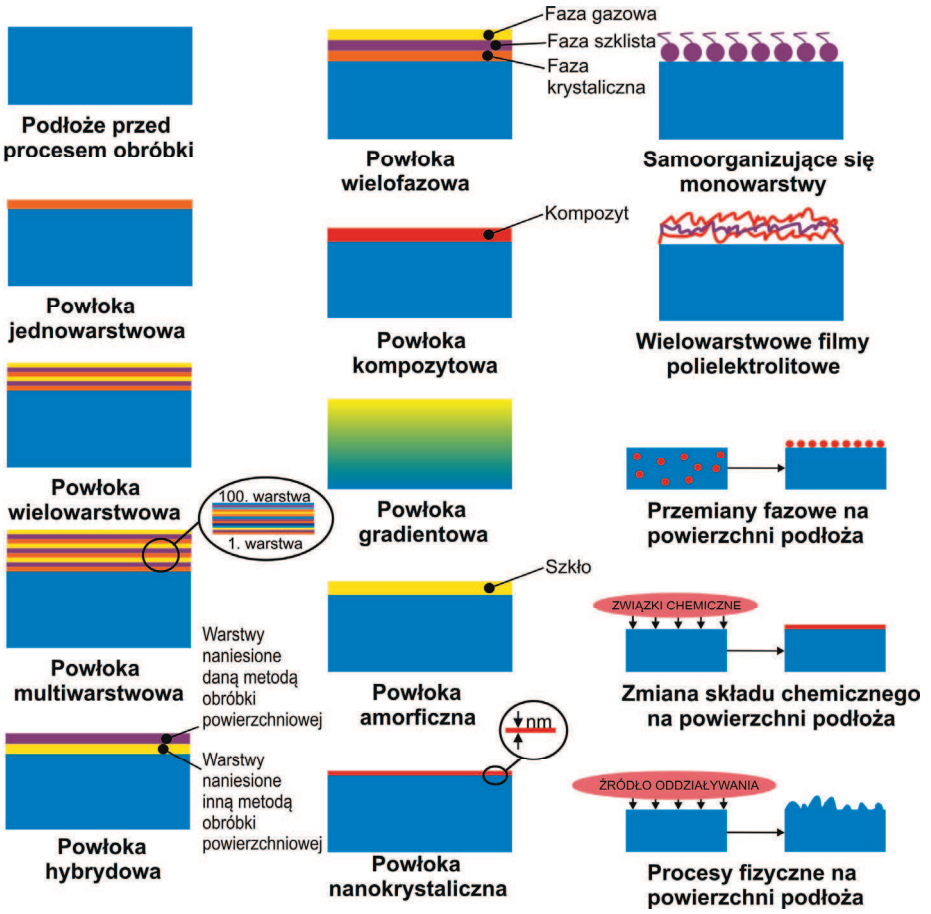
- mechaniczne, związane z umocnieniem warstwy powierzchniowej na zimno, bądź otrzymaniem powłoki ochronnej na zimnym podłożu,
- cieplno-mechaniczne, wykorzystujące łączne oddziaływanie ciepła i nacisku,
- cieplne, powstałe w wyniku zmiany struktury materiału przez oddziaływanie ciepła zarówno w stanie stałym, jak i przez zmianę stanu skupienia ze stałego w ciekły lub odwrotnie,
- cieplno-chemiczne, utworzone w wyniku łącznego oddziaływania ciepła i ośrodka aktywnego chemicznie,
- chemiczne i elektrochemiczne ukonstytuowane przez osadzanie materiału metalowego lub niemetalowego na powierzchni elementu, bądź w wyniku usuwania uszkodzonej warstwy powierzchniowej, zestalania cieplno-chemicznego substancji błonotwórczych lub sieciowania żywic chemoutwardzalnych,
- fizyczne, osadzone jako powłoki z udziałem procesów adhezji i dyfuzji.

Stosując jako kryterium uwarunkowania technologiczne, warstwy powierzchniowe można podzielić w sposób podany w tablicy 1 i na rysunku 1.

Dokonując w ramach prac własnych [90-98, 169-174, 180-188] analizy aktualnego stanu rozwoju technologii inżynierii powierzchni opisanych w literaturze, na tle makro- i mikrootoczenia, sklasyfikowano te technologie w dziesięciu arbitralnie ustalonych grupach,

Tablica 1. *Klasyfikacja warstw powierzchniowych ze względu na uwarunkowania technologiczne [99]*

Rodzaje możliwych warstw powierzchniowych lub procesów zachodzących na powierzchni podłoża		
jednowarstwowa	wielofazowa	amorficzna
wielowarstwowa	gradientowa	nanokrystaliczna
multiwarstwowa (>100 warstw)	kompozytowa	hybrydowa
przemiany fazowe warstwy powierzchniowej podłoża	zmiana składu chemicznego warstwy powierzchniowej podłoża	procesy fizyczne na powierzchni podłoża



Rysunek 1. *Schematyczne przykłady warstw powierzchniowych oraz procesów zachodzących na powierzchni podłoża ze względu na uwarunkowania technologiczne*

przypisanych poszczególnym fazom cyklu życia technologii, stosując dziesięciostopniową uniwersalną skalę stanów względnych, i zakwalifikowując do dalszych badań, również materiałoznawczych o charakterze uzupełniającym, tylko technologie najlepiej rokujące, przy czym szczególną uwagę poświęcono technologiom awangardowym i skrajnie rozwojowym. Do grupy tej należą: stale rozwijana koncepcja funkcjonalnych i narzędziowych materiałów gradientowych (ang.: *functionally graded materials* – FGM; *tool graded materials* – TGM) [96, 141-142, 189-195]; nowe nanotechnologie kształtowania powłok o grubości kilku mikrometrów [196-199], złożonych niejednokrotnie z kilkudziesięciu do kilkuset warstw, w tym pokrywanie wielowarstwowe i gradientowe metodami fizycznego (ang.: *Physical Vapour Deposition* – PVD) i chemicznego osadzania z fazy gazowej (ang.: *Chemical Vapour Deposition* – CVD), ale także pokrycia kompozytowe o osnowie polimerowej [200-201] wzmacniane nanorurkami węglowymi lub mineralnymi [152, 202-205]. Szerokie perspektywy rozwojowe mają także technologie hybrydowe, zapewniające możliwie najlepsze własności kolejno na siebie nałożonych warstw powierzchniowych [80, 206-211], w wyniku połączenia niektórych klasycznych metod kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych (np. obróbki cieplno-chemicznej) z technologiami awangardowymi (np. stopowaniem, przetapianiem lub wtapianiem laserowym, formowaniem wtryskowym proszku, a także fizycznym osadzaniem z fazy gazowej). Na uwagę zasługują również: wytwarzanie struktur warstwowych m.in. różnymi metodami obróbki cieplno-chemicznej [9, 11-12, 14-15, 38, 130-133, 212-214]; przez wytworzenie materiałów kompozytowych [84, 215]; przez pokrywanie jednowarstwowe metodami fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej oraz napawanie lub natryskiwanie twardych warstw metodą natryskiwania cieplnego [216]. Bardzo perspektywiczne są także technologie laserowej obróbki powierzchniowej (w tym stopowanie, wtapianie i napawanie laserowe, zapewniające bardzo wysokiej jakości połączenia z podłożem, oraz wytwarzanie warstw gradientowych o wysokiej odporności korozyjnej i na zużycie, wysokiej żaroodporności i twardości, ciągliwości, plastyczności i wytrzymałości zmęczeniowej) [62, 217, 218], jak również teksturyzacja powierzchni elementów ogniw fotowoltaicznych [95, 174, 219] i nanoszenie powłok ceramicznych [51, 220], m.in. na podłoże z tytanu i jego stopów [221].

U podstaw rozwoju funkcjonalnych materiałów gradientowych, o własnościach zmieniających się skokowo lub w sposób ciągły wraz z położeniem, dzięki zmianom składu chemicznego, składu fazowego, struktury lub uporządkowania atomów w sieci krystalicznej, stały światowe prace [185-186, 222-225], których kontynuację i rozwinięcie stanowią

publikacje krajowe [226-228]. W celu osiągnięcia wymienionych efektów strukturalnych zostało wykorzystanych wiele technologii, w tym metalurgia proszków [142, 229-231], metody spawalnicze [232] i obróbka laserowa [61-62, 143, 217]. Poprawę własności, przez połączenie bardzo dużej odporności powierzchni narzędzi na zużycie ścierne z dużą ciągliwością rdzenia, zapewniają gradientowe materiały narzędziowe (TGM), jako, niezależna i już coraz częściej uważana za oddzielną, grupa materiałów inżynierskich rozwinięta analogicznie do funkcjonalnych materiałów gradientowych (FGM), chociaż nadal jedynie w nielicznych przypadkach stosowana w praktyce przemysłowej [74-75, 233]. Warstwy powierzchniowe gradientowych materiałów narzędziowych o zmieniającym się składzie chemicznym lub fazowym, w zależności od technologii wytwarzania, mają grubość 10^{-3}-10^{-6} m.

2.2. Ogólny przegląd metod technologicznych kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich

Jedna z podstawowych grup technologii wytwarzania gradientowych materiałów narzędziowych polega na nanoszeniu powłok gradientowych z fazy gazowej (PVD), o grubości 3-5 μm i ciągłej zmianie jednego lub kilku jej składników od podłoża do powierzchni [126], na podłoże z materiałów narzędziowych konwencjonalnych [234] lub spiekanych [60, 63, 231, 233, 235]. Powłoki PVD – niekiedy tylko gradientowe – stosowane są nie tylko do pokrywania materiałów narzędziowych [236-240], lecz także w budowie maszyn, w przemyśle samochodowym, lotniczym, kosmicznym, budowlanym, w energetyce i mieszkalnictwie, optyce, mikroelektronice i biomedycynie [32, 94, 172, 241], w tym na implanty metalowe [47, 242], w celu zwiększenia trwałości, ograniczenia szybkości zużycia, odporności w wysokiej temperaturze, zmniejszenia współczynnika przewodności cieplnej i/lub ograniczenia procesów korozyjnych [233, 243-245]. Wyróżnia się następujące rodzaje powłok PVD:

- jednowarstwowe proste oraz złożone, w tym wieloskładnikowe o podsieci jednego pierwiastka wypełnionej częściowo innym pierwiastkiem, najczęściej jako ciągłe roztwory stałe węglików i azotków,
- wielowarstwowe, wytwarzane w wyniku nanoszenia na siebie kolejno warstw różnych materiałów, najczęściej powłok prostych o różnych własnościach [246],
- wielofazowe, stanowiące mieszaninę różnych faz, charakteryzujące się dużą odpornością na zużycie ścierne,

- gradientowe, jako odmiana powłok wielowarstwowych o składzie chemicznym i własnościach zmieniających się w sposób ciągły na grubości [236, 237], w tym odporne na zużycie ścierne (ang.: *gradient wear-resistant coatings* – GWRC) i spełniające rolę bariery termicznej (ang.: *gradient thermal barrier coatings* – GTBC),
- kompozytowe, jako odmiana powłok wielofazowych, w których w jednej fazie ciągłej jest zdyspergowana druga faza, które są metastabilne o połączonych własnościach, charakteryzujących materiały o wiązaniach metalicznych i kowalencyjnych, powstałych w wyniku umacniania roztworowego powłok.

Wysokotemperaturowe techniki nanoszenia powłok z fazy gazowej (PVD) zapewniają lepszą jakość połączenia dyfuzyjno-adhezyjnego powłoki z podłożem. Procesy PVD można podzielić na techniki klasycznego nanoszenia par metali w próżni lub w atmosferze gazu niezjonizowanego na czystym i zimnym podłożu, gdy pary metalu o niskiej energii osiadają na podłożu tworząc powłoki o małej gęstości, znacznym zanieczyszczeniu i słabej przyczepności, oraz techniki jonowego nanoszenia próżniowego, najczęściej reaktywne, na zimnym lub podgrzanym czystym podłożu, gdy podłoże bombardowane jest strumieniem jonów o energii powodującej rozpylanie i w konsekwencji płytką implantację, tworząc tym samym powłoki o dużej gęstości, bez zanieczyszczeń i o dobrej przyczepności do podłoża. Bardzo dobra przyczepność powłok PVD do podłoża jest powodowana adhezją i dyfuzją pierwiastków tworzących powłoki w kierunku podłoża oraz pierwiastków znajdujących się w materiale podłoża (np. węgla i azotu) w kierunku przeciwnym, czyli do powłoki. Równoczesne występowanie adhezji i dyfuzji powoduje, że możliwe jest uzyskanie hybrydowej gradientowej warstwy powierzchniowej o grubości całkowitej do 100 μm na podłożu, np. ze stali szybkotnących lub narzędziowych stali stopowych, z użyciem technologii PVD poprzedzonej klasyczną obróbką cieplno-chemiczną, np. azotowaniem plazmowym [14-15, 213].

Gradientowe materiały narzędziowe są również wytwarzane w wyniku chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD), gdy na powierzchni obrabianego produktu powstają powłoki węglików i azotków metali ze składników atmosfery gazowej, złożonej z lotnego halogenku pierwiastka dyfundującego oraz węglowodoru, azotu, wodoru lub gazu obojętnego, np. argonu, aktywowanych cieplnie lub plazmą, przy udziale składników podłoża, w szczelnym reaktorze, w wyniku niejednorodnych katalizowanych chemicznie i fizycznie reakcji na powierzchni podłoża, w temperaturze ok. 900-1100°C i przy ciśnieniu $1 \cdot 10^5$-$1{,}35 \cdot 10^3$ Pa. Wysoka temperatura procesu CVD powoduje ograniczenie zakresu jego zastosowań na płytki z węglików

spiekanych lub spiekanych materiałów ceramicznych historycznie najwcześniej pokrywanych pojedynczymi warstwami, następnie podwójnymi, a obecnie najczęściej powłokami wielowarstwowymi [18, 247]. Węgliki spiekane pokrywane wielowarstwowo charakteryzują się znacznie większą odpornością na ścieranie w stosunku do gatunków konwencjonalnych, przy nieznacznie jedynie pogorszonej ciągliwości [238, 248-249].

Materiały gradientowe, w tym narzędziowe, ale również z podłożem ze stopów metali lekkich magnezu lub aluminium, mogą być wytwarzane z wykorzystaniem odpowiednio laserowego przetapiania, wtapiania i stopowania [250-253]. Obrabiane w ten sposób materiały ulegają umocnieniu przez jeden lub kilka działających synergicznie mechanizmów. Jednym z nich jest krystalizacja i rozdrobnienie struktury warstwy powierzchniowej przetapianej laserowo. Przykładowo, stal poddana hartowaniu przetopieniowemu po zahartowaniu ze stanu ciekłego charakteryzuje się morfologią dendrytyczną i strukturą martenzytyczną, a listwy martenzytu są 1,5- do 2-krotnie mniejsze niż po hartowaniu konwencjonalnym [250]. Inne mechanizmy, powodujące umocnienie materiałów w wyniku obróbki laserowej, obejmują utwardzanie dyspersyjne warstwy powierzchniowej przez wtopione lub częściowo rozpuszczone cząstki wprowadzanych faz, wzbogacenie warstwy powierzchniowej w dodatki stopowe, pochodzące z rozpuszczających się faz, oraz utwardzanie wydzieleniowe przez nowo wydzielone fazy, np. węgliki w przypadku stali narzędziowych i tradycyjnych węglikostali [252].

Materiałów gradientowych dotyczą także nowe kierunki laserowego kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych stopów metali lekkich, m.in. wieloskładnikowych stopów magnezu o małej gęstości, będących przedmiotem zainteresowania różnych gałęzi przemysłu, m.in. lotniczego, samochodowego, energetycznego, elektronicznego, chemicznego, nuklearnego, sprzętu sportowego, urządzeń biurowych i gospodarstwa domowego. Do atrakcyjnych możliwości technologicznych należy obróbka powierzchni tych stopów zapewniająca utworzenie warstwy o grubości do ok. 0,5 mm, przetapianej laserowo i ulegającej następnie szybkiej mikro- lub nanokrystalizacji, co pozwala uzyskać strukturę i własności analogiczne do otrzymywanych metodą szybkiego krzepnięcia (ang.: *Rapid Solidification Processing* – RSP). Laserowa obróbka powierzchniowa tych stopów umożliwia również wtapianie dyspersyjnych cząstek ceramicznych w przetapianą warstwę powierzchniową, co zapewnia jej własności odpowiadające materiałom kompozytowym (ang.: *Metal Matrix Composites* – MMCs), np. o osnowie stopów magnezu [169, 254, 255], i znacząco zwiększa trwałość produktów wytworzonych z wykorzystaniem tej technologii [170, 255-256].

Inną obiecującą technologią laserową, wymagającą użycia laserów małej mocy, jest teksturowanie krzemu polikrystalicznego wykorzystywanego do produkcji ogniw fotowoltaicznych. Laserowe teksturowanie stosuje się w celu rozwinięcia powierzchni krzemu polikrystalicznego w układzie równoległym lub siatkowym. W celu osiągnięcia oczekiwanych własności elektrycznych ogniw fotowoltaicznych wytworzonych z krzemu, konieczne jest poddanie stekstury-zowanych próbek mokremu trawieniu w roztworach alkalicznych. Do innych metod obróbki powierzchniowej krzemu poli- i monokrystalicznego należą: reaktywne trawienie płytek krzemu jonami w plazmie (ang.: *Reactive Ion Etching* – RIE), nanoszenie warstwy antyrefleksyjnej (ang.: *Anti-Reflective Coatings* – ARC), w tym metodą plazmochemicznego osadzania powłok z fazy gazowej (ang.: *Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition* – PECVD) i metodą klasycznego aktywowanego cieplnie chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej (ang.: *Hot-Filament Chemical Vapour Deposition* – HFCVD), a także utlenianie termiczne [95, 174, 257-258], metody zol-żel [259] oraz chemiczne osadzanie monowarstw atomowych (ang.: *Atomic Layer Deposition* – ALD). Jedną z bardziej obiecujących możliwości produkcji ogniw fotowoltaicznych jest technologia wytwarzania cienkich warstw krzemu o grubości kilku mikrometrów z przezroczystymi, rozpraszającymi światło i przewodzącymi tlenkowymi warstwami ZnO o grubości kilkuset nanometrów. Warstwy te można otrzymać metodą chemicznego lub fizycznego osadzania z fazy gazowej, w warunkach obniżonego ciśnienia lub wspomagania plazmą wytwarzaną m.in. z wykorzystaniem akceleratora Halla, będącego źródłem niskotemperaturowej i rzadkiej plazmy [260].

Do spawalniczych metod kształtowania warstw powierzchniowych materiału należy nanoszenie warstwy napawanego metalu na powierzchnię lub krawędź materiału podłoża o różnym składzie chemicznym z wykorzystaniem technologii gazowych i łukowych (ang.: *Manual Metal Arc* – MMA, *Shielded Metal Arc* – SMA, *Speed Streamlined Arc* – SSA, *Gas Metal Arc* – GMA, *Gas Tungsten Arc* – GTA, *Plasma Transferred Arc* – PTA), energii wiązki elektronów oraz natryskiwania cieplnego łukowego lub plazmowego. Metody spawalnicze umożliwiają uzyskanie, na podłożu z materiałów relatywnie tanich, łatwo dostępnych i nieulegających zmianom strukturalnym lub odkształceniu plastycznemu, pokryć ze stopów metali, materiałów ceramicznych, materiałów na bazie faz międzymetalicznych, cermetali, węglików lub materiałów polimerowych. Pokrycia te zapewniają ochronę przeciwkorozyjną, utwardzenie powierzchniowe, porowatość powierzchni, efekty dekoracyjne, przewodnictwo elektryczne, odbicie światła i/lub naprawę ubytków powierzchniowych [155, 232, 261, 262].

Natryskiwane cieplnie pokrycia, zawierające Co, Ni, Cr, Al, Y, Si i/lub Hf bądź fazy niektórych z tych pierwiastków, oraz powłoki stanowiące barierę termiczną (ang.: *Thermal Barrier Coating* – TBC) tworzą izolację cieplną, która chroni wysokotemperaturowe stopy niklu [263, 264]. Warstwy powierzchniowe mogą być także nanoszone detonacyjnie [76, 265, 266].

Gradientowe materiały narzędziowe mogą być również wytwarzane tradycyjną metodą metalurgii proszków. Metodą tą możliwe jest m.in. wytwarzanie gradientowych materiałów narzędziowych na osnowie stali szybkotnących wzmacnianych węglikiem wolframu lub na osnowie kobaltowej zawierającej proszki węglika wolframu. Zastosowanie metody metalurgii proszków stwarza możliwość zapewnienia warstwie powierzchniowej dużej odporności na zużycie ścierne, dzięki twardym fazom węglikowym, azotkowym i/lub tlenkowym w osnowie wysokostopowych stali szybkotnących lub tradycyjnych węglikostali, przy równoczesnym zachowaniu wysokiej ciągliwości rdzenia typowej odpowiednio dla stali szybkotnących lub tradycyjnych węglikostali, po uzasadnionych ekonomicznie kosztach [267]. Taka struktura materiału pozwala na swobodne kształtowanie własności, zależnie od warunków pracy narzędzia. Przykładowo, w miejscach narzędzia narażonych na ścieranie stosuje się warstwę twardego materiału, a w innych narażonych na uderzenia materiał narzędzia wykazuje dużą ciągliwość [96, 141, 194, 225, 268]. Wśród technik formowania mieszanin proszków funkcjonalnych materiałów gradientowych wyróżnić należy klasyczne prasowanie w matrycy zamkniętej, przez sekwencyjne zasypywanie matryc mieszaninami proszków o udziale twardych faz ceramicznych rosnącym w kierunku powierzchni narzędzia, oraz inne techniki obejmujące prasowanie w matrycy jednoosiowej jednostronnej, prasowanie izostatyczne na zimno, formowanie niskociśnieniowe gęstwy polimerowo-proszkowej, formowanie wibracyjne i dogęszczanie w matrycy zamkniętej, a także formowanie sedymentacyjne [269].

Kompozytowe powierzchniowe warstwy stopowe, na staliwnych lub żeliwnych elementach maszyn, mogą być wytwarzane bezpośrednio w procesie zalewania, odpowiednio ciekłym staliwem lub żeliwem, form z materiałem kompozytującym [270], umieszczonym w nich przez wzajemne dopasowanie wymiarów, szpilkowanie lub przyklejanie go w wyznaczonych fragmentach powierzchni wnęki. Po zalaniu formy ciekłym metalem ma miejsce jego infiltracja w materiał kompozytujący, który może występować w postaci perforowanych wkładek z proszków wybranych stopów lub węglikowych bądź tlenkowych faz wzmacniających. Inną możliwością jest zastosowanie materiału kompozytującego samotopnikującego ze spoiwem

z żywicy epoksydowej, organicznego rozpuszczalnika lub szkła wodnego [271]. Możliwe jest również umieszczenie materiału kompozytującego w formie bez udziału spoiwa, z użyciem pola magnetycznego [272]. Odlewnicze powierzchniowe kompozytowe warstwy stopowe znajdują zastosowanie w przemyśle na odlewy odporne na zużycie ścierne, pracujące w warunkach suchego ścierania, np. węglem kamiennym, brunatnym i materiałami budowlanymi. Metodą łączącą techniki odlewnicze (proces infiltracji) oraz metalurgię proszków (przygotowanie porowatych szkieletów spiekanych) jest infiltracja ciśnieniowa porowatych szkieletów spiekanych, należąca do najprężniej rozwijających się metod wytwarzania materiałów kompozytowych [273, 274], umożliwiających m.in. lokalne powierzchniowe wzmacnianie odlewów.

Szczególną rolę, ze względu na szeroki zakres obecnych i potencjalnych zastosowań, odgrywa obróbka powierzchniowa z udziałem materiałów polimerowych. Dotyczy ona zarówno pokryć polimerowych z termoplastów, duroplastów i elastomerów nanoszonych różnymi technologiami, na różnych odmiennych materiałach, np. na stopach metali i materiałach tekstylnych, jak również kształtowania struktury i własności warstwy wierzchniej różnych materiałów polimerowych [117, 275], włącznie z wytwarzaniem materiałów kompozytowych warstwowych, w tym laminatów z materiałów polimerowych i polimerowych materiałów warstwowych uzyskujących pożądane własności użytkowe warstwy wierzchniej [276]. Pokrycia polimerowe mogą być nanoszone przez odparowanie rozpuszczonych polimerów, napylanie proszków polimerów na gorące podłoże i elektrostatyczne napylanie na podłoże o ujemnym potencjale elektrycznym. Inne znane metody to osadzanie elektrolityczne z wodnych roztworów polimerów, osadzanie nagrzanych w parze cząstek immersyjnych w złożu fluidalnym, natryskiwanie płomieniowe przez naniesienie proszku materiału polimerowego nadtopionego przez gorące gazy na nagrzane podłoże oraz polimeryzacja plazmowa. Można wyróżnić następujące rodzaje warstw polimerowych o różnych własnościach: hydrofilowe i hydrofobowe, które zapobiegają osadzaniu osadów; adhezyjne lub przeciwadhezyjne; światłochronne; przeciwdyfuzyjne i warstwy odporne na zarysowanie [118]. Kształtowanie struktury i własności warstw wierzchnich materiałów polimerowych poprzedzone jest najczęściej wstępną obróbką, np. w przypadku poliolefin (np. polietylenu lub polipropylenu), politetrafluoroetylenu lub poliacetali. W celu otrzymania korzystnych wartości swobodnej energii powierzchniowej przed klejeniem, lakierowaniem, drukowaniem lub metalizacją polimerów stosuje się utlenianie kwasami, aktywację płomieniową lub wyładowania koronowe wysokoenergetycznymi jonami

w polu wysokiego napięcia, pod ciśnieniem atmosferycznym powietrza [98]. W przypadku termo- i duroplastów stosuje się aktywację w plazmie niskociśnieniowej o temperaturze 60-100°C, w reaktorach z atmosferą tlenu, azotu, fluoru lub gazów szlachetnych [118], bądź też przy jednoczesnym promieniowaniu nadfioletowym [277]. W celu powierzchniowego sieciowania polietylenu na rury, taśmy, folie, sterylizowania polipropylenowych strzykawek jednorazowych, degradacji politetrafluoroetylenu, zmiany własności izolacji polimerowych kabli elektroenergetycznych, poprawy własności opon samochodowych z kauczuku stosuje się odpowiednio promieniowanie jonizacyjne, promieniowanie γ lampy kobaltowej C^{60} lub wysokoenergetyczne promieniowanie elektronowe [117]. W elektronice i w produkcji urządzeń medycznych własności warstw wierzchnich materiałów polimerowych mogą być kształtowane przez promieniowanie laserowe [278]. Funkcje ochronne lub dekoracyjne zapewnia lakierowanie powierzchni materiałów polimerowych oraz zadrukowywanie i dekorowanie na maszynach drukarskich, flokowanie elektrostatyczne, metalizowanie oraz wcieranie w materiały polimerowe środków antystatycznych, oleju silikonowego lub środków bakteriobójczych [118]. Własności mechaniczne polimerowych warstw wierzchnich można poprawić przez zastosowanie nanorurek węglowych, przy czym anizotropowość rozmieszczenia nanorurek sprzyja poprawie tych własności [279]. Kompozytowe warstwy polimerowe, zawierające nanorurki węglowe, stanowią element aktywny nanosensorów poziomu próżni oraz nacisku [280], w których zmiana objętości materiału w sposób bezpośredni wpływa na własności elektryczne elementu aktywnego. W wielu zastosowaniach, np. w sensorach gazów oraz biosensorach, są formowane *ultracienkie* filmy powierzchniowe zawierające nanorurki węglowe [281, 282], różniące się grubością, wykorzystanym materiałem łączącym i zabezpieczającym nanorurki, a także ich strukturą (jednościenne, wielościenne), czystością oraz sposobem ułożenia (przypadkowe, uporządkowane). W wyniku tego otrzymywane są przewodzące lub półprzewodnikowe pokrycia nanostrukturalne znajdujące zastosowanie w medycynie, ochronie środowiska, rolnictwie, przemyśle motoryzacyjnym, spożywczym i produkcji przemysłowej [283]. Wartość przewodnictwa elektrycznego decyduje o zastosowaniu danego kompozytu, jako składnika warstw powierzchniowych o własnościach izolacyjnych lub umożliwiających bezpieczne odprowadzenie ładunku elektrycznego, a w niektórych przypadkach jest ona wyższa niż przewodnictwo elektryczne poszczególnych składników kompozytu, jak np. w kompozycie złożonym z polianiliny i wielościennych nanorurek węglowych. Ze względu na duże przewodnictwo cieplne warstwy powierzchniowe z kompozytów polimerowych

zawierających nanorurki węglowe stosowane są przez przemysł kosmiczny i lotnictwo jako osłony termiczne. Przewodzące powłoki polimerowe naniesione na skrzydła samolotów umożliwiają ich odladzanie podczas trudnych warunków pogodowych, natomiast na zewnętrznych elementach pojazdów kosmicznych zastępują tradycyjne cieczowe systemy odprowadzania ciepła. Wprowadzenie nanorurek węglowych do osnowy polimerowej umożliwia wyznaczanie naprężeń przy użyciu spektroskopii ramanowskiej, gdyż kształt widma nanorurek węglowych (w szczególności położenie refleksu odpowiadającego wartości 2601 cm^{-1}) zmienia się w wyniku odkształcenia kompozytu [284, 285]. Powłoki polimerowe, zawierające nanorurki węglowe o własnościach biokatalitycznych, zapobiegają powstawaniu przykrych zapachów, jak również stosowane są na elementy aktywne biosensorów oraz jako materiały o podwyższonej biozgodności [286-288]. Kompozytowe warstwy polimerowe zawierające nanorurki węglowe mogą być także wykorzystane do budowy ogniw fotowoltaicznych [289]. Z uwagi na to, że przewodnictwo nanorurek węglowych zmienia się na skutek oddziaływania z molekułami wielu substancji chemicznych [290], mogą być one stosowane na elementy aktywne czujników i nanourządzeń elektronicznych, w których w wyniku nanoszenia nanocząstek metali szlachetnych, m.in. Au, Pt, Pd, Rh, na powierzchnię nanorurek węglowych następuje wzrost czułości oraz selektywności tych detektorów [291-297]. Kompozyt uzyskany w wyniku pokrycia zewnętrznej powierzchni nanorurek węglowych warstwą polimeru przewodzącego może być stosowany jako superkondensator [298]. Bardzo obiecujące w tym zakresie są również prace zmierzające do wykorzystania warstw powierzchniowych o osnowie polimerowej wzmacnianych mineralnymi nanorurkami haloizytowymi, jako substytutami nanorurek węglowych, które w wyniku pokrywania materiałami przewodzącymi mogą również zapewnić przewodnictwo cieplne i elektryczne powierzchni, a ogólny koszt takiego materiału może okazać się znacznie niższy [299]. Perspektywicznym przykładem zastosowania nanorurek węglowych w inżynierii powierzchni jest również ich wykorzystanie do otrzymywania nanorurek ceramicznych, przez osadzanie ZrO_2 na ich powierzchni i następnie utleniane w temperaturze powyżej 800°C, w wyniku czego na powierzchni nanorurek węglowych powstają ceramiczne otoczki o średnicy ok. 40-50 nm, których ścianki mają grubość około 6 nm [300]. Prowadzone w tej dziedzinie prace zmierzają do ustalenia zakresu potencjalnych zastosowań takich materiałów, które najpewniej również będą mogły być wykorzystane jako wzmocnienie kompozytowych warstw powierzchniowych o osnowie polimerowej.

Stan bardzo rozległej wiedzy szczegółowej w zakresie inżynierii powierzchni paradoksalnie nie sprzyja podejmowaniu prawidłowych decyzji menadżerskich dotyczących optymalizacji wyboru odpowiedniej technologii służącej wytworzeniu konkretnych produktów, gdyż brak jest syntezujących, zbiorczych opracowań, uwzględniających zarówno poznawcze, techniczne i ekonomiczne aspekty wymienionych technologii, jaki i ich znaczenie w praktyce przemysłowej, w których posłużono by się jednolitymi i ustandaryzowanymi kryteriami. Niniejsza praca poświęcona metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, porządkującej, usprawniającej i unowocześniającej proces prognozowania, ma stanowić przyczynek do zmiany tego stanu rzeczy.

3. Koncepcja i metodyka pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej i doświadczeń własnych, nabytych podczas praktycznej realizacji badań służących prognozowaniu rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, opracowano koncepcję niniejszej rozprawy habilitacyjnej. W szczególności sformułowano tezę i cel poznawczy pracy oraz wytyczono ogólny i szczegółowy zakres prac naukowo-badawczych. Autorska metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, będąca zasadniczym przedmiotem prowadzonych prac, jest hybrydą, na którą składa się zarówno opisana w niniejszym rozdziale **metodyka** interdyscyplinarnych badań, obejmująca zbiór omówionych w literaturze przedmiotu oryginalnie dobranych metod i narzędzi analitycznych stosowanych w inżynierii materiałowej, organizacji i zarządzaniu oraz informatyce, jak i umożliwiająca wykonanie dalszej części badań, zaprezentowana w 4. rozdziale rozprawy, **oryginalna koncepcja metodologiczna,** której opracowanie, weryfikacja doświadczalna i udostępnienie stanowi o wartości naukowej niniejszej pracy**. Wyniki wykonanych prac własnych są prezentowane począwszy od 4. rozdziału niniejszej pracy.**

3.1. Teza i cel pracy

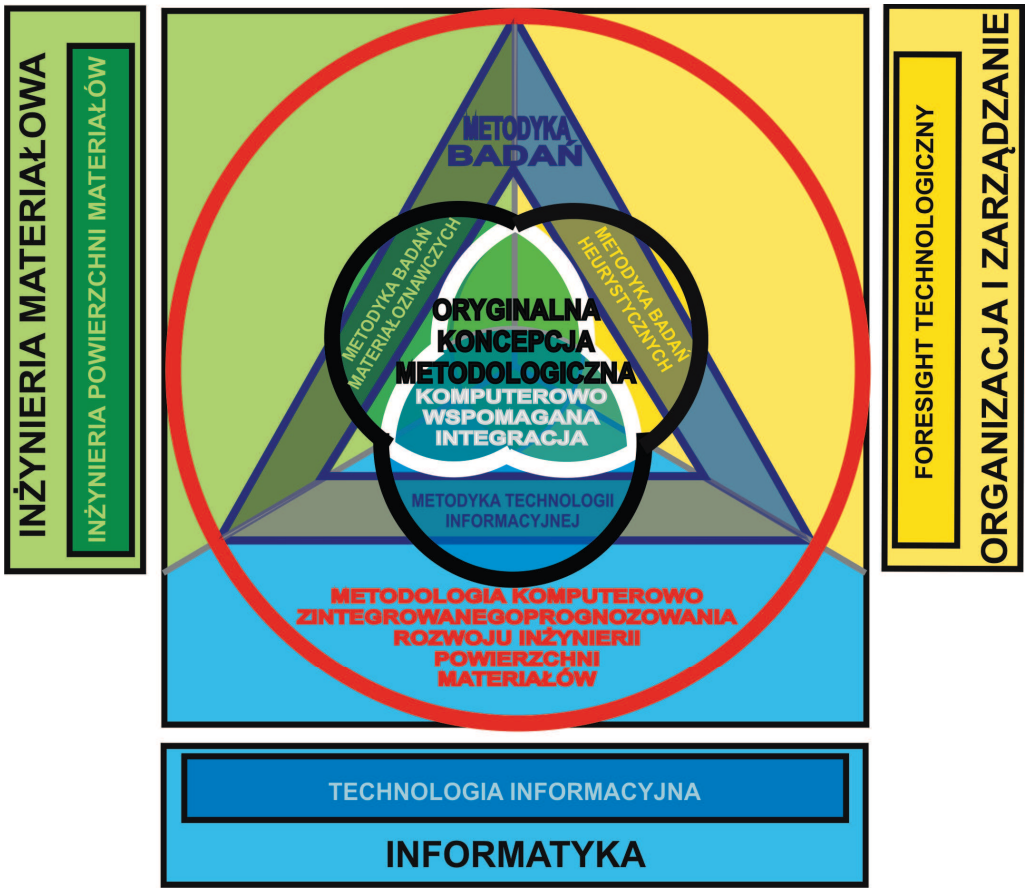
Tezę pracy sformułowano następująco:

W celu ograniczenia ryzyka prognozowania przyszłościowych kierunków rozwoju technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich, uzasadnione jest zastosowanie komputerowo zintegrowanej metodologii badań materiałoznawczych i heurystycznych strategicznego zarządzania wiedzą.

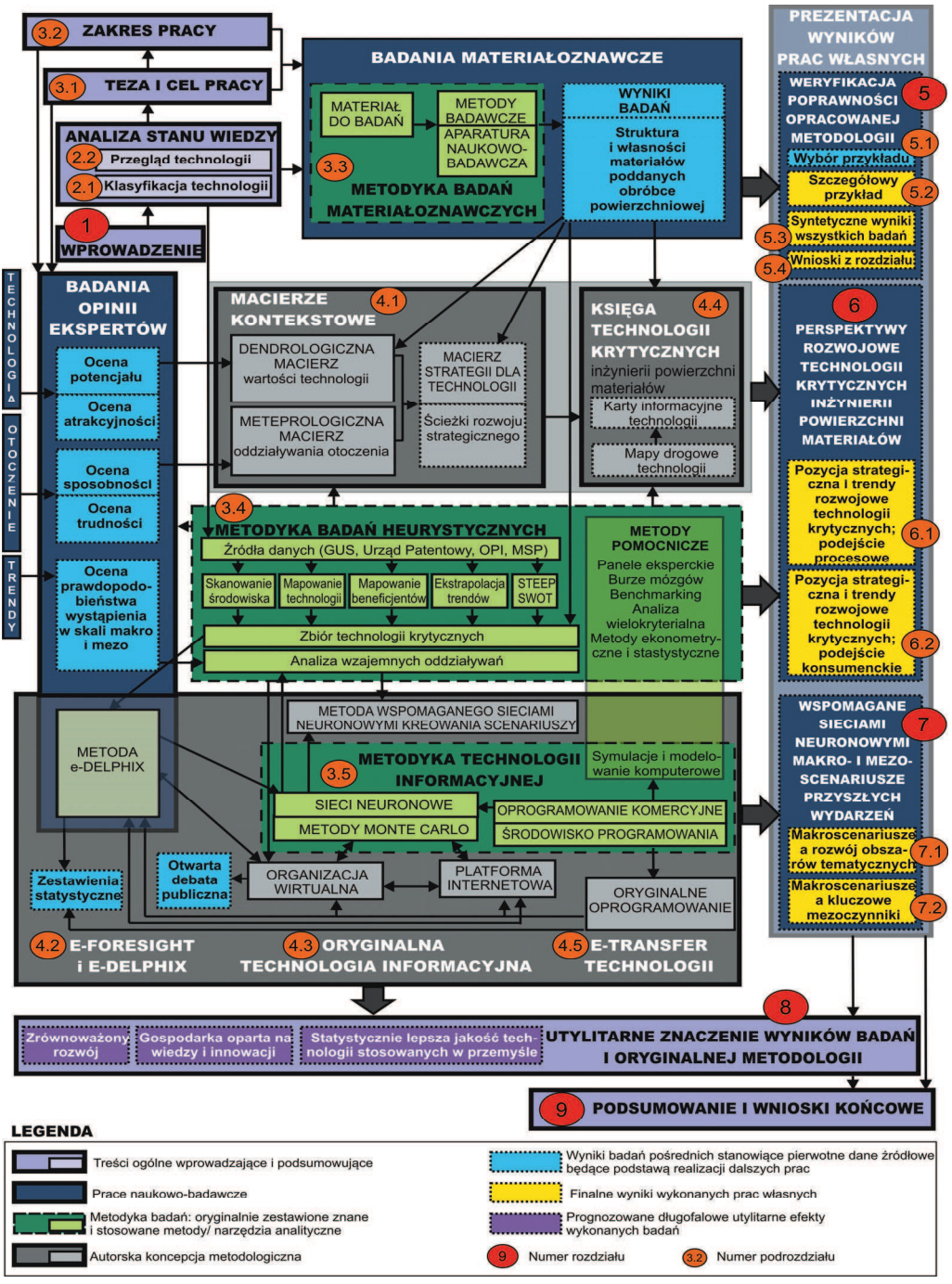
Celem poznawczym rozprawy jest opracowanie oryginalnej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, z wykorzystaniem badań strukturalnych oraz własności mechanicznych i innych własności fizykochemicznych materiałów obrobionych z użyciem różnych technologii kształtowania struktury i własności warstw wierzchnich i powłok różnych materiałów inżynierskich oraz badań heurystycznych strategicznego zarządzania wiedzą, w tym macierzy kontekstowych, mapowania drogowego technologii, wieloetapowego badania opinii ekspertów i oceny wzajemnych oddziaływań wspomaganych technologią informacyjną obejmującą organizację wirtualną, platformę internetową oraz sztuczne sieci neuronowe w powiązaniu z modelowaniem metodą Monte Carlo.

3.2. Zakres pracy

Złożony aparat metodologiczny, służący do diagnozowania kluczowych problemów naukowych, technologicznych, gospodarczych i ekologicznych w obszarze inżynierii powierzchni materiałów inżynierskich oraz określenia kierunków jej rozwoju strategicznego i podejmowania decyzji, zasadniczo dotyczy **trzech wzajemnie przenikających się dziedzin wiedzy**: inżynierii powierzchni materiałów, wchodzącej w skład inżynierii materiałowej, foresightu technologicznego, należącego do szerzej rozumianej dziedziny organizacji i zarządzania oraz technologii informacyjnej, wywodzącej się z informatyki (rys. 2).



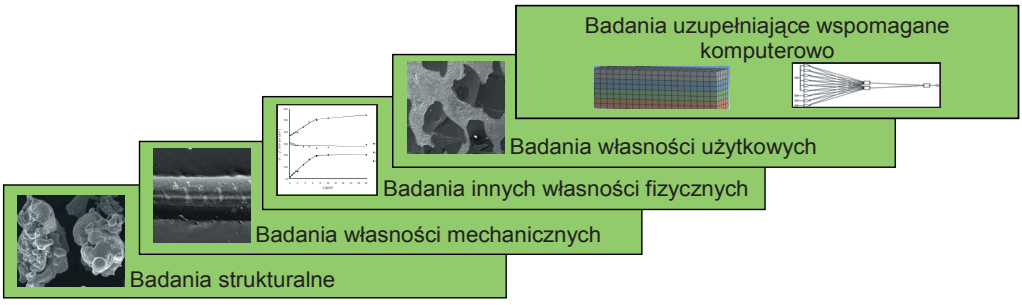
Rysunek 2. *Interdyscyplinarna metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów na tle dziedzin wiedzy i metodyki badań*



Rysunek 3. *Szczegółowy zakres rozprawy uwzględniający zawartość poszczególnych rozdziałów i podrozdziałów pracy*

Niektóre etapy badań wymagały jednak znacznie szerszego spojrzenia na rozpatrywane zagadnienia, co pociągnęło za sobą konieczność zastosowania metod, podejść i narzędzi analitycznych czerpiących z innych obszarów wiedzy szczegółowej, obejmujących: statystykę; ekonometrię; badania operacyjne; budowę i eksploatację maszyn; automatyzację i robotyzację procesów przemysłowych; zarządzanie strategiczne, taktyczne i operacyjne; zarządzanie jakością i środowiskiem oraz rachunkowość i finanse. Szczegółowy zakres badań, wykonanych w ramach niniejszej pracy, z uwzględnieniem rozdziałów i podrozdziałów pracy, w których omówiono poszczególne zagadnienia, przedstawiono na rysunku 3.

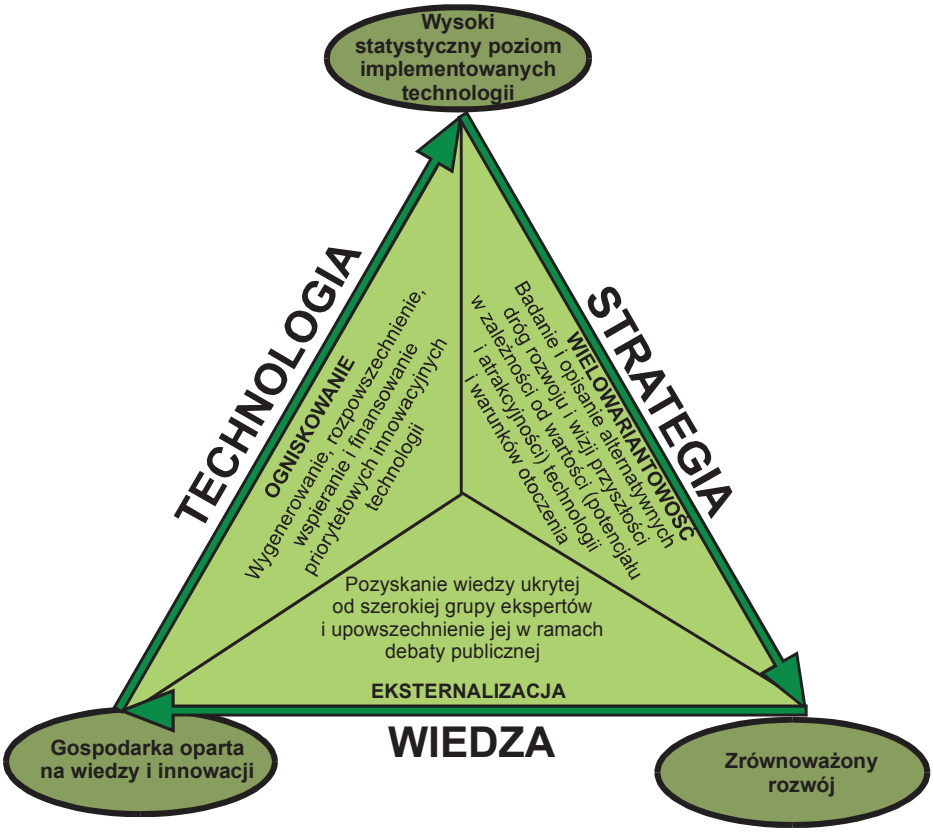
Pierwotne dane źródłowe, stanowiące podstawę prac wykonanych na późniejszych etapach badań, zawierają wyniki klasycznych eksperymentów materiałoznawczych, których ogólny zakres przedstawiono na rysunku 4, oraz wyniki przeprowadzonych na szeroką skalę badań eksperckich. W szczególności, wyniki serii materiałoznawczo-heurystycznych badań własnych, wykonanych w odniesieniu do ośmiu grup technologii szczegółowych (*S*1 do *S*8) [90-98, 161, 169-174, 301] (rys. 5), posłużyły do weryfikacji poprawności nowo opracowanej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów. Po uzyskaniu zadowalających wyników weryfikacji poprawności oryginalnej koncepcji metodologicznej zastosowano ją, opierając się na wynikach badań eksperckich, do określania pozycji strategicznej 140 grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów, rozumianych jako priorytetowe technologie o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w założonym horyzoncie czasowym 20 lat. Wyniki badań eksperckich stanowiły także dane pierwotne, służące do opracowania alternatywnych scenariuszy przyszłych wydarzeń, zależnych od rozwoju poszczególnych obszarów tematycznych oraz wpływu kluczowych mezoczynników natury ogólnej, do czego zastosowano sztuczne sieci neuronowe wykorzystane we własnym programie komputerowym.



***Rysunek 4**. Ogólny zakres badań materiałoznawczych*

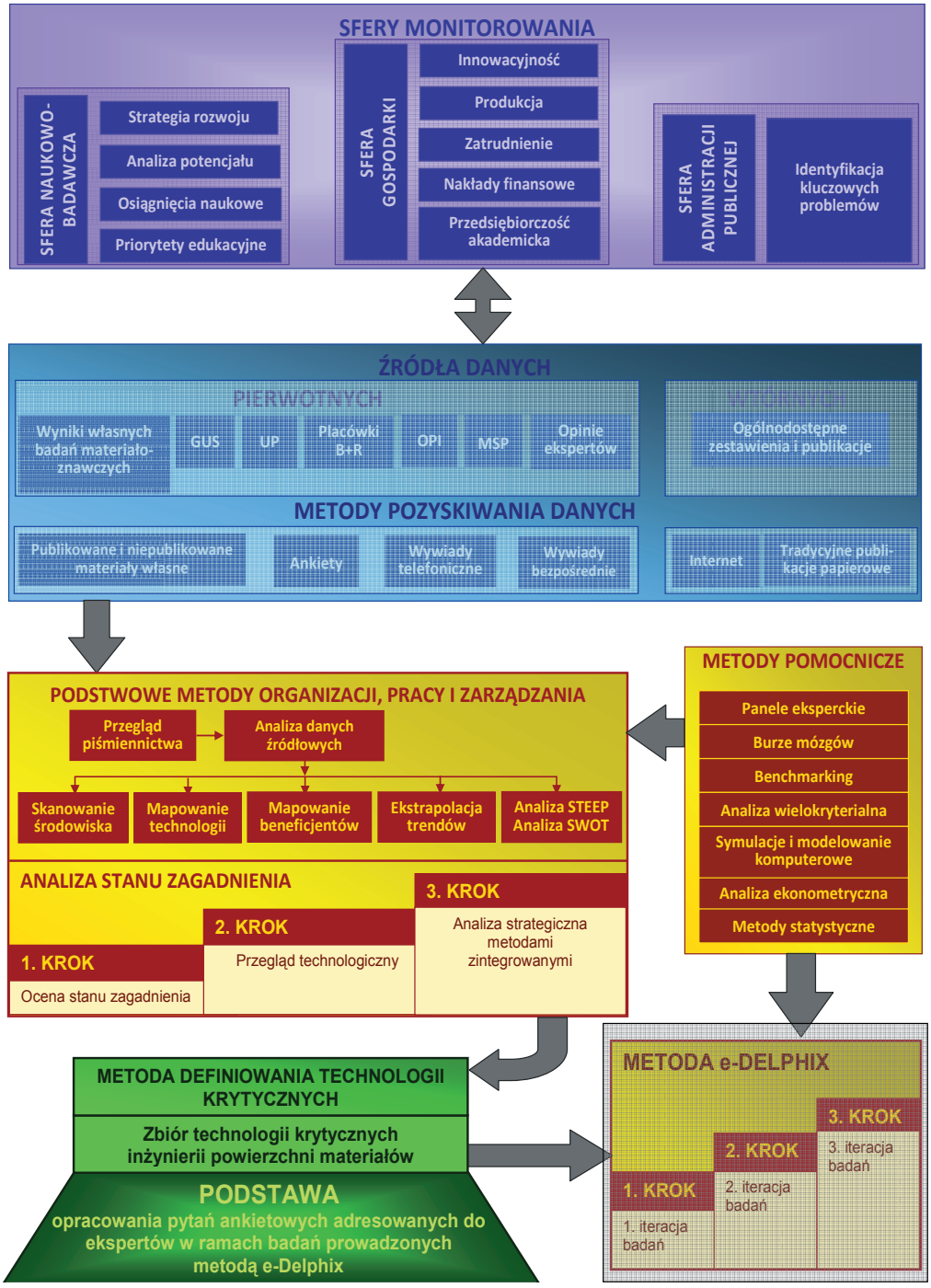
Rysunek 5. *Technologie szczegółowe poddane analizie w celu weryfikacji poprawności metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów*

Foresight jest ogółem działań zmierzających do wybrania najkorzystniejszej wizji przyszłości oraz wskazania dróg jej realizacji, z wykorzystaniem odpowiednich metod wywodzących się z nauki o organizacji i zarządzaniu. Realizacja foresightu technologicznego (rys. 6) inżynierii powierzchni materiałów, polegającego na systematycznym długofalowym prognozowaniu przyszłości nauki, techniki, ekonomii i społeczeństw, z uwzględnieniem alternatywnych wersji przyszłych wydarzeń, powiązanego z umiejętnością dobierania strategicznych technologii mających przynieść wielkie ekonomiczne i społeczne korzyści, oraz pozyskiwania od ekspertów wiedzy ukrytej i jej rozpowszechnienia, wymaga oryginalnego wyboru ograniczonego zbioru metod o różnorodnym możliwym zastosowaniu. Schemat tych metod wraz z ich wzajemnymi powiązaniami oraz sferami monitorowania i źródłami danych przedstawiono na rysunku 7. Oryginalnie dobrane metody organizacji, pracy i zarządzania posłużyły do wygenerowania zbioru technologii krytycznych, które następnie poddano badaniom eksperckim, wykonanym w myśl koncepcji e-foresightu

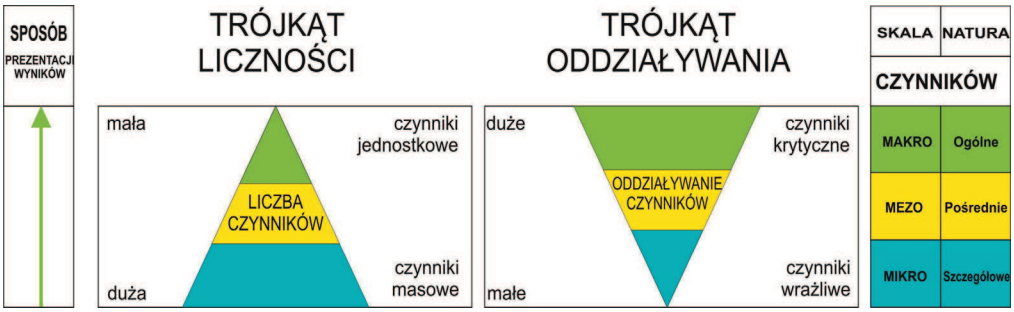


Rysunek 6. *Trójkąt foresightu technologicznego [302]*

[180-183] z użyciem metody e-Delphix [161, 175, 301] zapożyczającej ogólny zamysł kilku-etapowego ankietowania ekspertów z klasycznej metody delfickiej [162-168], lecz znacznie odbiegającej od niej zarówno metodologicznie, jak i ze względu na towarzyszącą jej rozbudowaną technologię informacyjną, co opisano w podrozdziale 4.2 niniejszej pracy. Elektroniczna ankietyzacja obejmowała grupę blisko 400 ekspertów wywodzących się ze środowisk akademickich, przemysłowych i administracji publicznej, którzy wypełnili ogółem kilkaset złożonych wielopytaniowych kwestionariuszy ankietowych [159], w trzech kolejnych iteracjach badań. Utworzenie kwestionariuszy każdorazowo w kilkunastu wersjach dotyczących odrębnie każdego z analizowanych obszarów tematycznych wraz z systemem ich elektronicznej edycji *on-line* należy również do zakresu wykonanych prac. Nowoczesnym badaniom eksperckim, prowadzonym drogą elektroniczną, towarzyszyły tradycyjne dyskusje tematyczne podczas paneli eksperckich i międzynarodowej konferencji.



Rysunek 7. *Metody organizacji, pracy i zarządzania zastosowane w toku wykonanych prac*



Rysunek.8. *Charakterystyka czynników analizowanych w rozprawie*

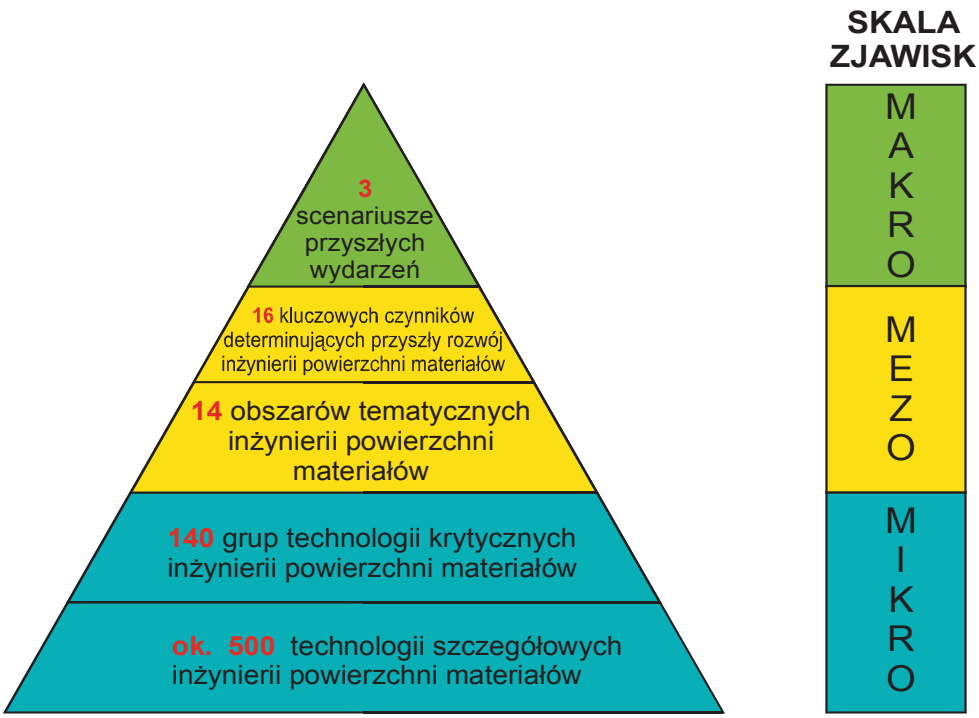
Skala i stopień skomplikowania badań, prowadzonych równolegle w odniesieniu do 14 obszarów tematycznych na różnych poziomach szczegółowości, zdeterminowały konieczność zastosowania nowoczesnej technologii informacyjnej, bez użycia której nie byłoby możliwe ani zebranie tak dużej liczby danych, ani – tym bardziej – opracowanie ich wyników w takiej formie i czasie, jak to wykonano.

Przeprowadzone prace własne dotyczą analizy zbioru różnorodnych czynników, które zakwalifikowano jako:

- **makroczynniki** krytyczne o naturze ogólnej, występujące jednostkowo i silnie oddziałujące na inne czynniki,
- **mezoczynniki**, występujące w ograniczonej liczbie i umiarkowanie wpływające na inne czynniki,
- **mikroczynniki** szczegółowe występujące licznie, charakteryzujące się wrażliwością na oddziaływanie innych czynników.

Charakterystykę analizowanych czynników, uwzględniającą przyjęty podział, przedstawiono z użyciem trójkąta liczności i trójkąta oddziaływania (rys. 8). Zgodnie z zaprezentowanym na rysunku 9 trójkątem liczności, dotyczącym wykonanych badań inżynierii powierzchni materiałów, liczba rozpatrywanych czynników rośnie wraz ze wzrastającym poziomem szczegółowości.

Na **poziomie makro** rozpatrywane są 3 alternatywne scenariusze przyszłych wydarzeń: optymistyczny, neutralny i pesymistyczny, które utworzono na podstawie wyników badań ankietowych przeprowadzonych drogą elektroniczną wśród kilkuset ekspertów. Wyniki badań eksperckich zaimplementowano jako dane wejściowe do sieci neuronowych w postaci zbioru uczącego, walidacyjnego i testowego. Utworzonych dziewięć modeli sieci neuronowych,



Rysunek. 9. *Trójkąt liczności charakteryzujący wykonane badania dotyczące inżynierii powierzchni materiałów*

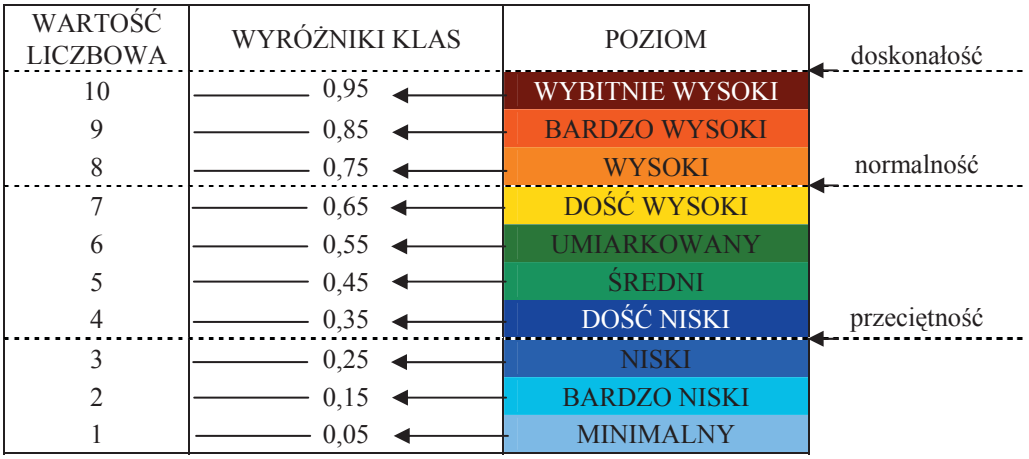
z których do wygenerowania ostatecznych wyników wybrano siedem, implementując je jako funkcje do oryginalnego systemu komputerowego, umożliwia losowe poszukiwanie rozwiązań, zgodnie z ideą metody Monte Carlo, i generowanie wyniku końcowego w postaci graficznej. Wynikiem tym są wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wariantów wydarzeń zależnych od wystąpienia określonych warunków lub czynników szczegółowych.

Poziom mezo obejmuje 16 kluczowych czynników natury ogólnej wpływających, zdaniem ankietowanych ekspertów, w najistotniejszy sposób na prognozowany rozwój inżynierii powierzchni materiałów, które przedstawiono na rysunku 10, oraz 14 obszarów tematycznych poddanych analizie, które zgrupowano w dwóch polach badawczych (rys. 11). Pole badawcze *M* (ang.: *Manufacturing*) odzwierciedla punkt widzenia producenta i obejmuje procesy wytwarzania zdeterminowane stanem wiedzy i możliwościami produkcyjnymi parku maszynowego, natomiast pole badawcze *P* (ang.: *Product*) jest określone przez oczekiwane własności funkcjonalno-użytkowe, wynikające z potrzeb klienta, i koncentruje się na produkcie oraz materiale, z którego go wykonano.

Rysunek 10. *Mezoczynniki najintensywniej oddziałujące na rozwój inżynierii powierzchni materiałów*

***Rysunek 11**. Obszary tematyczne poddane badaniom z uwzględnieniem podziału na dwa pola badawcze: M i P*

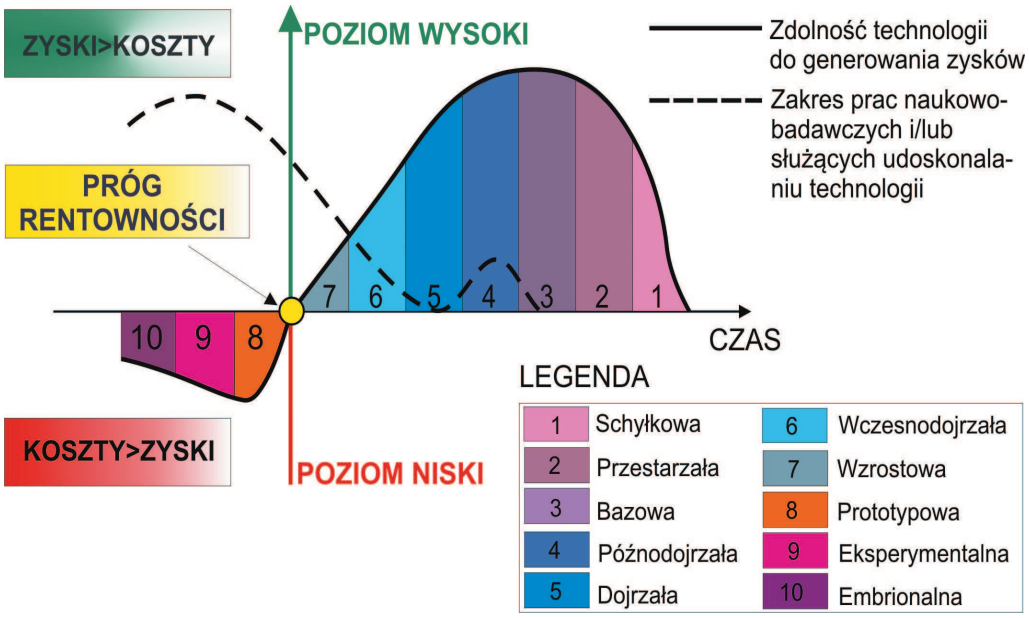
Poziom mikro jest natomiast reprezentowany przez 140 grup technologii krytycznych, obejmujących po 10 grup technologii, wyłonionych w ramach każdego z czternastu obszarów tematycznych. Grupy technologii krytycznych wyselekcjonowano spośród rozpatrywanych w początkowej fazie badań ok. 500 grup technologii szczegółowych, na podstawie wyników badań obejmujących ocenę stanu zagadnienia, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi (STEEP, SWOT). W ramach poszczególnych 140 grup technologii krytycznych można jeszcze wyodrębnić technologie szczegółowe, często różniące się od siebie jedynie detalami, które to detale mogą jednak istotnie determinować perspektywy rozwojowe danej technologii i jej aplikacyjność w praktyce przemysłowej. Niektóre z tych technologii



Rysunek 12. *Uniwersalna skala stanów względnych [93, 99, 161, 184]*

wybrane arbitralnie poddano szczegółowym badaniom materiałoznawczo-heurystycznym służącym weryfikacji poprawności opracowanej metodologii, a całościowe wyniki przedstawiono we własnym opracowaniu książkowym [161]. W celu określenia pozycji strategicznej poszczególnych grup technologii krytycznych i szczegółowych opracowano zbiór macierzy kontekstowych, obejmujących dendrologiczne macierze wartości technologii, meteorologiczne macierze oddziaływania otoczenia i macierze strategii dla technologii. Macierze te stanowią narzędzia graficznej analizy porównawczej poszczególnych technologii lub ich grup, pozwalając na ich zobiektywizowaną ocenę oraz określenie rekomendowanych strategii postępowania w odniesieniu do poszczególnych technologii lub ich grup, a także wytyczenie ścieżek rozwoju strategicznego. Końcowym efektem wykonanych badań jest także Księga Technologii Krytycznych, na którą składa się zbiór kilkuset map drogowych i kart informacyjnych technologii, stanowiących wygodne narzędzie ich analizy porównawczej pod względem wybranego kryterium materiałoznawczego, technologicznego lub ekonomicznego.

W niniejszej pracy do oceny czynników i zjawisk, w ramach prowadzonych badań ankietowych, zastosowano dziesięciostopniową jednobiegunową skalę przedziałową dodatnią bez zera, zwaną **uniwersalną skalą stanów względnych** (rys. 12), gdzie 1 oznacza minimalną ocenę lub poziom zgodności z daną cechą/ zjawiskiem/ czynnikiem/ stwierdzeniem, natomiast 10 jest wybitnie wysoką oceną lub poziomem zgodności z cechą/ zjawiskiem/ czynnikiem/ stwierdzeniem. W toku badań eksperci oceniali także **fazy cyklu życia** analizowanych technologii lub ich grup, co dla zachowania spójności rozważań wymagało utworzenia



Rysunek 13. *Fazy cyklu życia technologii*

dziesięciostopniowej skali, kompatybilnej z uniwersalną skalą stanów względnych, służącej zobiektywizowanej ocenie fazy życia danej technologii lub grupy technologii, gdzie 1 oznacza technologię schyłkową, a 10 – technologię embrionalną. Procesowi opracowywania nowej technologii towarzyszą nakłady na materiały, konstruowanie nowych urządzeń i wynagrodzenia personelu realizującego prace naukowo-badawcze, które stopniowo wzrastają, osiągając maksimum na etapie konstruowania i testowania instalacji prototypowych. W przypadku gdy nowo opracowane rozwiązania spełniają oczekiwania producenta, a należy mieć świadomość, że wiele z technologii nie wychodzi poza fazę testowania prototypów, następuje faza stopniowego wdrażania ich do produkcji, co pozwala nowej technologii generować pierwsze zyski, częściowo rekompensujące poniesione koszty aż do momentu osiągnięcia progu rentowności, czyli punktu, w którym zyski równoważą poniesione nakłady. Nowo opracowana technologia przechodzi następnie w fazę wzrostową, nabierając coraz większego znaczenia wśród ogółu procesów realizowanych w przedsiębiorstwie, zaczyna generować pierwsze poważne zyski, lecz koszty ponoszone na jej udoskonalanie, postępującą modernizację parku maszynowego zwykle związaną z jego automatyzacją i robotyzacją, dopasowywanie produktu do klienta i promocję nadal pochłaniają duże kwoty. Z biegiem

czasu proporcje te ulegają zmianie, ponieważ technologia wchodząc w fazę dojrzałości generuje coraz większe zyski, a nakłady maleją, co stanowi długo wyczekiwany przez producenta moment, zwany – zgodnie z terminologią stosowaną w naukach o zarządzaniu – *dojeniem krowy* lub *zbieraniem żniw* [303-307]. Po czasie *prosperity* zyski z realizacji produkcji z użyciem technologii zaczynają maleć, co zwykle mobilizuje naczelne kierownictwo przedsiębiorstwa do podjęcia działań naprawczych, modernizacyjnych, usprawniających, czemu towarzyszy kampania promocyjna w mediach. Działania te najczęściej odnoszą ograniczony w czasie skutek i po chwilowej poprawie następuje stopniowa degradacja technologii znajdującej się już w fazie bazowej, która następnie staje się technologią przestarzałą, by jako schyłkowa ostatecznie zejść z rynku. W odniesieniu do zaprezentowanego typowego i najbardziej klasycznego cyklu życia technologii, przedstawionego na rysunku 13, w praktyce mogą pojawić się odchylenia najczęściej dotyczące trwania poszczególnych faz, nietypowego błyskawicznego wyparcia technologii przez inne nowocześniejsze rozwiązania lub przeciwnie – odnalezienie jej zupełnie nowych zastosowań i częściowego powielenia poszczególnych faz cyklu życia.

3.3. Metodyka badań materiałoznawczych

Immanentną częścią opracowanej metodologii są szczegółowe badania materiałoznawcze struktury warstw powierzchniowych, wytworzonych z wykorzystaniem różnych metod obróbki powierzchniowej, jak również badania własności mechanicznych obrobionych materiałów oraz ich innych własności fizykochemicznych i użytkowych w warunkach eksploatacji lub do nich zbliżonych. Wyniki badań materiałoznawczych, w połączeniu z wynikami badań heurystycznych strategicznego zarządzania wiedzą, dają pełny obraz zagadnienia, pozwalając na scharakteryzowanie analizowanych grup technologii pod względem ujednoliconych kryteriów materiałoznawczych, technologicznych i ekonomicznych, stanowiących podstawę analizy porównawczej tych technologii. Jedność miejsca i czasu nie jest konieczna w odniesieniu do realizacji badań materiałoznawczo-heurystycznych i nie wpływa na poprawność przeprowadzonego wnioskowania. Weryfikacja poprawności opracowanej metodologii, na podstawie kryteriów materiałoznawczych, przeprowadzona w odniesieniu do wybranych technologii szczegółowych inżynierii powierzchni materiałów, jest konieczna dla potwierdzenia prawidłowości przyjętego toku rozumowania i uniwersalności zaproponowanego podejścia.

Synergiczne oddziaływanie metod badań materiałoznawczych i heurystycznych, wspartych nowoczesną technologią informacyjną, jest zatem gwarantem trafności i adekwatności ocen dokonywanych według metodologii komputerowo wspomaganego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów. Poprawność nowo opracowanej metodologii zweryfikowano, z udziałem licznych współpracowników, na przykładach dotyczących ośmiu grup technologii [90-98, 161, 169-174], które oznaczono symbolami alfanumerycznymi od *S*1 do *S*8. **Materiały do badań** poddano różnym rodzajom **obróbki powierzchniowej** (*S*1-*S*6, *S*8) lub wytworzono z nich próbki, których warstwę powierzchniową charakteryzują odmienne własności niż własności pozostałych warstw (*S*7). Podjęcie badań materiałoznawczo-heurystycznych wymaga przyjęcia w ramach każdej grupy technologii ze zbioru *S*1-*S*8 indywidualnego kryterium podziału, pozwalającego na wyodrębnienie homogenicznych technologii lub ich grup, stanowiących podstawę analizy porównawczej. Wyodrębnione, w ramach każdej grupy technologii ze zbioru *S*1-*S*8, technologie szczegółowe lub ich grupy oznaczono symbolami alfanumerycznymi, używając kolejnych wielkich liter alfabetu z dolnym indeksem, wskazującym na reprezentowaną grupę technologii. W tablicy 2 przedstawiono materiał do badań oraz kryterium podziału grup technologii szczegółowych *S*1-*S*8 wraz z wyróżnionymi w ich ramach technologami/ grupami technologii poddanych badaniom eksperymentalno-porównawczym.

Materiały obrobione powierzchniowo, z użyciem różnych technologii (*S*1-*S*6, *S*8) lub wytworzone klasyczną metodą metalurgii proszków (*S*7), poddano w różnym zakresie badaniom strukturalnym, badaniom własności mechanicznych i innych własności fizycznych[1)], własności użytkowych oraz badaniom uzupełniającym wspomaganym komputerowo. W tablicy 3 zestawiono rodzaje wykonanych badań i użytą do tego celu aparaturę naukowo-badawczą, oznaczając symbolami *S*1-*S*8 grupy technologii, w odniesieniu do których wykonano poszczególne badania.

W rozdziale 5 niniejszej pracy przedstawiono szczegółowy przykład implementacji metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, dotyczący obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco (*S*1), poprzedzony krótką analizą wskazującą kryteria wyboru tego właśnie przykładu oraz syntetyczne wyniki badań, odnoszące się do pozostałych siedmiu grup technologii (*S*2-*S8*).

[1)] Własności mechaniczne, wyróżnione ze względu na wiodące znaczenie dla prowadzonych badań, również są własnościami fizycznymi.

Tablica 2. *Materiał do badań oraz kryterium podziału grup technologii szczegółowych S1-S8 wraz z wyróżnionymi w ich ramach technologami/ grupami technologii poddanych badaniom eksperymentalno-porównawczym*

Grupa techno-logii	Materiał do badań	Kryterium podziału	Wyodrębnione technologie/ grupy technologii poddane badaniom eksperymentalno-porównawczym				
			Symbol	Opis			
*S*1	Stopowe stale narzędziowe do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28 obrobione cieplnie i mechanicznie; proszki węglików niobu, tantalu, tytanu, wanadu i wolframu	Rodzaj proszku naniesionego na podłoże lub jego brak	A_{S1}	Przetapianie laserowe stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28 bez użycia proszków węglików z użyciem lasera diodowego dużej mocy HPDL ROFIN DL 020			
			B_{S1}	Przetapianie i stopowanie laserowe proszkiem	NbC	stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28 z użyciem lasera diodowego dużej mocy HPDL ROFIN DL 020	
			C_{S1}		TaC		
			D_{S1}		TiC		
			E_{S1}		VC		
			F_{S1}		WC		
*S*2	Odlewnicze stopy magnezu MCMgAl12Zn1, MCMgAl9Zn, MCMgAl6Zn1, MCMgAl3Zn obrobione cieplnie i mechanicznie; proszki węglików tytanu, wolframu, wanadu i krzemu oraz tlenku aluminium	Rodzaj proszku naniesionego na podłoże	A_{S2}	Laserowe przetapianie i wtapianie cząstek	TiC	w powierzchnię odlewniczych stopów magnezu z użyciem lasera diodowego dużej mocy HPDL ROFIN DL 020	
			B_{S2}		WC		
			C_{S2}		VC		
			D_{S2}		SiC		
			E_{S2}		Al_2O_3		
*S*3	Stop miedzi z cynkiem CuZn40Pb2	Liczba warstw tworzących powłokę	A_{S3}	Fizyczne osadzanie z fazy gazowej	jednowarstwowych, n=1	powłok metodą reaktywnego rozpylania magnetronowego (ang.: *Reactive Magnetron Sputtering* – RMS)	
			B_{S3}		kilkunastowarstwowych, n=15		
			C_{S3}		multiwarstwowych, n=150		
*S*4	Wybrane gatunki stali: wytopione metodą konwencjonalną: 18CrMnTi4-4 maszynowa do nawęglania, 38CrAlMo6-10 maszynowa do azotowania, 37CrMoB10-4 niskostopowa narzędziowa do pracy na gorąco, X37CrMoV5-1 do pracy na gorąco oraz stale szybkotnące HS12-0-2+C i HS6-5-2; stale przetopione próżniowo: X37CrMoV5-1(vac) i X40CrMoV5-1(vac) narzędziowe do pracy na gorąco oraz wieloskładnikowa 40CrWMoVB17-11-16; przetopiona elektrożużlowo stal X40CrMoV5-1(es) narzędziowa do pracy na gorąco	Rodzaj klasycznej obróbki cieplno-chemicznej	A_{S4}	Azotowanie i jego odmiany			
			B_{S4}	Nawęglanie i węgloazotowanie wysokotemperaturowe			
			C_{S4}	Borowanie dyfuzyjne			
*S*5	Spiekane materiały narzędziowe na bazie węglików spiekanych, cermetali, ceramiki tlenkowej i azotkowej oraz sialonu	Typ naniesionych powłok	A_{S5}	Nanoszenie na spiekane materiały narzędziowe	jednowarstwowych prostych		powłok PVD metodą katodowego odparowania łukowego (CAD)
			B_{S5}		jednowarstwowych złożonych	klasycznych	
			C_{S5}			nanokrystalicznych	
			D_{S5}		wielowarstwowych, n<10		
			F_{S5}		wielowarstwowych, n≥10		
			G_{S5}		gradientowych wielostopniowych		
			H_{S5}		gradientowych ciągłych		

Grupa technologii	Materiał do badań	Kryterium podziału	Wyodrębnione technologie/ grupy technologii poddane badaniom eksperymentalno-porównawczym						
			Symbol	Opis					
*S*5			E_{S5}		wielowarstwowych, n<10 powłok CVD metodą klasycznego wysokotemperaturowego chemicznego osadzania z fazy gazowej (HFCVD)				
*S*6	Płytki krzemu polikrystalicznego domieszkowanego borem	Typ teksturowania	A_{S6}	Teksturowanie	alkaliczne		krzemu polikrystalicznego		
			B_{S6}		laserowe				
			C_{S6}		laserowe z chemicznym trawieniem				
*S*7	Proszki stali szybkotnącej HS6-5-2, kobaltu i węglika wolframu	Materiał osnowy i % udział objętościowy składników w warstwach proszków	A_{S7}	Wytwarzanie konwencjonalną metodą metalurgii proszków spiekanych narzędziowych materiałów gradientowych	MG-90HSS-/10WC	na osnowie stali szybkotnącej HS6-5-2 zawierających	10%	udziału objętościowego fazy WC w warstwie powierzchniowej	
			B_{S7}		MG-75HSS-/25WC		25%		
			C_{S7}		MG-3Co /97WC	o osnowie Co zawierających	97%		
*S*8	Poliaktyd PLA, Cargill Down LLC; poliwęglan PC, Lexan 143 R, GE Plastics; poli(tereftalan etylenu) PET, Elpet-A, Boryszew SA; polistyren PS, Owispol 945 E, Dwory SA; kompozyt polimerowy o osnowie poliamidu 6 zawierający dwa prekursory metalizowania: acetyloacetonian miedzi (II) $Cu(acac)_2$ oraz tlenek miedzi (II) CuO; kompozyty typu A (LDPE-HDPE-PP) i typu B (LDPE-HDPE-PP-PS-PET) o różnych udziałach masowych (1, 2 lub 3%) kompatybilizatora TMPTA, gdzie: LDPE – polietylen małej gęstości Malen-E FABS 23-D0022, Basell Orlen Polyolefins Płock; HDPE – polietylen dużej gęstości Hostalen ACP 5831 D, Basell Orlen Polyolefins Płock; PP – polipropylen izotaktyczny Malen P F 401, Basell Orlen Polyolefins Płock; PS – polistyren Owispol 945 E, Dwory SA; PET – poli(tereftalan etylenu) amorficzny Elpet-A, Boryszew SA; TMPTA – kompatybilizator: triakrylan trimetylolopropanu, Sigma Aldrich.	Procesy fizyczne powodujące modyfikację warstwy powierzchniowej materiału polimerowego	A_{S8}	Modyfikacja warstwy wierzchniej wybranych materiałów polimerowych	modyfikacja warstwy wierzchniej PLA metodą wyładowań koronowych z użyciem aktywatora folii AF2, Metalchem				
			B_{S8}		plazmą niskotemperaturową generowaną w powietrzu przez generator znajdujący się poza strefą modyfikowania materiału				
			C_{S8}		plazmą niskotemperaturową w warunkach obniżonego ciśnienia (0,05-5 hPa)				
			D_{S8}		napromieniowane różną liczbą impulsów lasera ekscymerowego ArF powierzchni PC, PET, PS i kompozytu polimerowego o osnowie poliamidu 6 zawierającego acetyloacetonian miedzi (II) $Cu(acac)_2$ oraz tlenek miedzi (II) CuO				
			E_{S8}		napromieniowanie wysokoenergetycznym promieniowaniem elektronowym z użyciem akceleratora UELW-101-10 firmy NPO TORYJ kompozytów typu A i B				

LEGENDA:
n – liczba warstw

Tablica 3. *Uogólniona metodyka badań materiałoznawczych*

Rodzaj badania	Aparatura naukowo-badawcza	Symbole grup technologii
Badania strukturalne		
Badania materiałograficzne (zgładów nietrawionych i trawionych, powierzchni materiałów przed obróbką i/lub po obróbce powierzchniowej, proszków do badań, powierzchni uszkodzonej/ zarysowanej)	Mikroskopy świetlne: Leica MEF4A; MeF, Reichert; Neophot 2, Carl Zeiss Jena; Axiovert 405M, Opton	*S*1-*S*4, *S*5, *S*7
	SEM: DSM-940, Opton; SUPRA 35, ZEISS; XL-30, Philips; JXA-50A, JEOL	*S*1-*S*8
	Mikroskop konfokalny: CLSM 5 Exciter, ZEISS	*S*5
Badania fraktograficzne (przełomy próbek)	SEM: XL-30, Philips, SUPRA 35, ZEISS	*S*3, *S*5, *S*7, *S*8
Pomiary w mikroskali: głębokości strefy przetopienia i wpływu ciepła, szerokości lica ściegu, głębokości pęknięć, grubości i stopnia perforacji powłok, wielkości ziarn austenitu pierwotnego metodą Snyder-Graffa, udziału objętościowego węglików, grubości zmodyfikowanej warstwy wierzchniej polimerów	Komputerowy analizator obrazu na wyposażeniu mikroskopu: Leica-Qwin/ Leica MEF4A, Superprobe 733, JEOL, Image-Pro Plus/ Axiovert 405M, Opton	*S*1, *S*2, *S*3, *S*4, *S*5, *S*7, *S*8
Rentgenowska i spektralna (mikro)analiza jakościowa i/lub ilościowa składu chemicznego i/lub fazowego	SEM lub mikroanalizator rentgenowski wyposażony w spektrometr energii (EDS): DSM-940, Opton/ EDS LINK ISIS, Oxford; SUPRA 35, ZEISS/ EDS TRIDEX XM4, EDAX; JEOL JCXA 733/ EDS LINK ISIS, Oxford; XL-30, Philips/ EDS EDAX, Philips	*S*1-*S*3, *S*5, *S*7-*S*8
Analiza rozkładu powierzchniowego pierwiastków stopowych (po obróbce powierzchniowej, po badaniu odporności erozyjnej)		*S*1-*S*4, *S*7
Analiza składu fazowego i/lub struktury krystalograficznej	Dyfraktometr rentgenowski: X'Pert PRO firmy Panalytical, Dron 2.0, FPM Seifert, Siemens-Halske Kristalloflex-4	*S*2-*S*5, *S*7
Badania tekstury: metodą figur biegunowych odwrotnych		*S*3
Badania tekstury: metodą refleksyjną		*S*4
Badania dyfrakcyjne i/lub obserwacje struktury cienkich folii	TEM: JEM 3010UHR firmy JEOL, Tesla BS 540, JEOL 200CX	*S*1, *S*4-*S*5, *S*7
Badania zmiany stężenia pierwiastków w warstwie powierzchniowej, materiale podłoża i/lub w strefie przejściowej	Spektrometr optyczny wyładowania jarzeniowego GDOS-75 QDP, Leco Instruments	*S*3, *S*4, *S*5
Badania grubości powłok metodą kalotestu	Stanowisko do utworzenia krateru w badanym materiale	*S*3, *S*5
Badania dylatometryczne w celu wyznaczenia współczynnika rozszerzalności liniowej i temperatury przemian fazowych	Dylatometr różnicowy firmy Adamel; dylatometry bezwzględne: DI-4 i Linceis	*S*4
Badania stopnia utlenienia warstwy powierzchniowej	Spektrometr elektronowy Escalab 210, VG Scientific	*S*8
Badania własności mechanicznych		
Badania twardości metodą Rockwella w skali A C F	Twardościomierz firmy Zwick ZHR 4150TK	*S*7 *S*1, *S*4, *S*7 *S*2
Badania mikrotwardości: statyczną, HV metodą Vickersa	Ultramikrotwardościomierz DUH 202, Shimadzu, mikrotwardościomierz Future Tech	*S*1, *S*2, *S*7
Badania mikrotwardości: dynamiczną, DHV metodą Vickersa		*S*3, *S*5
Badania sztywności/ naprężeń wewnętrznych / modułu Younga	Program Hardness 4.2 sprzężony z urządzeniem DUH 202, Shimadzu	*S*3
Badania przyczepności powłok do podłoża metodą zarysowania (ang.: *scratch test*) dla wyznaczenia obciążenia krytycznego L_{C2}	Sterowane komputerowo urządzenie Sebastian 5A, Quad Group; urządzenie REVETEST, CSEM	*S*3, *S*5
Badania pracy łamania (udarności)	Młot udarnościowy Charpy'ego	*S*4
Badania wytrzymałości na rozciąganie i zginanie	Maszyna wytrzymałościowa Instron 1195 z przystawką wysokotemperaturową	*S*4
Badania wytrzymałości zmęczeniowej	Maszyna wytrzymałościowa PWY firmy Schenck	*S*4

Rodzaj badania			Aparatura naukowo-badawcza	Symbole grup technologii
Badania wytrzymałości zmęczeniowej stopy zębów Z_{gj}			Stanowisko badawcze: dwie przekładnie (obiekt badań-przekładnia zamykająca)	*S*4
Badania odporności na kruche pękanie K_{Ic} metodą Palmqvista			Twardościomierz firmy Zwick ZHR 4150TK	*S*7
Badania innych własności fizycznych				
Badania średniego arytmetycznego odchylenia profilu od linii średniej R_a (chropowatości)			Profilometr Sutronic 3+ firmy Taylor Hobson	*S*1, *S*2, *S*3, *S*5
Badania grawimetryczne w celu określenia zmian masy próbek podczas cyklicznych zmian temperatury			Waga analityczna WA-31	*S*4
Badanie współczynnika odbicia promieniowania elektromagnetycznego (własności optyczne)			Spektrometr Perkin-Elmer Lambda wyposażony w sferę całkującą	*S*6
Badanie własności elektrycznych wytworzonych ogniw solarnych			Stanowisko SOLAR-LAB do pomiaru charakterystyk I-V ogniw solarnych	*S*6
Pomiar gęstości	właściwej (rzeczywistej)		Piknometr gazowy AccuPyc 1330, Micromeritics	*S*7
	metodą densymetryczną		Stanowisko pomiarowe: pozorna strata masy próbki przy zanurzeniu w wodzie	*S*7
Badania stereologiczne w celu pomiaru porowatości			Komputerowa analiza obrazu Image-Pro Plus/ mikroskop: Axiovert 405M, Opton	*S*7
Badanie kąta zwilżania w celu obliczenia swobodnej energii powierzchniowej (SEP) metodą Owensa-Wendta			Goniometr, Akchem; tensometr, Sigma-Aldrich	*S*8
Badania własności użytkowych				
Badania odporności erozyjnej			Urządzenie strumieniowo powietrzne Falex Air Jet Eroder, Falex Corporation;	*S*3
Badania odporności korozyjnej			PGP 201 Potentiostat/ Galvanostat	*S*3
Badania odporności na zużycie ścierne	metodą metal-proszek ceramiczny (względny % ubytku masy próbki)		Stanowisko pomiarowe do prowadzenia testu ścieralności zgodnego z amerykańską normą ASTM G65	*S*1
	metodą *pin-on-disc*		Tribometr CSEM HTT (High Temperature Tribometer)	*S*3-*S*5, *S*7
Badania odporności na zmęczenie cieplne dla określenia średniej głębokości i/lub gęstości pęknięć			Urządzenia nagrzewające: indukcyjnie, stykowo przez kontakt z rozgrzaną wkładką Cu (900°C) lub przez promieniowanie i konwekcję w piecu elektrycznym	*S*1, *S*4
Badania własności skrawnych	dla wyznaczenia szerokości pasma zużycia VB_{max}		Stanowisko do wiercenia otworów w normalizowanej stali o określonej twardości	*S*4
	dla wyznaczenia parametru trwałości ostrza i wzrostu trwałości ostrza		Tokarka do próby ciągłego toczenia bez użycia cieczy chodząco-smarujących	*S*5
Wspomagane komputerowo badania uzupełniające				
Weryfikacja poprawności badań twardości		z użyciem sztucznych sieci neuronowych	Program komputerowy Statistica	*S*2
Ocena wpływu własności powłok na ich trwałość eksploatacyjną				*S*5
Obliczenie udziału objętościowego austenitu szczątkowego w stalach metodą Averbacha-Cohena			Program komputerowy opracowany w Instytucie Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej	*S*7
Rozwiązanie dyfraktogramów z TEM			Program komputerowy Eldyf	*S*7
Symulacja komputerowa naprężeń zgodnie z MES			Program komputerowy Inventor 11; program ANSYS 12.0	S7

3.4. Metodyka badań heurystycznych

Realizacja założonych celów pracy wymagała oryginalnego wyboru spośród – różnorodnych możliwych – znanych i rekomendowanych [162-168] metod heurystycznych ograniczonego ich zbioru, w celu wygenerowania technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów, poddanych dalszym badaniom z udziałem szerokiego grona krajowych i zagranicznych ekspertów. Krótką charakterystykę podstawowych i pomocniczych metod zastosowanych w toku badań zamieszczono w tablicy 4. Grupa kilkudziesięciu ekspertów kluczowych, wyłonionych w drodze konkursu, na podstawie pierwotnych i wtórnych źródeł danych dotyczących sfery naukowo-badawczej, sfery gospodarki i sfery administracji publicznej, przeprowadziła **analizę istniejącej sytuacji** [76, 161, 188, 301], w zakresie rozwoju ok. 500 technologii inżynierii powierzchni materiałów, zgrupowanych w 14 obszarach tematycznych oraz towarzyszących im uwarunkowań społeczno-gospodarczych. Badania te szczegółowo przedstawione we własnym opracowaniu książkowym [76], obejmujące ocenę stanu zagadnienia, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi, miały na celu wygenerowanie zbioru technologii krytycznych, będących przedmiotem dalszych zainteresowań podczas trzech iteracji metody e-Delphix, a zgromadzona wiedza stanowiła ponadto podstawę opracowania kwestionariuszy ankietowych adresowanych do ekspertów podczas pierwszej iteracji badań.

Diagnoza stanu zagadnienia zawierała: ogólną charakterystykę badanego obszaru tematycznego z uwzględnieniem podstawowych definicji, rysu historycznego i obszarów szczegółowych; dane statystyczne dotyczące kraju, Europy i Świata oraz główne trendy i długoterminowe kierunki rozwojowe obejmujące dalekosiężne, kontrowersyjne, nietypowe i nie do końca potwierdzone lub zbadane teorie wraz z zestawieniem źródeł literaturowych, w tym klasycznych, najnowszych i anglojęzycznych.

Przegląd technologiczny, wykonany w odniesieniu do każdego z obszarów tematycznych obejmował sporządzenie pełnej listy znanych i stosowanych w danym obszarze technologii i ocenę ich aktualnej fazy cyklu życia, dokonaną w celu wyeliminowania rozwiązań przestarzałych, nieefektywnych, nieekologicznych i o słabych perspektywach rozwojowych. Po dokonaniu wstępnej selekcji do dalszych analiz zakwalifikowano dobrze rokujące technologie dojrzałe oraz technologie wzrostowe, prototypowe, eksperymentalne i embrionalne. W celu wyznaczenia zbioru potencjalnych technologii krytycznych przeprowadzono

Tablica 4. *Skrócona charakterystyka metod organizacji, pracy i zarządzania zastosowanych w toku realizacji prac badawczych*

Lp.	Nazwa metody	Charakterystyka
	Metody podstawowe	
1.	Przegląd piśmiennictwa	Studia literaturowe czasopism tradycyjnych, najnowszych pozycji książkowych i źródeł internetowych dotyczących analizowanych obszarów tematycznych ze szczególnym uwzględnieniem pozycji najnowszych i anglojęzycznych
2.	Analiza danych pierwotnych	Analiza na podstawie publikowanych i niepublikowanych materiałów własnych, a także danych pierwotnych pochodzących z GUS, Urzędu Patentowego, Placówek Badawczo-Rozwojowych, OPI, MSP oraz opinii ekspertów pozyskanych w drodze badań ankietowych, wywiadów telefonicznych i bezpośrednich przeprowadzonych podczas osobistych wizyt w firmach i instytucjach lub korespondencyjnie drogą elektroniczną
3.	Analiza danych wtórnych	Wykorzystanie do własnych celów ogólnodostępnych zestawień i publikacji dostępnych w formie papierowej lub w Internecie, sporządzonych pierwotnie w innym celu.
4.	Skanowanie środowiska	Bierne, czynne i skierowane skanowanie środowiska, służące zidentyfikowaniu, klasyfikacji i opracowaniu ogólnie dostępnych informacji, dotyczących przedmiotu prowadzonych badań, obejmujące śledzenie informacji prasowych, badania bibliometryczne, analizy patentowe
5.	Mapowanie technologii	Tworzenie opracowań graficznych dopasowywanych do trendów rynkowych i elementów sprawczych, z uwzględnieniem czynnika czasu, mających na celu wytyczenie kierunków rozwojowych i zorientowanie czynności na osiągnięcie celu
6.	Mapowanie beneficjentów	Tworzenie opracowań graficznych w odniesieniu do szeroko rozumianego grona beneficjentów: przedstawicieli świata nauki, gospodarki i administracji publicznej, zarówno w odniesieniu do ekspertów uczestniczących w elektronicznych badaniach ankietowych, jak i finalnych beneficjentów wyników wykonanych badań
7.	Ekstrapolacja trendów	Analiza istniejących obecnie trendów i wnioskowanie na podstawie danych historycznych o wystąpieniu i rozwoju zdarzeń w przyszłości
8.	Analiza STEEP	Analiza kluczowych makroekonomicznych czynników **S**połeczno-**T**echnologiczno-**E**konomiczno-**E**kologiczno-**P**olitycznych i prawnych oddziałujących na analizowane zjawiska, umożliwiająca określenie potencjału analizowanego obszaru, wskazując np. wzrost lub spadek, właściwość i atrakcyjność rynku oraz jego trwałość, prowadzona w celu wspomagania procesu podejmowania decyzji, w tym decyzji inwestycyjnych
9.	Analiza SWOT	Kluczowe narzędzie analityczne wykorzystywane do kategoryzacji znaczących wewnętrznych i zewnętrznych czynników mogących wpłynąć pozytywnie lub negatywnie na prognozowane przyszłe zdarzenia; analiza SWOT (ang.: ***S****trengths* ***W****eaknesses* ***O****pportunities* ***T****hreats*) pozwala określić mocne i słabe strony przyszłych zdarzeń oraz szanse i zagrożenia płynące z otoczenia, mogące przyczynić się lub przeszkodzić w zaistnieniu określonych zjawisk

Lp.	Nazwa metody	Charakterystyka
10.	Definiowanie technologii krytycznych	Utworzenie listy technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów, w ramach poszczególnych obszarów analizy, rozumianych jako priorytetowe technologie o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w założonym horyzoncie czasowym 20 lat
	Metody pomocnicze	
11.	Panele eksperckie	Spotkania dyskusyjne ekspertów, organizowane w celu rozwiązania konkretnego problemu lub zespołu problemów, oparte na uczestnictwie i rozmowie w mniejszych lub większych grupach w zależności od tematyki i wagi rozpatrywanych zagadnień
12.	Burze mózgów	Spotkania dyskusyjne z udziałem moderatora, służące generowaniu nowatorskich rozwiązań problemów w odniesieniu do przyszłych zjawisk, kładące nacisk na redukcję uprzedzeń do generowania dziwnych i nietypowych pomysłów przyczyniające się do rozwoju kreatywności i nowatorstwa poglądów
13.	*Benchmarking*	Metoda porównywania do lidera, służąca wykorzystaniu dobrych, sprawdzonych, skutecznych rozwiązań zastosowanych z powodzeniem przez inne instytucje lub w innych obszarach tematycznych, do rozwiązania własnych problemów podobnego typu
14.	Analiza wielokryterialna	Metoda polegająca na przypisaniu uprzednio zidentyfikowanym istotnym czynnikom wartości punktowych według przyjętej skali, a następnie nadaniu im wag, odzwierciedlających ich znaczenie oraz przemnożeniu tych wartości; suma wskaźników wpływu poszczególnych czynników o określonych wartościach stanowi narzędzie analizy porównawczej i pozwala określić znaczenie danej technologii na tle innych poddanych analizie
15.	Symulacje i modelowanie komputerowe	Szybkie i efektywne metody, bazujące na komercyjnym i oryginalnym oprogramowaniu pozwalającym na odwzorowanie rzeczywistości i projekcję zdarzeń mogących nastąpić w przyszłości w kontekście kluczowych komponentów i zależności
16.	Analiza ekonometryczna	Odwzorowanie rzeczywistości ekonomicznej występującej w gospodarce, za pomocą modeli ekonometrycznych, przyjmujących jako dane wejściowe (objaśniające) informacje potencjalnie mogące wpływać na analizowane zjawisko, a jako dane wyjściowe (objaśniane) prognozę danego zjawiska w postaci konkretnych wartości liczbowych, bądź ogólnego trendu; działanie modelu ekonometrycznego polega na przetwarzaniu, zgodnie ze ściśle określonymi regułami matematycznymi i statystycznymi, danych objaśniających w dane objaśniane
17.	Metody statystyczne	Metody liczbowego ujęcia analizowanych zjawisk, generowanie wyników badań pośrednich i finalnych w postaci tabelarycznych i graficznych zestawień oraz formułowanie wniosków ogólnych na podstawie wyników badań przeprowadzonych na ograniczonej próbie

analizę wielokryterialną technologii, przyjmując za główne kryteria oceny potencjał stanowiący obiektywną wartość technologii i atrakcyjność odzwierciedlającą jej subiektywne postrzeganie wśród potencjalnych odbiorców. W zbiorze potencjalnych technologii

krytycznych znalazły się te technologie, które otrzymały nie mniej niż 50% maksymalnej wartości oceny.

Analiza strategiczna metodami zintegrowanymi, stanowiąca ostatni etap analizy stanu zagadnienia, obejmowała analizę STEEP zewnętrznych czynników makrootoczenia determinujących warunki funkcjonowania i rozwoju technologii (tabl. 5) oraz analizę SWOT, będącą uniwersalną metodą powszechnie stosowaną w naukach o organizacji i zarządzaniu, umożliwiającą kompleksową ocenę zjawisk z uwzględnieniem zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych pozytywnych i negatywnych czynników kluczowych.

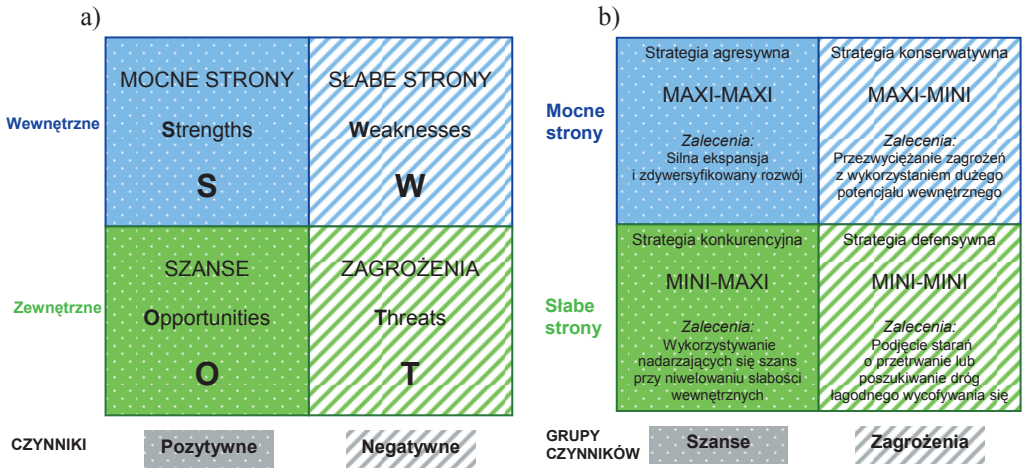
Zdefiniowane w ramach **analizy STEEP** kluczowe czynniki zewnętrzne z podziałem na pozytywne i negatywne, zwane odpowiednio szansami i zagrożeniami, zostały bezpośrednio zaimplementowane do dalszych badań prowadzonych z użyciem **analizy SWOT**, uwzględniającej ponadto wewnętrzne czynniki pozytywne (silne strony) i negatywne (słabe strony).

Tablica 5. *Charakterystyka czynników analizowanych w ramach analizy STEEP*

Symbol	Rodzaj makrootoczenia	Charakterystyka rodzajów makrootoczenia
S	Otoczenie społeczne	Otoczenie obejmuje strukturę demograficzną obywateli i czynniki kulturowe, w tym mody, style życia i upodobania społeczeństwa
T	Otoczenie technologiczne	Otoczenie dotyczy szybkości zmian technologicznych, możliwości innowacji, wielkości i dostępności krajowych i regionalnych budżetów na badania i rozwój, wzrastającej liczby przepisów prawa regulujących zmiany technologiczne, a także skupianie się na mniejszych usprawnieniach wprowadzanych na szeroką skalę kosztem znaczących wynalazków
E	Otoczenie ekonomiczne	Otoczenie jest zdeterminowane przez kondycję gospodarki i może być ocenione za pomocą stopy wzrostu ekonomicznego, wysokości stóp procentowych, kursów wymiany walut, poziomu inflacji, stopy spożycia, poziomu bezrobocia i wielkości długu publicznego
E	Otoczenie ekologiczne	Otoczenie kształtowane jest przez niedobór i wzrastające ceny tradycyjnych źródeł energii, coraz szersze wykorzystanie alternatywnych źródeł energii, zwłaszcza słonecznej i wiatrowej, wzrastający poziom zanieczyszczenia środowiska, efekt cieplarniany, lecz także rosnący poziom świadomości ekologicznej z uwzględnieniem troski o przyszłość kolejnych pokoleń
P	Otoczenie polityczne i prawne	Otoczenie obejmuje stabilność rządów w kraju, przejrzysty system podatkowy, poziom ceł oraz sytuację międzynarodową

W ten sposób w przypadku każdego z 14 obszarów tematycznych utworzono listę podzielonych na cztery grupy czynników o najistotniejszym znaczeniu i największym wpływie na rozwój analizowanych grup technologii, którym przypisano wagi odzwierciedlające ich znaczenie. Zbiór wszystkich czterech grup czynników poddanych badaniom w ramach analizy SWOT wraz z objaśnieniem angielskiego akronimu nazwy tej metody przedstawiono na rysunku 14a. Poszczególne potencjalne technologie krytyczne, zgrupowane w ramach 14 obszarów tematycznych, oceniono pod kątem zdefiniowanych uprzednio czynników kluczowych w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych. Z użyciem analizy wielokryterialnej każdej z grup technologii przyznano cztery oceny wyrażające liczbowo słabe i mocne strony technologii oraz szanse i zagrożenia, które niesie otoczenie. W zależności od przewagi silnych lub słabych stron oraz szans lub zagrożeń każdej analizowanej grupie technologii przypisano jedną z czterech ogólnych strategii postępowania, przedstawionych schematycznie na rysunku 14b.

Na podstawie wyników analizy metodami zintegrowanymi [76] wygenerowano ostateczną listę 140 grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów obejmującą po 10 technologii z każdego spośród 14 obszarów analizy, które zostały zakwalifikowane do dalszych szczegółowych badań w ramach trzech iteracji metodą e-Delphix. Syntetyczne wyniki badań wykonanych z użyciem metody e-Delphix, określające perspektywy rozwojowe krytycznych technologii inżynierii powierzchni materiałów, z uwzględnieniem ich pozycji



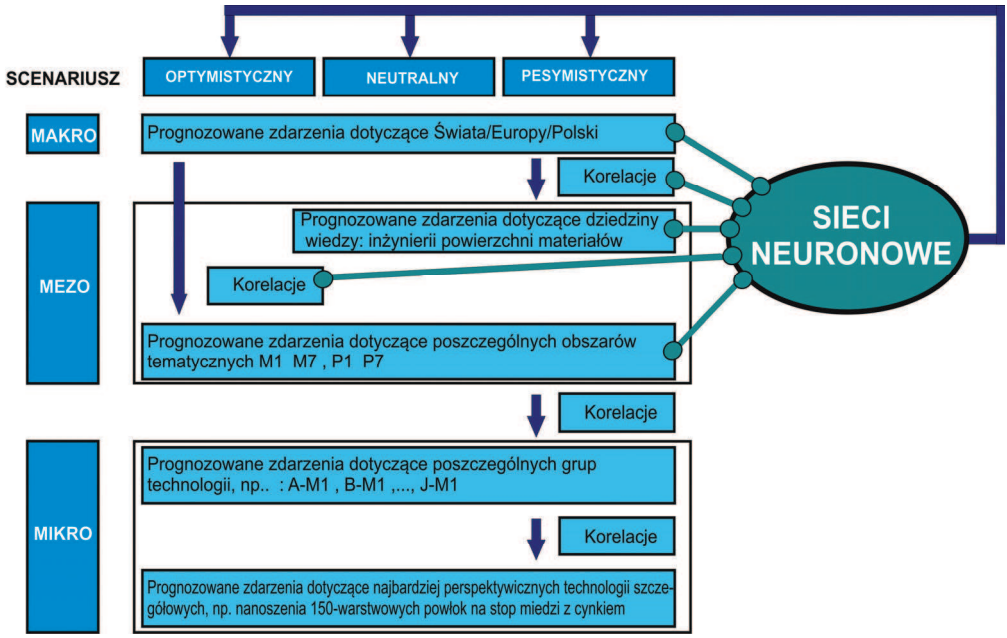
Rysunek 14. *Grupy czynników rozpatrywanych podczas analizy SWOT (a) i rekomendowane strategie postępowania w odniesieniu do badanych grup technologii (b) [161, 188, 301]*

strategicznej, prognozowanych trendów rozwojowych i rekomendowanych strategii postępowania przedstawiono w rozdziale 6 pracy. Ponadto wybrane wyniki tych badań stanowiły dane wejściowe do sieci neuronowych, co opisano w rozdziale 7 rozprawy.

3.5. Metodyka technologii informacyjnej

Technologia informacyjna wykorzystana do realizacji celów pracy obejmuje organizację wirtualną, platformę internetową i sztuczne sieci neuronowe. Zadania informatyczne zrealizowane w pracy w głównej mierze opierają się na oryginalnym systemie komputerowym utworzonym w środowisku programowania *Embarcadero C++ Builder XE2 Professional*, bazującym na platformie internetowej i organizacji wirtualnej, który został szczegółowo opisany w podrozdziale 4.3 niniejszej pracy. Do najważniejszych funkcji, które mogą być realizowane dzięki możliwościom technicznym, jakie stwarza utworzony system komputerowy, należy prowadzenie badań ankietowych *on-line* wraz z elastycznym modułem wprowadzania kolejnych kwestionariuszy ankietowych do systemu, generowanie wyników badań w postaci różnorodnych zestawień tabelarycznych, liczbowych i graficznych oraz tworzenie, modyfikowanie i zarządzanie bazą danych o ekspertach z uwzględnieniem elektronicznej korespondencji i rozliczeń finansowych. W przeprowadzonych badaniach w nowatorski i eksperymentalny sposób, nieopisany dotąd w literaturze krajowej i światowej w odniesieniu do zagadnień tej klasy, wykorzystano sztuczne sieci neuronowe do tworzenia alternatywnych scenariuszy przyszłych wydarzeń, zależnych od mezotrendów inżynierii powierzchni materiałów i rozwoju poszczególnych obszarów tematycznych, wyróżnionych w ramach inżynierii powierzchni materiałów (rys. 15).

Ogólna metodyka implementacji sieci neuronowych jest natomiast ogólnie znana i stosowana od wielu lat, również w obszarze inżynierii materiałowej do symulacji wybranych wielkości charakteryzujących własności materiałów inżynierskich na podstawie wyników badań rzeczywistych [90, 94, 308, 309]. Projekt sztucznych sieci neuronowych wykonano stosując komercyjne oprogramowanie *Statistica Neural Networks* w wersji 4.0*F*, co stanowiło niezwykle ważny, jednak zaledwie pierwszy krok do realizacji założonych celów informatycznych pracy. Do losowego poszukiwania rozwiązania suboptymalnego w wielotysięcznym lub nawet wielomilionowym zbiorze z użyciem metody Monte Carlo oraz interpretacji i graficznej prezentacji wyników przeprowadzonych badań wykorzystano



Rysunek 15. *Rodzaje kreowanych scenariuszy a sieci neuronowe [97]*

utworzone na te potrzeby oryginalne oprogramowanie SCENNET21 i SCENNET48. Oprogramowanie to, którego opis i funkcje użytkowe przedstawiono w podrozdziale 4.3 niniejszej rozprawy, wykorzystuje modele sztucznych sieci neuronowych dołączonych do niego jako funkcje.

Ogółem opracowano dziewięć modeli sztucznych sieci neuronowych, z których siedem wykorzystano do wygenerowania ostatecznych wyników badań, przyjmując jako zmienne zależne (wejściowe) pozyskane w procesie ankietyzacji ekspertów metodą e-Delphix prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego, ustabilizowanego i/lub spadkowego określonego dla kluczowych szesnastu mezoczynników, determinujących rozwój inżynierii powierzchni materiałów oraz dla poszczególnych obszarów tematycznych w ramach dwóch pól badawczych *M* (*Manufacturing*) i *P* (*Product*). Eksperci oceniali prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych scenariuszy dzieląc całkowitą jego wartość (100%) pomiędzy trzy możliwe warianty scenariuszy przyszłych wydarzeń. Zmienne zależne (wyjściowe) stanowią wartości prawdopodobieństwa wystąpienia każdego z trzech rozpatrywanych makroscenariuszy: optymistycznego, neutralnego i pesymistycznego [97]. Opracowany na podstawie wyników badań ankietowych zbiór danych wejściowych podzielono w sposób losowy na trzy podzbiory:

uczący, walidacyjny i testowy. Dane ze zbioru uczącego wykorzystano do modyfikacji wag sieci w procesie uczenia, a dane ze zbioru walidacyjnego – do oceny sieci w czasie procesu uczenia. Pozostałą część danych jako zbiór testowy przeznaczono do niezależnego określenia sprawności sieci po całkowitym zakończeniu procedury jej opracowywania. Jako podstawowe wskaźniki oceny jakości modelu wykorzystano następujące wielkości: średni błąd bezwzględny prognozy sieci, odchylenie standardowe błędu prognozy sieci, współczynnik korelacji *R* Pearsona, dotyczący wartości zadanej i wartości uzyskanej na wyjściu sieci neuronowej. W odniesieniu do każdego z wyodrębnionych zbiorów obliczono wskaźniki oceny jakości sztucznych sieci neuronowych. Podobne wartości błędu średniego, odchylenia standardowego błędu i współczynnika korelacji potwierdzają zdolność sieci do generalizacji, czyli umiejętności uogólnienia wiedzy zdobytej w procesie uczenia.

Sztuczne sieci neuronowe umożliwiają budowanie relacji między badanymi wielkościami bez definiowania matematycznego opisu analizowanego problemu. Podstawowe znaczenie ma przygotowanie reprezentatywnego zbioru danych doświadczalnych. Analizowane w procesie uczenia przypadki szczególne sieci neuronowej powinny równomiernie pokrywać całą dziedzinę aproksymowanej funkcji [310]. Ważnym zagadnieniem jest określenie zakresu zmienności analizowanych danych, co definiuje przestrzeń, w której model neuronowy może być stosowany. Ekstrapolacja poza zakres danych uczących może prowadzić do znacznych błędów predykcji. Występowanie w pewnych zakresach zmiennych wejściowych jedynie pojedynczych wartości nie pozwala na przyjęcie założenia, że opracowany model neuronowy będzie prawidłowo przewidywał wartość zmiennej zależnej w obszarze zdefiniowanym przez wartości minimalne i maksymalne poszczególnych zmiennych niezależnych. W związku z tym, podczas analizy wyników badań ankietowych zwrócono szczególną uwagę na dane nietypowe, rzadko występujące. Analizie poddano odpowiedzi ekspertów, które określały prawdopodobieństwo wystąpienia trendu wzrostowego, ustabilizowanego lub spadkowego w sposób wyraźnie odbiegający od informacji zawartych w pozostałych ankietach. Oceny dokonano na podstawie tabel liczności dotyczących zmiennych niezależnych. W odniesieniu do każdej zmiennej wejściowej obliczono 5 i 95 percentyl. Określono w ten sposób zakres zmiennych niezależnych, dla których może być stosowany model neuronowy. W przypadku każdego modelu analizowano kilkadziesiąt sieci neuronowych różnych rodzajów, obejmujących sieci regresyjne, o radialnych funkcjach bazowych, liniowe i perceptrony wielowarstwowe. Rodzaj sieci neuronowej jest zdefiniowany przez matematyczny

model neuronu, a także charakterystyczne rozmieszczenie neuronów w sieci oraz sposób połączeń między neuronami, o czym traktują publikacje [311-315]. Rozpatrywane sieci neuronowe różniły się ponadto strukturą, funkcjami błędu, aktywacji i potencjału postsynaptycznego (PSP), metodami i parametrami uczenia oraz metodami skalowania zmiennych. Informacje na temat sieci neuronowych, które charakteryzowały się najbardziej korzystnymi wartościami przyjętych do oceny wskaźników, zestawiono tabelarycznie. Przykład takiego zestawienia dotyczącego scenariusza optymistycznego, odnoszącego się do pola badawczego *M*, przedstawiono w tablicy 6.

Po zakończeniu etapu projektowania i numerycznej weryfikacji sztucznych sieci neuronowych, polegającej na obliczeniach dotyczących zbioru testowego, przeprowadzono symulacje

Tablica 6. *Charakterystyka sztucznych sieci neuronowych na przykładzie scenariusza optymistycznego dotyczącego pola badawczego (M)*

Oznaczenie sieci		**3.2M_1**	**3.2M_2**	**3.2M_3**	**3.2M_4**	**3.2M_5**
Rodzaj sieci/ liczba neuronów w warstwach: wejściowej-ukrytej-wyjściowej		MLP/ 21-2-1	MLP/ 21-4-1	MLP/ 21-5-1	MLP/ 21-9-1	**MLP/ 21-11-1**
Metoda uczenia/ liczba epok treningowych		BP/50, CG/116	BP/50, CG/188	BP/50, CG/67	BP/50, CG/199	**BP/50, CG/147**
Średni błąd bezwzględny, %	7,3	7,0	7,3	6,4	**6,3**	5,7
	6,1	6,3	6,0	5,5	**5,4**	5,2
	6,5	6,7	6,2	5,5	**5,5**	5,5
Odchylenie standardowe błędu, %	9,4	9,3	9,4	8,3	**8,1**	7,3
	8,0	8,0	7,7	6,8	**6,4**	8,0
	8,0	7,9	7,5	7,1	**6,7**	7,1
Współczynnik korelacji	0,56	0,59	0,56	0,68	**0,70**	0,74
	0,48	0,49	0,55	0,67	**0,70**	0,71
	0,65	0,66	0,70	0,74	**0,77**	0,78

Objaśnienia:
Liczba danych w zbiorach: uczącym/ walidacyjnym/ testowym: 161/ 35/ 35
Funkcja błędu: suma kwadratów
Funkcja aktywacji w warstwie: wejściowej/ ukrytej/ wyjściowej: liniowa z nasyceniem/ logistyczna/ liniowa z nasyceniem
Funkcja potencjału postsynaptycznego (PSP): liniowa
BP: Metoda wstecznej propagacji błędu
CG: Metoda gradientów sprzężonych

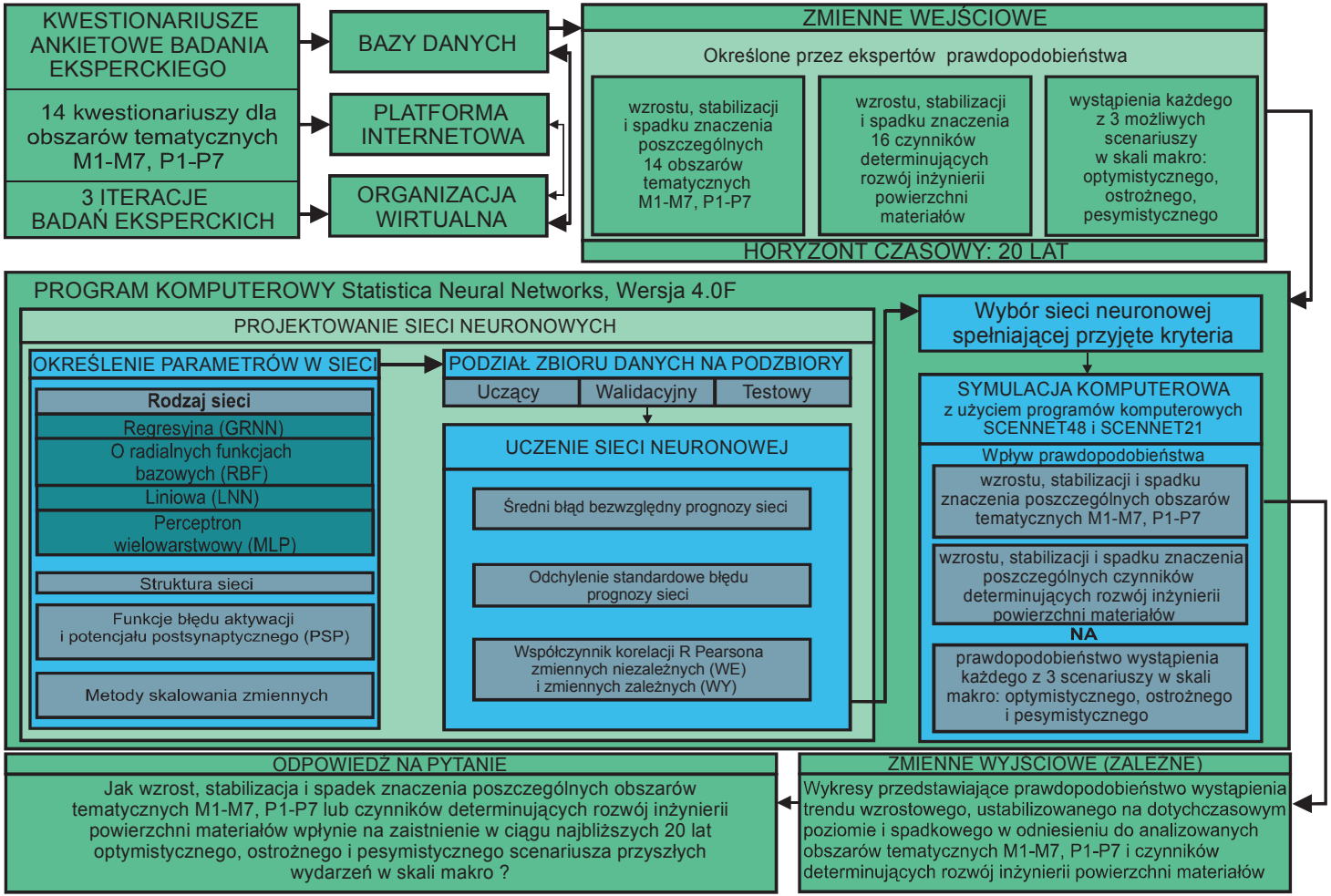
Sieć neuronowa wybrana do dalszej analizy

komputerowe w celu określenia wpływu prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych trendów, dotyczących dwóch obszarów tematycznych, na prognozowany makroscenariusz, przy założonych stałych wartościach trendów w pozostałych obszarach. Opracowane modele neuronowe zastosowano również do obliczenia wartości zmiennych niezależnych, dla których każdy z rozpatrywanych makroscenariuszy powinien przyjąć założoną wartość. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na szczegółową analizę jednostkowych przypadków, natomiast do wyciągnięcia wniosków ogólnych konieczne stało się zaprojektowanie oryginalnego oprogramowania SCENNET21 i SCENNET48, do którego jako funkcje dołączono opracowane uprzednio modele sztucznych sieci neuronowych. Z powodu braku modelu matematycznego opisującego badany proces oraz ze względu na stosunkowo dużą przestrzeń potencjalnych rozwiązań zdecydowano, że odpowiednim podejściem do rozwiązania analizowanego problemu będzie działanie losowe. Zgodnie z definicją ogólną dowolne techniki, w których do rozwiązania problemu wykorzystuje się zmienne losowe, są nazywane metodami Monte Carlo [316]. Rozpatrując zagadnienie bardziej szczegółowo, nazwą Monte Carlo często określa się grupę metod, które wykazują następujące wspólne cechy: analizują określoną i skończoną przestrzeń rozważań, losowo wyznaczają punkty z obszaru danych wejściowych i w przypadku każdego z nich, w wyniku jednoznacznych procedur obliczeniowych, uzyskują wyniki cząstkowe, a także określają wynik ostateczny poprzez agregację wyników cząstkowych [317]. Przyjęty sposób obliczeń wartości zmiennych niezależnych, dla których każdy z rozpatrywanych makroscenariuszy powinien przyjąć założoną wartość, ma wymienione cechy, zatem należy stwierdzić, że w celu rozwiązania problemu badawczego zastosowano metody Monte Carlo. Próbkowanie losowe przestrzeni, w wielu przypadkach, zwiększa szansę na uzyskanie rozwiązania suboptymalnego, które z punktu widzenia użytkownika systemu jest wynikiem wystarczającym. Wraz ze wzrostem liczby prób rośnie prawdopodobieństwo wyznaczenia wektora zmiennych wyjściowych[2)], w przypadku których badane zagadnienie przyjmuje wartości zbliżone do optymalnych, natomiast po przekroczeniu wartości krytycznej kolejne iteracje stają się bezzasadne, bo czas ich wykonania wzrasta wykładniczo, minimalnie wpływając na poprawę otrzymanych wyników końcowych. Charakterystykę poszczególnych rodzajów sieci neuronowych zastosowanych w procesie projektowania i metod Monte Carlo zaprezentowano w tablicy 7.

[2)] Wektor w przestrzeni *n*-wymiarowej łączący początek układu współrzędnych z punktem, mający wartość, kierunek i zwrot.

Tablica 7. *Metodyka technologii informacyjnej zastosowana w toku realizacji prac badawczych*

Lp.	Charakterystyka metody	Charakterystyczne parametry/ cechy		
	Sieci neuronowe	Parametry optymalizowane w procesie projektowania		
		Metoda uczenia	Funkcja aktywacji	Funkcja PSP/ Funkcja błędu
1.	Regresyjne sieci neuronowe (ang.: *General Regression Neural Network* – GRNN) są zbudowane z czterech warstw: wejściowej, radialnej, regresyjnej oraz wyjściowej. Neurony radialne o liczbie równej liczbie wzorców przedstawiają centra skupień występujące w zbiorze uczącym. Neurony liniowe składające się na warstwę regresyjną o liczbie równej liczbie wyjść sieci obliczają warunkową regresję w przypadku każdej zmiennej wyjściowej, a dodatkowy pojedynczy neuron oblicza gęstość prawdopodobieństwa [315, 318]. Każdy z neuronów warstwy wyjściowej wyznacza iloraz regresji warunkowej obliczony dla neuronu warstwy poprzedniej i gęstości prawdopodobieństwa	próbkowanie	wykładnicza, liniowa z nasyceniem	ilorazowa, radialna, liniowa/ suma kwadratów
2.	Sieci neuronowe o radialnych funkcjach bazowych (ang.: *Radial Base Functions* – RBF) zbudowane są z trzech warstw: wejściowej, ukrytej z neuronami radialnymi oraz wyjściowej złożonej z neuronów o charakterystykach liniowych	*k*-średnich, *k*-najbliższych sąsiadów, pseudoinwersja	liniowa, liniowa z nasyceniem, wykładnicza	liniowa, radialna/ suma kwadratów
3.	Sieci neuronowe liniowe (ang.: *Linear Neural Networks* – LNN) mają tylko dwie warstwy: wejściową i wyjściową. Informacje są przetwarzane tylko w warstwie wyjściowej. Warstwa wyjściowa ma liniową funkcję PSP oraz liniową funkcję aktywacji	pseudoinwersja	liniowa	liniowa/ suma kwadratów
4.	Perceptrony wielowarstwowe (ang.: *Multilayer Perceptron* – MLP) są rodzajem sieci neuronowych, wykorzystujących liniową funkcję potencjału postsynaptycznego i zwykle nieliniową funkcję aktywacji. Podstawowe znaczenie w projektowaniu struktury perceptronów wielowarstwowych ma określenie liczby warstw ukrytych i liczby neuronów w tych warstwach [309, 319]	wsteczna propagacja błędu, gradienty sprzężone, quasi-Newton, Levenberg-Marquardt, szybka propagacja, delta-bar-delta	logistyczna, liniowa z nasyceniem, hiperboliczna	liniowa/ suma kwadratów
	Metody Monte Carlo	Cechy charakterystyczne		
1.	Metody Monte Carlo polegają na wielokrotnym próbkowaniu losowym przestrzeni w celu uzyskania rozwiązania suboptymalnego wykorzystywanym w modelowaniu procesów złożonych, dla których rozwiązanie analityczne jest trudne lub niemożliwe do uzyskania	Analiza określonej i skończonej przestrzeni rozważań; losowe wyznaczanie punktów z obszaru danych wejściowych i uzyskiwanie wyników cząstkowych dla każdego z nich w wyniku jednoznacznych procedur obliczeniowych; określenie wyniku ostatecznego poprzez agregację wyników cząstkowych [317]		

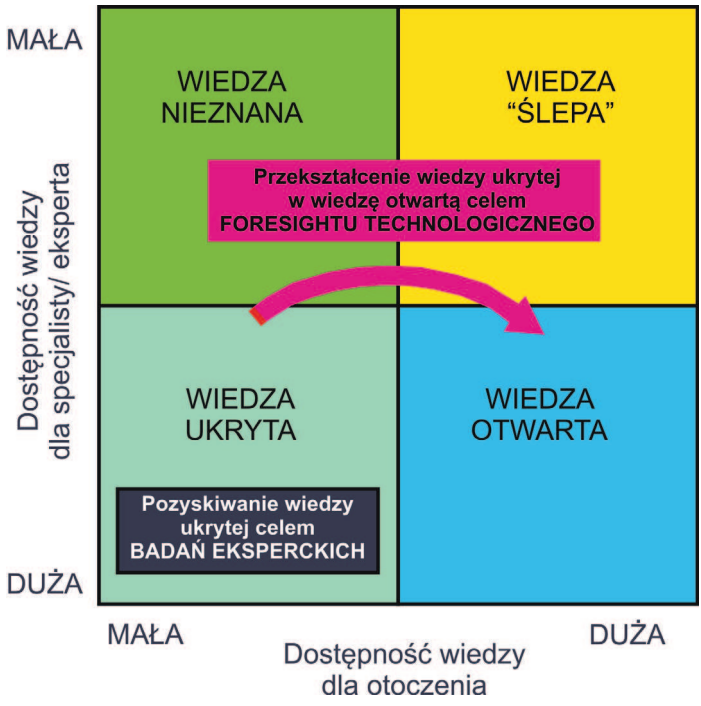


Rysunek 16. *Etapy implementacji sieci neuronowych w badaniach e-foresightowych [97]*

Etapy implementacji sieci neuronowych w badaniach e-foresightowych przedstawiono graficznie na rysunku 16. Charakterystykę autorskiego oprogramowania – dedykowanego losowemu poszukiwaniu rozwiązania suboptymalnego, interpretacji i generowaniu wyników badań w postaci graficznej – stanowiącego rozszerzenie i uzupełnienie modeli sztucznych sieci neuronowych – przedstawiono w podrozdziale 4.3, a końcowe wyniki przeprowadzonych badań – w rozdziale 7. niniejszej rozprawy.

4. Oryginalne metody i narzędzia analityczne składające się na metodologię komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów

Opisana w rozdziale 3 rozprawy interdyscyplinarna metodyka badań własnych wykonanych w obszarze inżynierii materiałowej (podrozdział 3.3), foresightu technologicznego (podrozdział 3.4) i technologii informacyjnej (podrozdział 3.5) tworzy zbiór oryginalnie zestawionych metod, stosowanych w poszczególnych wymienionych obszarach wiedzy, których użycie było celowe i konieczne dla osiągnięcia pośrednich wyników badań materiałoznawczych, eksperckich i informatycznych, stanowiących pierwotne dane źródłowe wykorzystane na dalszych etapach badań, wykonanych z użyciem oryginalnej koncepcji metodologicznej, której opracowanie, weryfikacja doświadczalna i udostępnienie decyduje o wartości naukowej niniejszej pracy**.** Koncepcja ta pozwala przekształcić z natury rzeczy trudno mierzalną ukrytą wiedzę ekspercką w wiedzę jawną dostępną otoczeniu (rys. 17), wyrażoną ilościowo z użyciem inżynierskich narzędzi analitycznych.

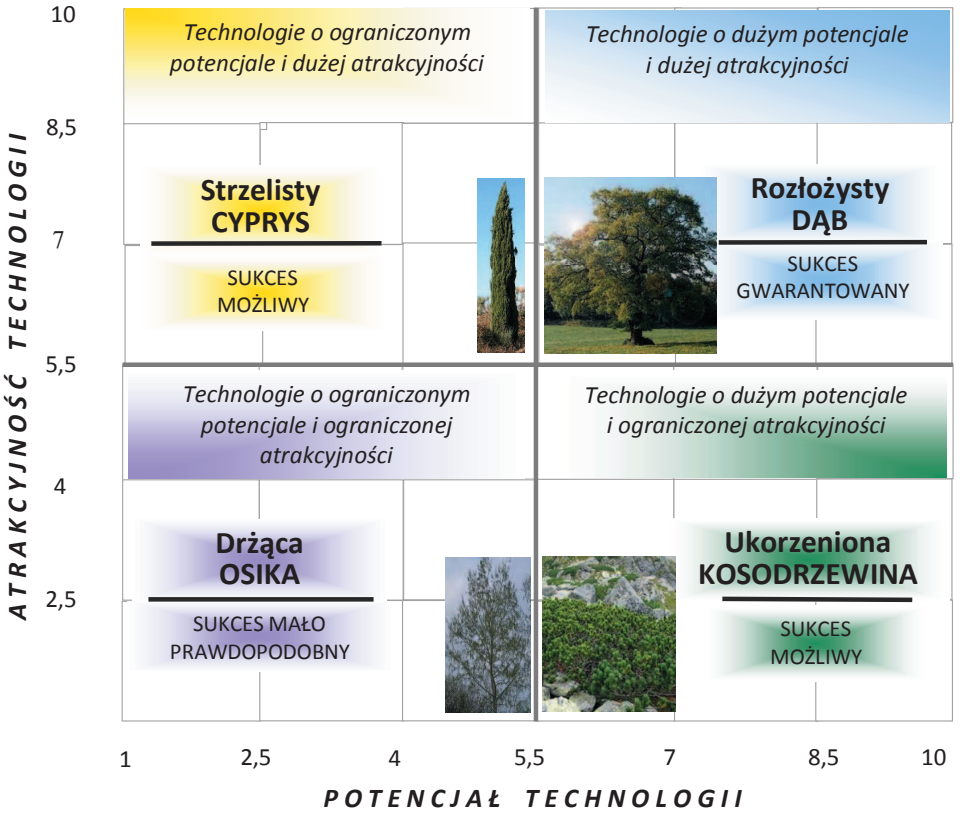


Rysunek 17. *Macierz dostępności wiedzy*

4.1. Macierze kontekstowe

W celu przeprowadzenia badań materiałoznawczo-heurystycznych należy w pierwszej kolejności wyodrębnić spośród analizowanych technologii klika homogenicznych grup, aby poddać je planowanym badaniom o charakterze eksperymentalno-porównawczym. Do określenia zobiektywizowanych wartości poszczególnych wyodrębnionych technologii lub ich grup zastosowano dendrologiczną macierz wartości technologii, a do określenia intensywności pozytywnego i negatywnego oddziaływania mikro- i makrootoczenia na dane technologie – meteorologiczną macierz oddziaływania otoczenia. Konstrukcja metodologiczna obu tych macierzy odwołuje się do znanych powszechnie w naukach o zarządzaniu metod portfelowych [303-306], służących charakterystyce portfela produktów oferowanych klientowi przez przedsiębiorstwo, pozwalających na graficzną prezentację wyników analizy porównawczej przeprowadzonej na podstawie dwóch kryteriów/ czynników umieszczonych odpowiednio na poziomej i pionowej osi macierzy. Najsłynniejsza tego rodzaju macierz *Boston Consulting Group* – BCG [307] zawdzięcza swoją niebywałą popularność odwołaniu do prostych skojarzeń i intuicyjnego wnioskowania, co stało się inspiracją podczas tworzenia założeń metodologicznych macierzy dendrologicznej i meteorologicznej. Do oceny poszczególnych grup technologii, pod kątem ich wartości i siły oddziaływania otoczenia, użyto jednobiegunowej skali dodatniej bez zera, zwanej uniwersalną skalą stanów względnych, gdzie 1 jest oceną minimalną, a 10 – wybitnie wysoką, fazy cyklu życia określono natomiast zgodnie z kompatybilną z nią, dziesięciopunktową skalą oceny fazy cyklu życia technologii, co szerzej opisano i przedstawiono graficznie w podrozdziale 3.2 niniejszej pracy.

Dendrologiczna macierz wartości technologii (rys. 18) przedstawia graficznie wyniki oceny poszczególnych grup technologii pod kątem ich potencjału, stanowiącego rzeczywistą obiektywną wartość danej technologii i atrakcyjności, odzwierciedlającej subiektywne postrzeganie danej technologii wśród jej potencjalnych użytkowników. Potencjał danej grupy technologii, wyrażony za pomocą dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, naniesiony na oś poziomą macierzy dendrologicznej jest wynikiem analizy wielokryterialnej przeprowadzonej na podstawie oceny eksperckiej, uwzględniającej w odpowiednich proporcjach potencjał: kreacyjny, aplikacyjny, jakościowy, rozwojowy i techniczny. Na oś pionową macierzy dendrologicznej został natomiast naniesiony poziom atrakcyjności danej grupy technologii, będący średnią ważoną oceny eksperckiej dokonanej na podstawie kryteriów

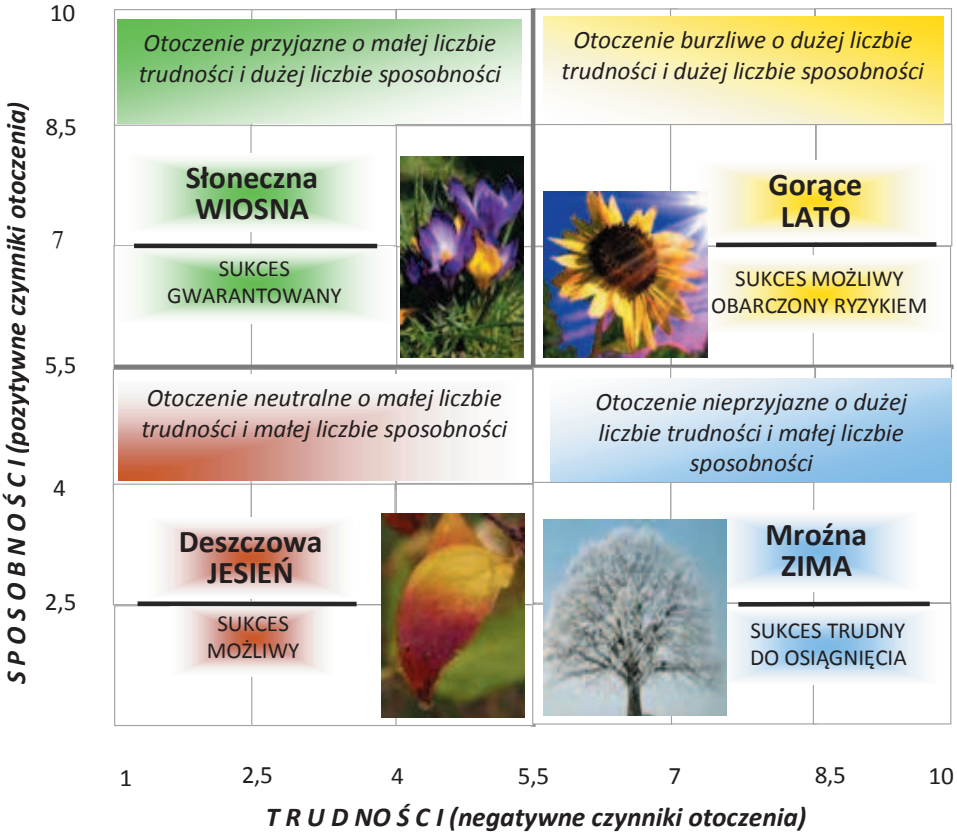


Rysunek 18. *Dendrologiczna macierz wartości technologii; prezentacja podejścia [181, 184, 185]*

szczegółowych odpowiadających atrakcyjności gospodarczej, ekonomicznej, humanistycznej, przyrodniczej i systemowej. W zależności od wartości potencjału i poziomu atrakcyjności, które określono w ramach oceny eksperckiej, każdą z analizowanych technologii umieszczono w jednej z ćwiartek macierzy.

W dendrologicznej macierzy wartości technologii wyróżniono następujące ćwiartki:

- **Drżąca osika** jest technologią słabą o ograniczonym potencjale, zawierającym się w przedziale ⟨1; 5,5⟩ oraz ograniczonej atrakcyjności z przedziału ⟨1; 5,5⟩, której przyszły sukces jest mało prawdopodobny.
- **Strzelisty cyprys** oznacza technologię o ograniczonym potencjale z przedziału ⟨1; 5,5⟩, lecz dużej atrakcyjności, zawierającej się w przedziale (5,5; 10⟩, przez co sukces danej technologii jest możliwy.



Rysunek 19. *Meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia; prezentacja podejścia [181, 184, 185]*

- **Ukorzeniona kosodrzewina** odpowiada technologii o ograniczonej atrakcyjności z przedziału ⟨1; 5,5⟩, lecz dużym potencjale, zawierającym się w przedziale (5,5; 10⟩, dzięki czemu jej przyszły sukces jest wysoce prawdopodobny.
- **Rozłożysty dąb** oznacza najlepszą możliwą sytuację, w której analizowana technologia charakteryzuje się zarówno dużym potencjałem zawartym w przedziale (5,5; 10⟩, jak i dużą atrakcyjnością z przedziału (5,5; 10⟩, który to mariaż stanowi gwarant przyszłego sukcesu.

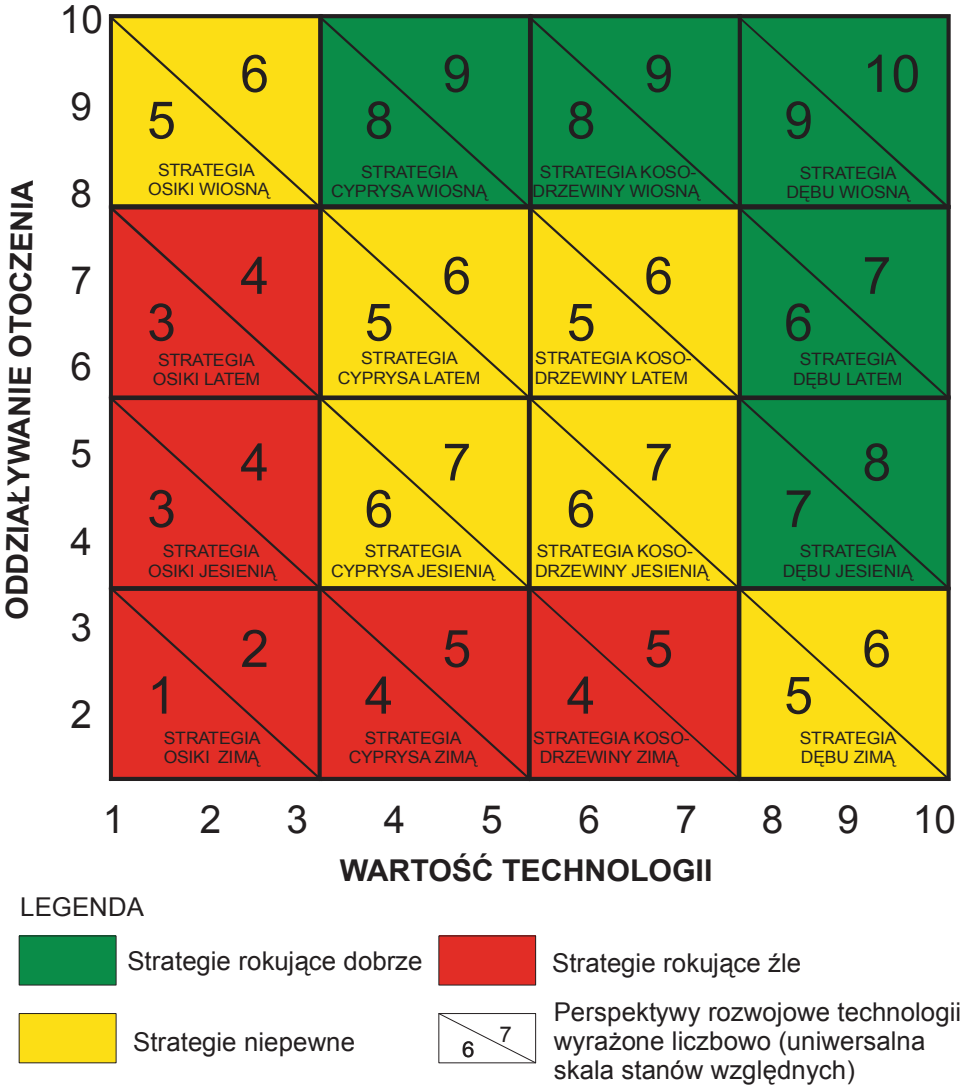
Meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia (rys. 19) przedstawia graficznie wyniki oceny wpływu czynników zewnętrznych na poszczególne grupy technologii, które zostały podzielone na trudności oddziałujące negatywnie i sposobności wpływające pozytywnie na analizowane technologie. Badanie opinii ekspertów na temat pozytywnych i negatywnych czynników oddziałujących na dane technologie odbyło się z wykorzystaniem

kwestionariusza ankietowego złożonego z kilkudziesięciu pytań dotyczących mikro- i makro-otoczenia, z podziałem na otoczenie społeczne, technologiczne, ekonomiczne, ekologiczne oraz polityczne i prawne, w ściśle określonych proporcjach. Trudności zewnętrzne wyrażone z wykorzystaniem dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, będące wynikiem analizy wielokryterialnej przeprowadzonej na podstawie oceny eksperckiej, zostały naniesione na oś poziomą macierzy meteorologicznej. Na oś pionową tej macierzy naniesiono natomiast sposobności, czyli pozytywne czynniki oddziaływania otoczenia, będące średnią ważoną oceny eksperckiej dokonanej na podstawie kryteriów szczegółowych. W zależności od określonego, w ramach oceny eksperckiej w dziesięciopunktowej skali, poziomu oddziaływania pozytywnych i negatywnych czynników otoczenia na analizowane technologie, każdą z nich umieszczono w jednej z ćwiartek macierzy.

W meteorologicznej macierzy wartości technologii wyróżniono następujące ćwiartki:

- **Mroźna zima** odpowiada najgorszej możliwej sytuacji, w której otoczenie sprawia dużą liczbę trudności, zawierających się w przedziale (5,5; 10⟩ i niewielką liczbę sposobności z przedziału ⟨1; 5,5⟩, co powoduje, że sukces w danym otoczeniu jest trudny bądź niemożliwy do osiągnięcia.
- **Upalne lato** odzwierciedla sytuację, w której otoczenie niesie dużo sposobności, zawierających się w przedziale (5,5; 10⟩, lecz towarzyszy im także dużo trudności z przedziału (5,5; 10⟩, co powoduje, że sukces technologii w danych warunkach jest możliwy, lecz obarczony ryzykiem.
- **Deszczowa jesień** obrazuje sytuację neutralną, w której na daną technologię nie czyhają pułapki, co odpowiada przedziałowi ⟨1; 5,5⟩, lecz także otoczenie nie stwarza zbyt wielu sposobności, co odpowiada przedziałowi ⟨1; 5,5⟩.
- **Słoneczna wiosna** jest najlepszym z możliwych wariantów, ponieważ oznacza otoczenie przyjazne o dużej liczbie sposobności z przedziału (5,5; 10⟩ i małej liczbie trudności, zawierających się w przedziale ⟨1; 5,5⟩, co powoduje, że sukces danej technologii w tak dobrych warunkach jest gwarantowany.

Na kolejnym etapie prac badawczych wyniki badań przedstawione w postaci graficznej za pomocą dentrologicznej macierzy wartości technologii i meteorologicznej macierzy oddziaływania otoczenia zostały naniesione na **macierz strategii dla technologii** [184]. Macierz ta składa się z szesnastu pól odpowiadających poszczególnym wariantom, wynikającym



Rysunek 20. *Ogólna postać macierzy strategii dla technologii [95]*

z kompletu kombinacji czterech rodzajów technologii z czterema rodzajami otoczenia. Macierz strategii dla technologii w postaci ogólnej (rys. 20) przedstawia graficznie miejsce technologii, z uwzględnieniem jej wartości i siły oddziaływania otoczenia wyrażonych w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych oraz wskazuje strategię postępowania, jaką powinno się przyjąć w odniesieniu do danej technologii, wziąwszy pod uwagę analizowane wcześniej czynniki. Macierz strategii dla technologii w postaci szczegółowej przedstawiona

na rysunku 21 zawiera w poszczególnych polach krótki opis postępowania zalecanego w przypadku, gdy dana technologia o określonej wartości znajdzie się w otoczeniu charakteryzującym się określonymi sposobnościami i trudnościami.

W celu umożliwienia przeniesienia konkretnych wartości liczbowych z czteropolowych macierzy dendrologicznej i meteorologicznej do szesnastopolowej macierzy strategii dla technologii sformułowano zależności matematyczne, pozwalające na przeskalowanie i zobiektywizowanie wyników badań, a na ich podstawie opracowano program komputerowy umożliwiający szybkie obliczenie szukanych wartości i wygenerowanie macierzy strategii dla technologii w formie graficznej. Wprowadzono zatem pojęcia: względnej wartości technologii V_n i względnej wartości oddziaływania otoczenia E_n. Z wykorzystaniem zależności matematycznych, które w uogólnionej uproszczonej wersji wyraża układ równań (1) [184], możliwe staje się dokonanie obliczeń szczegółowych i ich wizualizacji z zastosowaniem macierzy strategii dla technologii (rys. 20 i 21).

$$\begin{cases} V_n^{'} = c + \left(\dfrac{d-c}{b-a}\right)(V_n - a) \\ E_n^{'} = c + \left(\dfrac{d-c}{b-a}\right)(E_n - a) \end{cases} \tag{1}$$

gdzie:

a – wartość minimalna w macierzy dendrologicznej i meteorologicznej,

b – wartość maksymalna w macierzy dendrologicznej i meteorologicznej,

c – wartość minimalna w macierzy strategii dla technologii,

d – wartość maksymalna w macierzy strategii dla technologii,

$V_n^{'}$ – względna wartość technologii w macierzy strategii dla technologii,

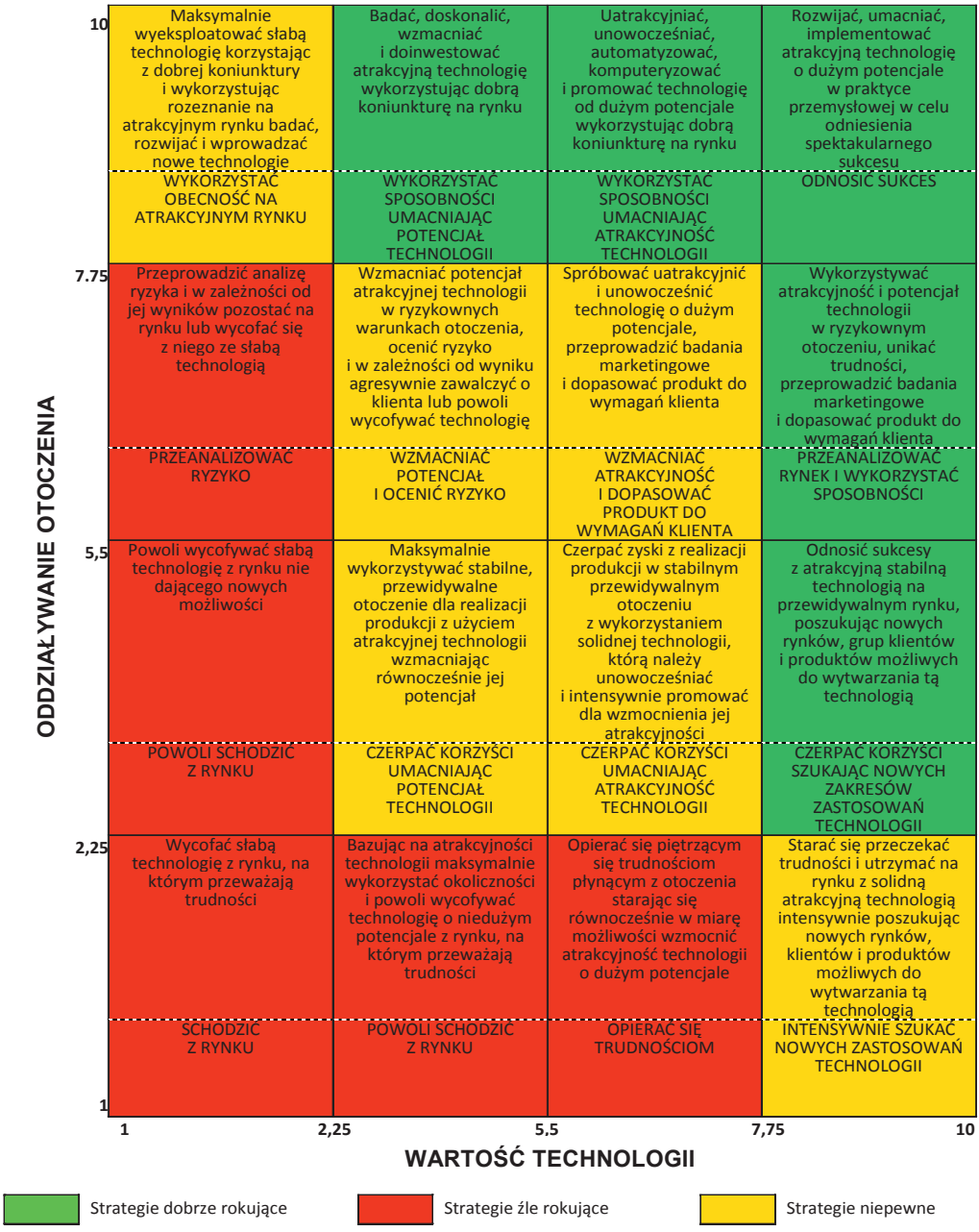
V_n – względna wartość technologii w macierzy dendrologicznej i meteorologicznej,

$E_n^{'}$ – względna wartość oddziaływania otoczenia w macierzy strategii dla technologii,

E_n – względna wartość oddziaływania otoczenia w macierzy dendrologicznej i meteorologicznej,

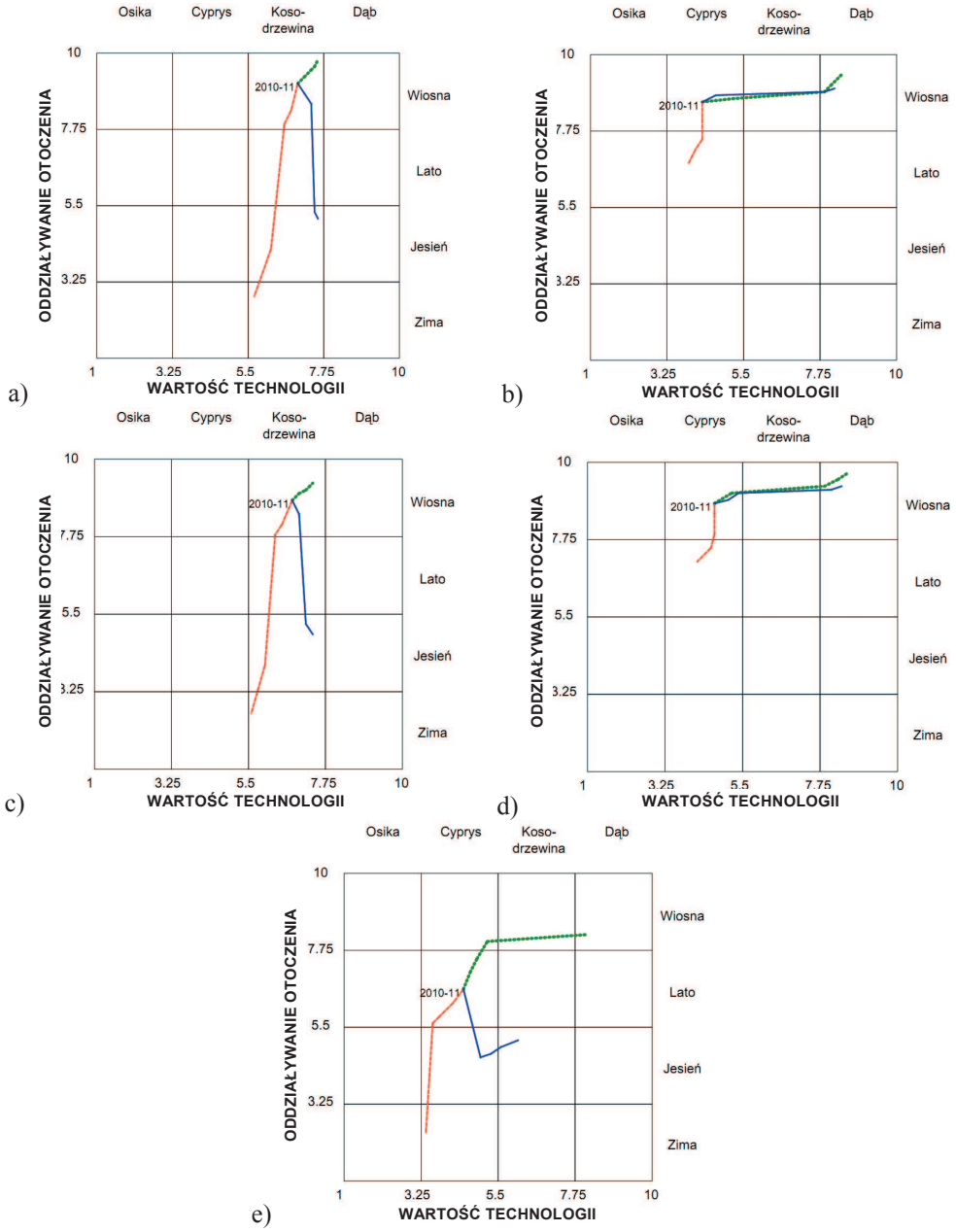
n – symbol alfanumeryczny danej technologii/ grupy technologii, $n \in \{A, B, \ldots, Z.\}$.

Współrzędne punktów odzwierciedlających ocenę ekspercką wartości technologii naniesione na macierz dendrologiczną oznaczono górnym indeksem *d*, punktów odpowiadających intensywności oddziaływania otoczenia naniesionych na macierz meteorologiczną górnym indeksem *m*, natomiast punkty naniesione na macierz strategii dla technologii, określające



Rysunek 21. *Szczegółowa postać macierzy strategii dla technologii [184]*

pozycje strategiczne poszczególnych technologii, mają górny indeks *s*. Dolne indeksy punktów informują, do jakiej grupy technologii szczegółowych (*S*1-*S*8) lub obszaru tematycznego



Rysunek 22. *Ścieżki rozwoju strategicznego dotyczące (a) wyładowań koronowych oraz obróbki: (b) plazmą niskotemperaturową przez generator znajdujący się poza strefą modyfikowania, (c) plazmą niskotemperaturową w warunkach obniżonego ciśnienia, (d) światłem laserowym, (e) wysokoenergetycznym promieniowaniem jonowym [98]*

(*M*1-*M*7, *P*1-*P*7) należy analizowana technologia lub grupa technologii. Wprowadzenie indeksów pozwala na zbiorcze zestawienie wyników badań i analizę porównawczą wszystkich technologii, niezależnie do jakiej grupy czy obszaru zostały one pierwotnie zakwalifikowane.

Ścieżki rozwoju strategicznego stanowią wielowariantową prognozę rozwoju poszczególnych technologii lub ich grup, w odniesieniu do interwałów czasowych odpowiadających sytuacji kolejno w latach: 2015, 2020, 2025 i 2030. Ścieżki rozwoju strategicznego, naniesione na macierz strategii dla technologii, prezentują optymistyczny, neutralny i pesymistyczny wariant wydarzeń, zależny zarówno od czynników wewnętrznych, uwzględniających potencjał stanowiący obiektywną wartość technologii i atrakcyjność, będącą odzwierciedleniem subiektywnego jej postrzegania przez potencjalnych użytkowników, jak i czynników zewnętrznych (pozytywnych i negatywnych), płynących z otoczenia. Przykładowe ścieżki rozwoju strategicznego sporządzone dla wybranych technologii modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich przedstawiono na rysunku 22.

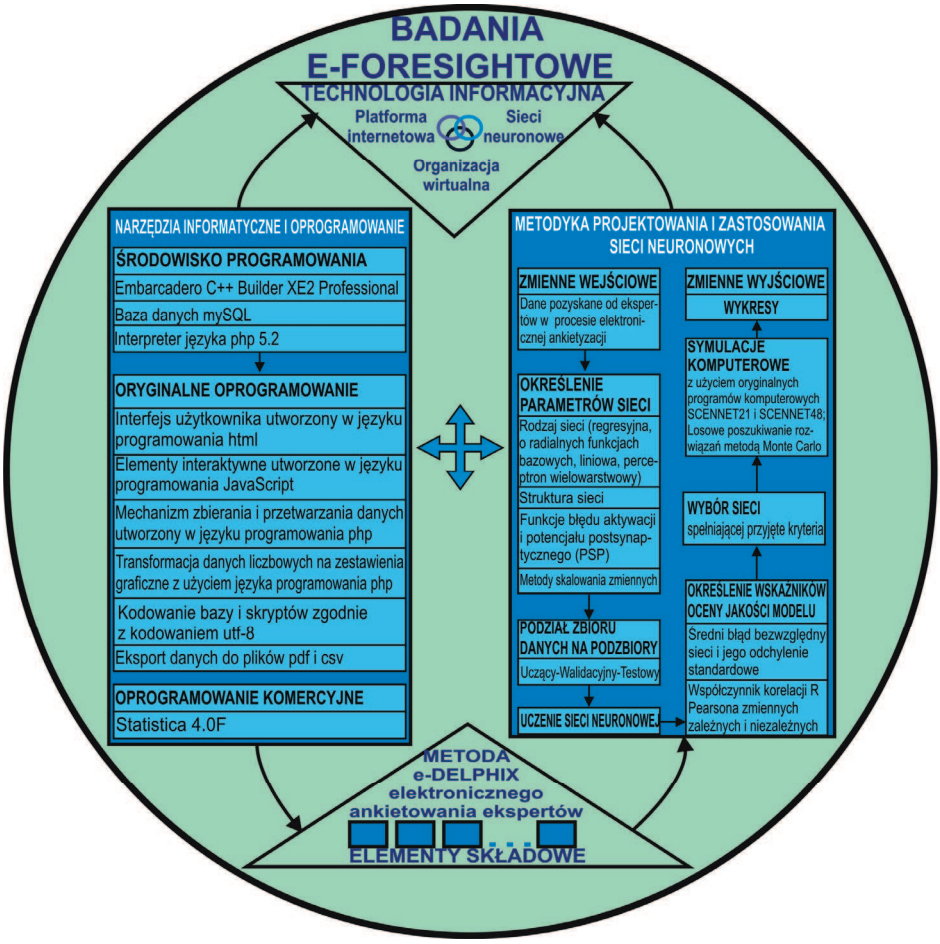
4.2. E-foresight i metoda e-Delphix

E-foresight (ang.: *electronic foresight***)** jest procesem badań foresightowych, prowadzonych w celu określenia priorytetowych innowacyjnych technologii oraz kierunków rozwoju strategicznego w odniesieniu do danego obszaru badawczego, z wykorzystaniem Internetu. Wprowadzona przez Autorkę niniejszej pracy koncepcja e-foresightu [180], nawiązująca do znanych już i powszechnie używanych pojęć: e-zarządzanie, e-biznes, e-handel, e-bankowość, e-logistyka, e-usługi, e-administracja, e-edukacja [160, 320, 321], powstała podczas praktycznej realizacji badań foresightowych dotyczących inżynierii powierzchni materiałów, jako efekt naukowych poszukiwań służących uporządkowaniu, usprawnieniu i unowocześnieniu procesu prowadzonych badań foresightowych. Głównym motorem wprowadzania usprawnień była szeroka skala zaplanowanych do realizacji badań obejmujących trzy iteracje badań eksperckich, prowadzonych równolegle w odniesieniu do 14 obszarów tematycznych na różnych poziomach szczegółowości (mikro, mezo i makro) z udziałem blisko 400 ekspertów, którzy wypełnili ogółem ok. 800 wielopytaniowych kwestionariuszy ankietowych [159]. Pojawiła się zatem uzasadniona konieczność opracowania technologii informacyjnej, wspomagającej realizację tak skomplikowanych wielotorowych i wielopoziomowych badań.

Realizacja **badań e-foresightowych** wymagała utworzenia oryginalnego systemu komputerowego, który bazuje na platformie internetowej i organizacji wirtualnej, umożliwiając przede wszystkim prowadzenie badań ankietowych *on-line* z użyciem metody e-Delphix wraz z elastycznym modułem wprowadzania kolejnych kwestionariuszy ankietowych do systemu, lecz także generowanie wyników badań w postaci różnorodnych zestawień tabelarycznych, liczbowych i graficznych oraz tworzenie, modyfikowanie i zarządzanie bazą danych o ekspertach z uwzględnieniem elektronicznej korespondencji i rozliczeń finansowych.

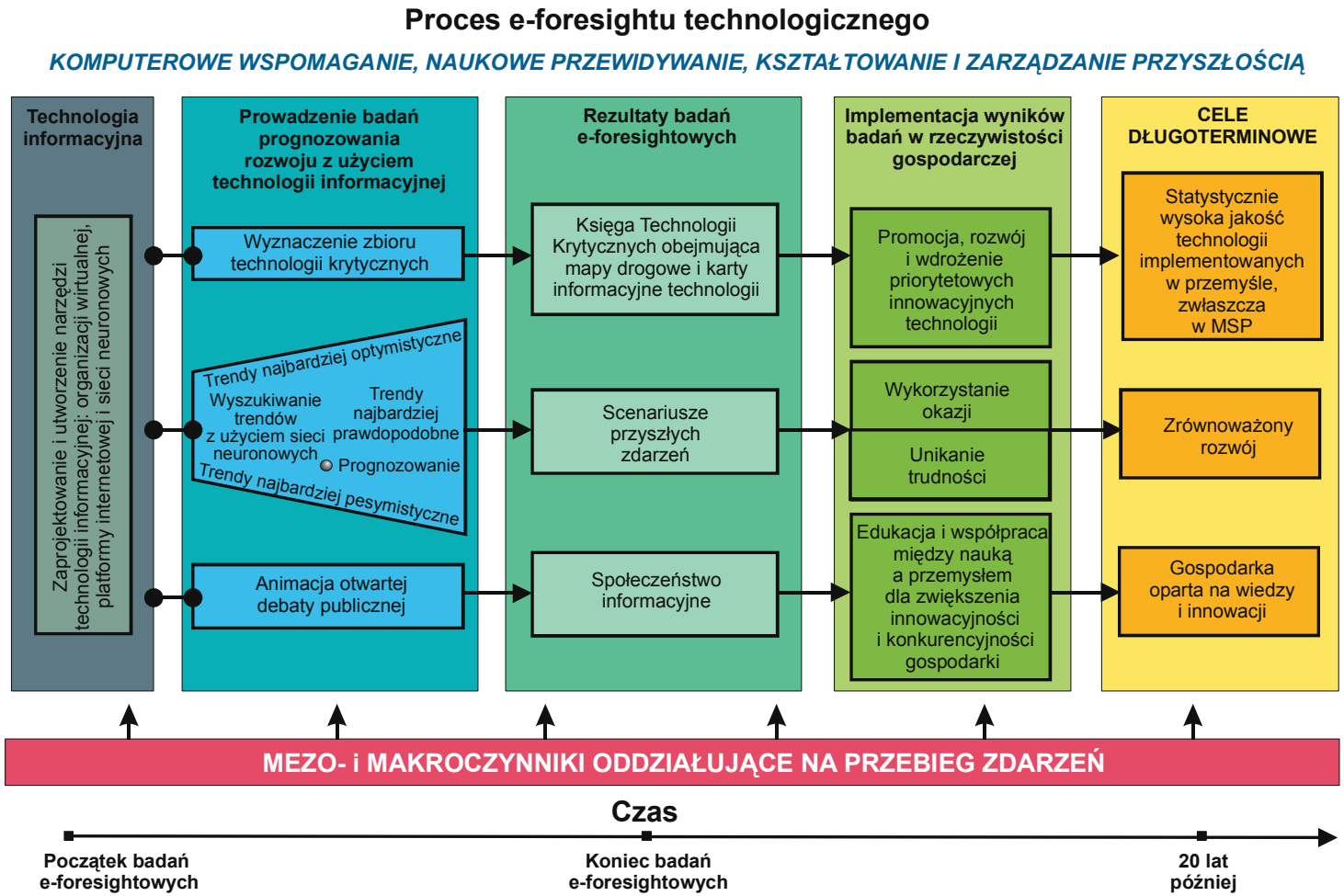
W celu określenia, w jaki sposób prawdopodobieństwo zajścia poszczególnych alternatywnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń jest zależne od trendów rozwojowych poszczególnych obszarów tematycznych i kluczowych mezoczynników inżynierii powierzchni materiałów, utworzono dwa programy komputerowe odpowiednio SCENNET21 i SCENNET48, do których jako funkcje dołączono sztuczne sieci neuronowe, zaprojektowane z użyciem komercyjnego oprogramowania *Statistica* 4.0*F*. Wyniki badań eksperckich przeprowadzonych metodą e-Delphix stanowiły dane wejściowe do sieci, podzielone na zbiory: testowy, walidacyjny i uczący. Utworzone programy komputerowe umożliwiły losowe poszukiwanie rozwiązania suboptymalnego z użyciem metody Monte Carlo, interpretację wyników badań i ich graficzną prezentację w postaci wykresów. Prezentowane podejście wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe do kreowania alternatywnych scenariuszy wydarzeń jest nowatorskie i eksperymentalne, nieopisane jak dotąd w literaturze przedmiotu. Schemat wykonanych badań e-foresightowych z uwzględnieniem zastosowanej technologii informacyjnej, narzędzi informatycznych i oprogramowania, metody e-Delphix oraz metodyki projektowania i zastosowania w badaniach sieci neuronowych przedstawiono na rysunku 23.

Proces e-foresightu, z uwzględnieniem: technologii informacyjnej, stanowiącej podstawę techniczną konieczną do realizacji właściwych badań; rodzajów działań służących realizacji badań prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów; oczekiwanych rezultatów badań i sposobów ich implementacji w rzeczywistości gospodarczej oraz wytyczonych celów strategicznych przedstawiono na rysunku 24. Należy również zwrócić uwagę na rozmieszczenie wymienionych elementów na skali czasu oraz na nieustanne oddziaływanie czynników o charakterze mezo- i makroekonomicznym na przebieg wydarzeń. E-foresight ukierunkowany jest na wspomaganie działalności dwóch grup beneficjentów. Pierwszą grupę stanowi zespół wykonawców badań e-foresightowych, którzy mogą pracować w dowolnym czasie i miejscu, co w połączeniu z *teleworkingiem* przyczynia się do wyrównania szans na rynku pracy,



Rysunek 23. *Schemat badań e-foresightowych*

umożliwiając powoływanie w skład zespołu badawczego osób pracujących w domu, w tym matek wychowujących małe dzieci i osób niepełnosprawnych, co występowało w toku badań. Drugą grupą beneficjentów są eksperci branżowi, bezpośredni uczestnicy prowadzonych badań ankietowych, wyłonieni ze środowiska naukowego, biznesowego i administracji publicznej, którzy zgodnie z najnowocześniejszymi światowymi trendami mogą uczestniczyć w badaniach ankietowych w najbardziej dogodnym dla siebie czasie i miejscu, co przyczynia się do szybszego, sprawniejszego, bardziej efektywnego pozyskania wyników badań pośrednich i końcowych. Dodatkową korzyścią jest wyeliminowanie niepożądanego zjawiska psychospołecznego, nazwanego przez Autorkę niniejszej pracy *efektem szpanera*, polegającego na tym, że ludzie podczas bezpośredniego spotkania, z założenia służącego wymianie poglądów



Rysunek 24. *Proces e-foresightu [161, 180]*

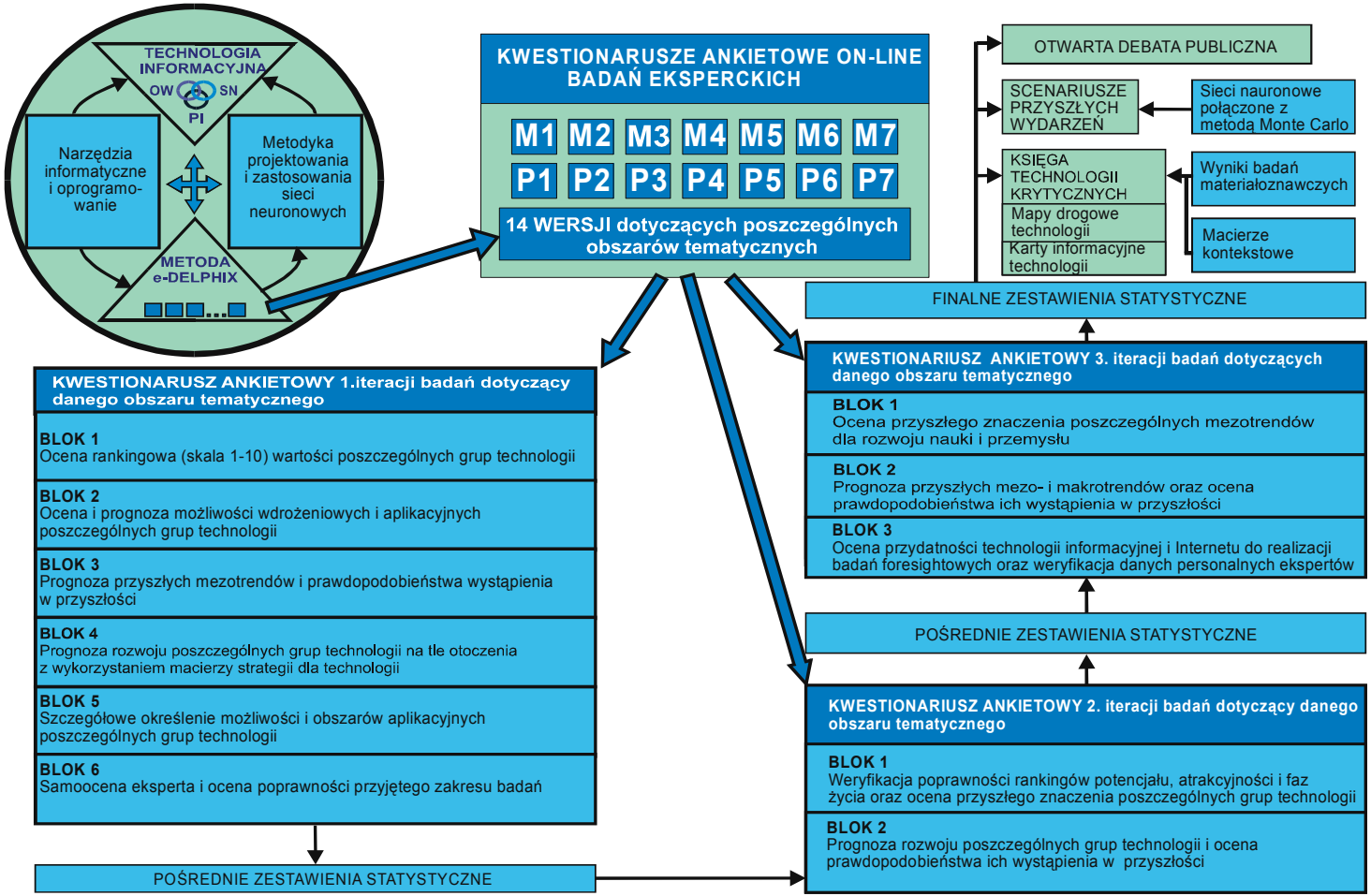
merytorycznych, są głównie ukierunkowani na jak najlepsze zaprezentowanie siebie i wylansowanie własnej osoby, zamiast faktycznego podzielenia się posiadaną wiedzą.

Jednym z najważniejszych celów, dla których utworzono organizację wirtualną i platformę internetową, było zapewnienie możliwości elektronicznej ankietyzacji ekspertów z użyciem **metody e-Delphix** zapożyczającej główny zamysł kilkuetapowego ankietowania ekspertów z klasycznej metody delfickiej [162-168], będącej heurystyczną metodą jakościową [322, 323]. Metoda e-Delphix znacznie jednak odbiegła od pierwowzoru, zarówno co do założeń metodycznych, jak i ze względu na towarzyszącą jej rozbudowaną technologię informacyjną. Nadrzędnym celem badań wykonanych z użyciem metody e-Delphix było pozyskanie od ankietowanych ekspertów ukrytej wiedzy, z natury rzeczy trudno mierzalnej, i przekształcenie jej w wiedzę jawną, z użyciem dedykowanych temu zadaniu narzędzi analitycznych i metod ilościowych. Zadaniu temu służyło zastosowanie do oceny czynników i zjawisk, w ramach prowadzonych badań ankietowych, dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, gdzie 1 oznacza minimalną ocenę lub poziom zgodności, natomiast 10 – wybitnie wysoką ocenę lub poziom zgodności z cechą/ zjawiskiem/ czynnikiem/ stwierdzeniem. Z kolei do oceny faz cyklu życia wykorzystano kompatybilną z poprzednią, dziesięciostopniową skalę oceny cyklu życia technologii, gdzie 1 to technologia schyłkowa, a 10 to technologia embrionalna, co szerzej opisano w rozdziale 3.2. niniejszej pracy. Określone przez ekspertów prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń w przyszłości również zostało wyrażone ilościowo z użyciem wartości procentowych. Pozyskane drogą badań ankietowych wyrażone liczbowo dane pierwotne stanowiły podstawę dalszych analiz, realizowanych z użyciem metod ilościowych, wspartych jedynie analizą jakościową.

Trudność metodologiczną stanowił fakt, że zagadnienia analizowane w ramach prowadzonych badań charakteryzują się różnym stopniem szczegółowości (mikro, mezo, makro), stąd pojawiła się konieczność systemowego ich uporządkowania, również z uwzględnieniem kolejności pytań zadawanych ekspertom w następujących po sobie iteracjach badań. Po rozważeniu alternatywnych wariantów przyjęto koncepcję wzrastającego poziomu ogólności pytań w kolejnych iteracjach badań eksperckich, co pozwoliło ekspertom wywodzącym się ze środowisk inżynierskich na zapoznanie się z nowym podejściem metodologicznym na poziomie mikro, najbliższym ich codziennej praktyce zawodowej, ułatwiając przeprowadzenie dalszych badań, dotyczących zagadnień bardziej ogólnych o charakterze ekonomiczno-technicznym, zasadniczo trudniejszych do analizy w środowisku inżynierskim.

Wykonanie badań ankietowych metodą e-Delphix (rys. 25) wymagało opracowania założeń koncepcyjnych, utworzenia w programie Word i wprowadzenia do systemu komputerowego w języku programowania *php* i *JavaScript* wielopytaniowych kwestionariuszy ankietowych w 14 wersjach odpowiadających poszczególnym obszarom tematycznym, co samo w sobie stanowiło poważne wyzwanie merytoryczno-organizacyjne. W pracach tych uczestniczył kilkudziesięcioosobowy zespół pracowników, w tym eksperci wiodący, eksperci kluczowi, pracownicy techniczni, a z głosem konsultacyjno-doradczym także – Członkowie Międzynarodowego Komitetu Monitorującego [159]. Cykl działań został powtórzony trzykrotnie w odniesieniu do kolejnych iteracji badań. Materiałami bazowymi służącymi opracowaniu kwestionariuszy ankietowych pierwszej iteracji badań eksperckich były wyniki przeprowadzonej uprzednio, z użyciem metodyki badań heurystycznych, analizy istniejącej sytuacji obejmującej ocenę stanu zagadnienia, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi. Kwestionariusze ankietowe drugiej i trzeciej iteracji badań opracowano wykorzystując wyniki pośrednie, otrzymane na podstawie realizacji iteracji poprzedzającej, z użyciem pomocniczych metod obejmujących panele eksperckie, burze mózgów, *benchmarking*, analizę wielokryterialną, symulacje i modelowanie komputerowe oraz analizy ekonometryczne i statystyczne.

Każdy z kwestionariuszy ankietowych dotyczących danego obszaru tematycznego został podzielny na kilka bloków, różniących się typem zadawanych pytań i udzielanych odpowiedzi. Wśród pytań zadawanych ekspertom można wyróżnić [324-327]: niesprofilowane pytania otwarte, pozostawiające respondentowi pełną dowolność udzielania jakościowej odpowiedzi, oraz pytania zamknięte, wymagające odpowiedzi ilościowej z użyciem *skali Likerta*, dającej możliwość określenia stopnia akceptacji danego stwierdzenia, *skali ważności* szeregującej czynniki, *skali ocen* wartościującej czynniki i *rankingu* pozycjonującego czynniki w danym zbiorze. Wśród pytań zadawanych ekspertom były także pytania sprawdzające, mające na celu ocenę wiarygodności respondentów. W kolejnych iteracjach malała liczba otwartych pytań jakościowych na rzecz pytań ilościowych, wymagających udzielania wyrażonych liczbowo odpowiedzi, w celu wykorzystania ich, jako danych pierwotnych, do utworzenia macierzy koncepcyjnych, map i kart informacyjnych technologii oraz zbioru testowego, walidacyjnego i uczącego sztucznych sieci neuronowych, stanowiących podstawę późniejszego kreowania alternatywnych scenariuszy przyszłych wydarzeń dotyczących inżynierii powierzchni materiałów.

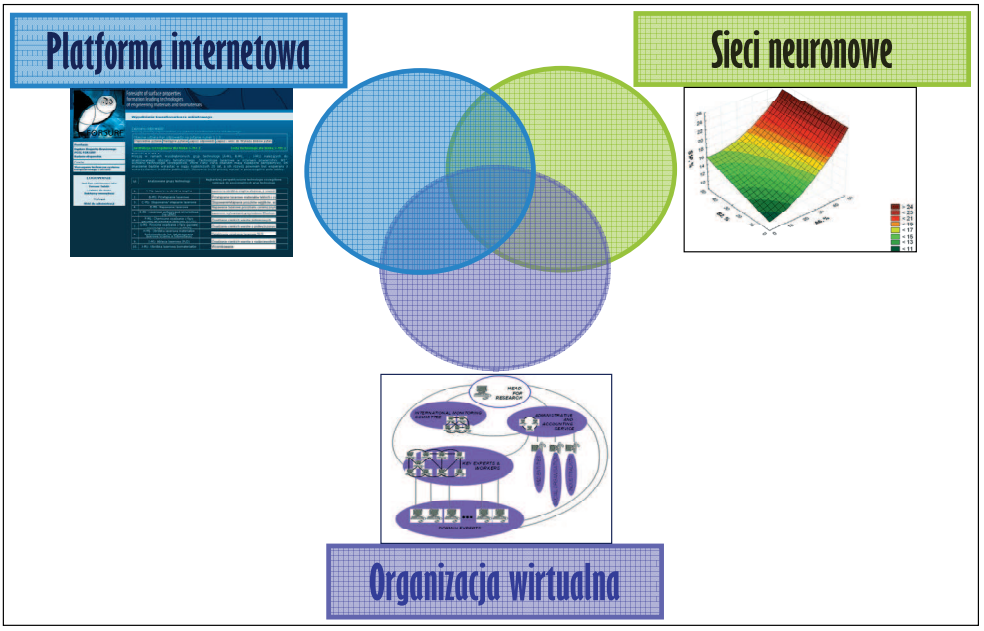


Rysunek 25. *Schemat implementacji metody e-Delphix [161, 175]; OW – organizacja wirtualna, SN –sieci neuronowe, PI – platforma internetowa*

4.3. Oryginalna technologia informacyjna

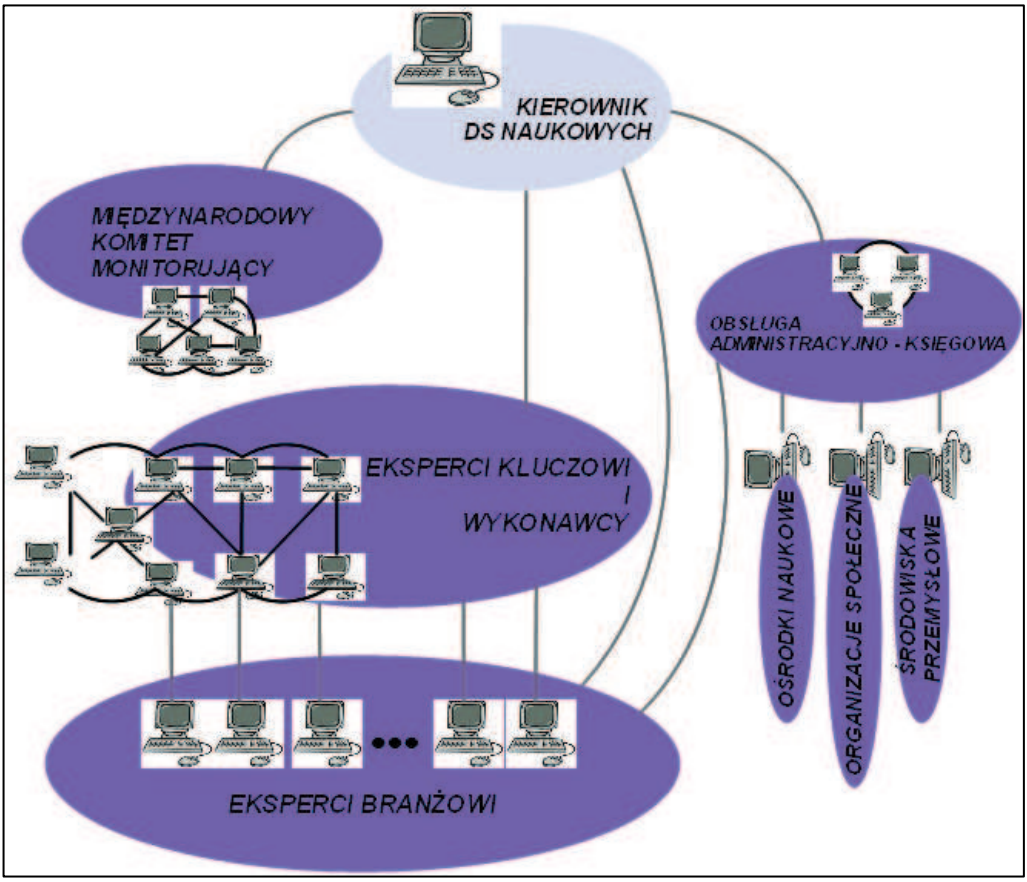
Na utworzoną od podstaw, według autorskiej koncepcji, technologię informacyjną składają się trzy narzędzia analityczne: organizacja wirtualna, platforma internetowa i sztuczne sieci neuronowe (rys. 26).

Organizacja wirtualna do zarządzania zintegrowanymi badaniami foresightowymi (ang.: *Virtual Organisation for Foresight Integrated Research Management* – VO FIRM) wpisuje się w nurt strukturalny, odzwierciedlający jedno z dwóch alternatywnych podejść spotykanych w literaturze przedmiotu. Mimo iż wprowadzone dwadzieścia lat temu przez W. Dawidowa i M. Maleone'a [328] pojęcie organizacji wirtualnej przez lata ulegało różnorakim modyfikacjom, udoskonaleniom i rozwinięciom, do chwili obecnej nie wprowadzono jednej powszechnie akceptowalnej podstawy pojęciowej [329]. Podejście procesowe przedstawia organizację wirtualną w ujęciu czynnościowym, jako mechanizm działania, obszar działalności lub sposób zarządzania organizacją, koncentrując się na działaniach i zachowaniach [330-331]. Znacznie częściej reprezentowane podejście strukturalne, przyjęte w realizowanych badaniach, dotyczy elementów składowych organizacji, ich właściwości i zależności między nimi [332-334].



Rysunek 26. *Technologia informacyjna wspomagania realizacji badań e-foresightowych*

Organizacja wirtualna VO FIRM stanowi utworzony na zasadzie dobrowolności, działający dynamicznie i elastycznie ustrukturalizowany, układ elementów o charakterze zadaniowym, zorientowany na ustalone cele, koordynowany za pomocą technologii informacyjnej, umożliwiający zbieranie, porządkowanie, selekcjonowanie, rozprzestrzenianie oraz zarządzanie wiedzą jawną i ukrytą w cyberprzestrzeni. Opisywana organizacja wirtualna została powołana do realizacji długoterminowego celu ogólnospołecznego, jakim jest zacieśnienie związków pomiędzy nauką a gospodarką i rozwój społeczeństwa informacyjnego, co pociąga za sobą wzmocnienie znaczenia gospodarki opartej na wiedzy i innowacji oraz przyspieszenie zrównoważonego rozwoju i statystycznego wzrostu jakości technologii, implementowanych w przemyśle. W praktyce, organizacja wirtualna, której schemat organizacyjny zaprezentowano na rysunku 27, umożliwiła przeprowadzenie od strony formalno-organizacyjnej e-foresightu



Rysunek 27. *Schemat organizacyjny VO FIRM [180]*

technologicznego inżynierii powierzchni materiałów, pozwalając na zarządzanie w cyberprzestrzeni bazami danych, obejmującymi zgromadzoną w procesie ankietyzacji wiedzę pozyskaną od ekspertów, zestawione w różnoraki sposób wyniki badań eksperckich oraz personalia ekspertów wraz z elektroniczną korespondencją i rozliczeniami finansowymi.

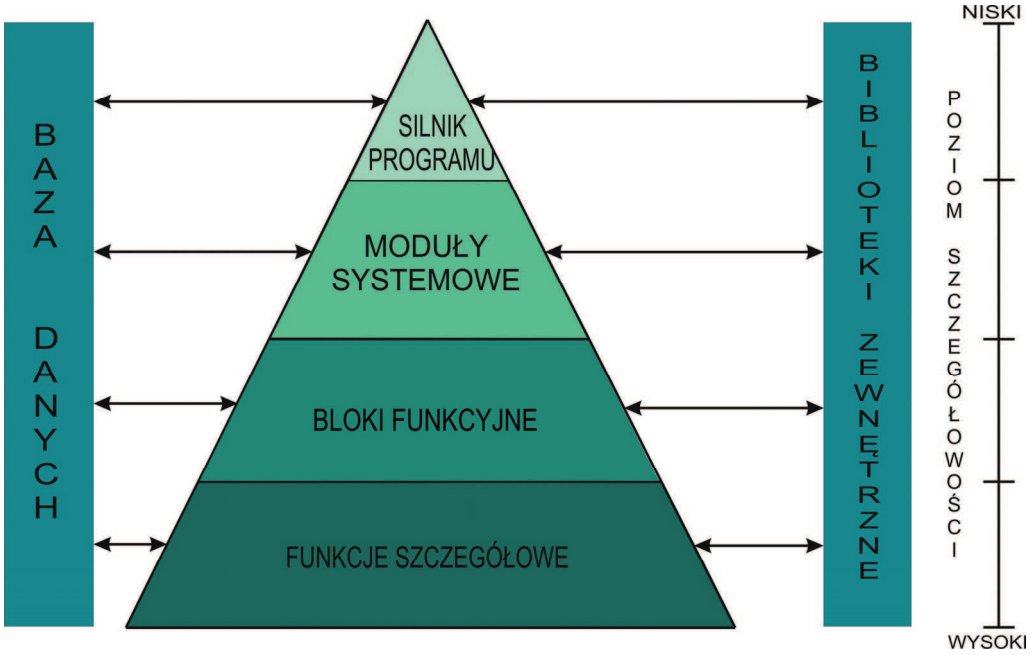
Zarządzanie w cyberprzestrzeni organizacją wirtualną stało się możliwe dzięki utworzonej od podstaw w środowisku programowania *Embarcadero C++ Builder XE2 Professional*, bazującej na autorskiej koncepcji, **platformie internetowej** zarządzania zintegrowanymi badaniami foresightowymi (ang.: *Web Platform for Foresight Integrated Research Management* – WP FIRM), będącej systemem komputerowym o strukturze hierarchicznej (rys. 28). Poszczególne elementy składowe odzwierciedlające realizowane funkcje użytkowe nowo utworzonej platformy przedstawiono na rysunku 29. Każdy z kilkudziesięciu zaprezentowanych modułów składowych wymagał zastosowania opracowanego odrębnie indywidualnego algorytmu, którego przykład odnoszący się do modułu „Analiza danych" przedstawiono na rysunku 30.

Przyjęte założenia koncepcyjne definiują następujące poziomy dostępności zasobów platformy internetowej WB FIRM dla jej użytkowników:

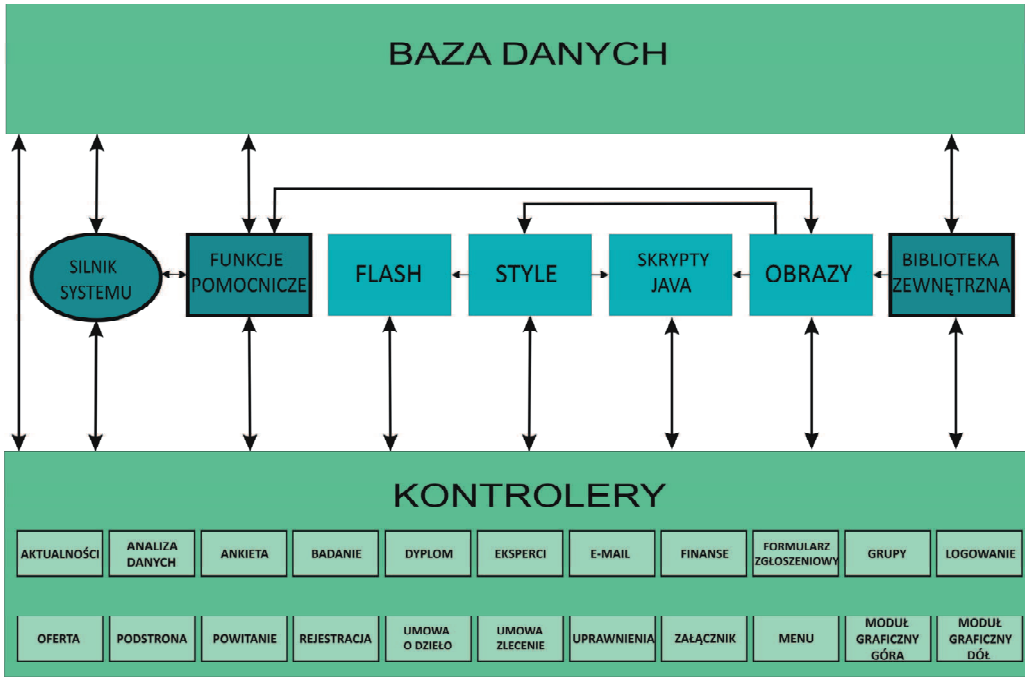
1. Poziom ogólny jest zapewniony przez stronę internetową dostępną bez ograniczeń dla każdego użytkownika Internetu.
2. Poziom ekspercki, umożliwiający ograniczonej liczbie powołanych ekspertów branżowych wypełnianie *on-line* kwestionariuszy ankietowych, po zalogowaniu z użyciem przydzielonego uprzednio przez administratora systemu *loginu* i hasła.
3. Poziom zarządczo-administracyjny, dający sposobność wąskiej grupie, tzn. Autorce i upoważnionemu przez nią personelowi administracyjno-technicznemu, po zalogowaniu z różnym poziomem uprawnień, generowanie kwestionariuszy ankietowych, tworzenie nowych i modyfikowanie istniejących baz danych, podgląd *on-line* postępu prac eksperckich, prowadzenie korespondencji wieloseryjnej i indywidualnej oraz dokonywanie rozliczeń finansowych wraz z generowaniem towarzyszącej im dokumentacji systemowej.

Szczegółową listę funkcji platformy internetowej WB FIRM, możliwych do realizacji w cyberprzestrzeni, z uwzględnieniem różnych poziomów dostępności użytkowników do jej zasobów, przedstawiono w tablicy 8.

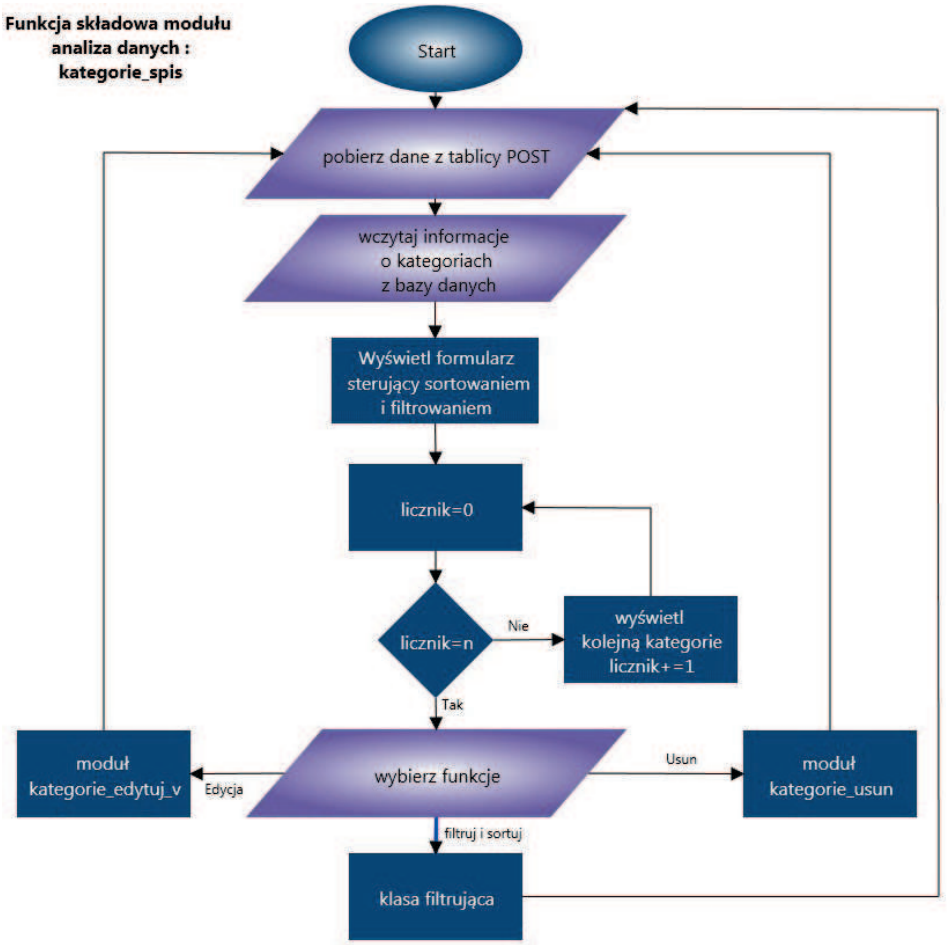
Utylitarne cele utworzonej platformy internetowej WB FIRM obejmują zapewnienie warunków pracy ekspertom kluczowym i branżowym, umożliwienie warunków realizacji



Rysunek 28. *Struktura hierarchiczna platformy internetowej WB FIRM*



Rysunek 29. *Elementy składowe platformy internetowej WB FIRM*



Rysunek 30. *Przykładowy algorytm funkcjonowania wybranego modułu platformy internetowej WB FIRM dotyczący „Analizy danych”*

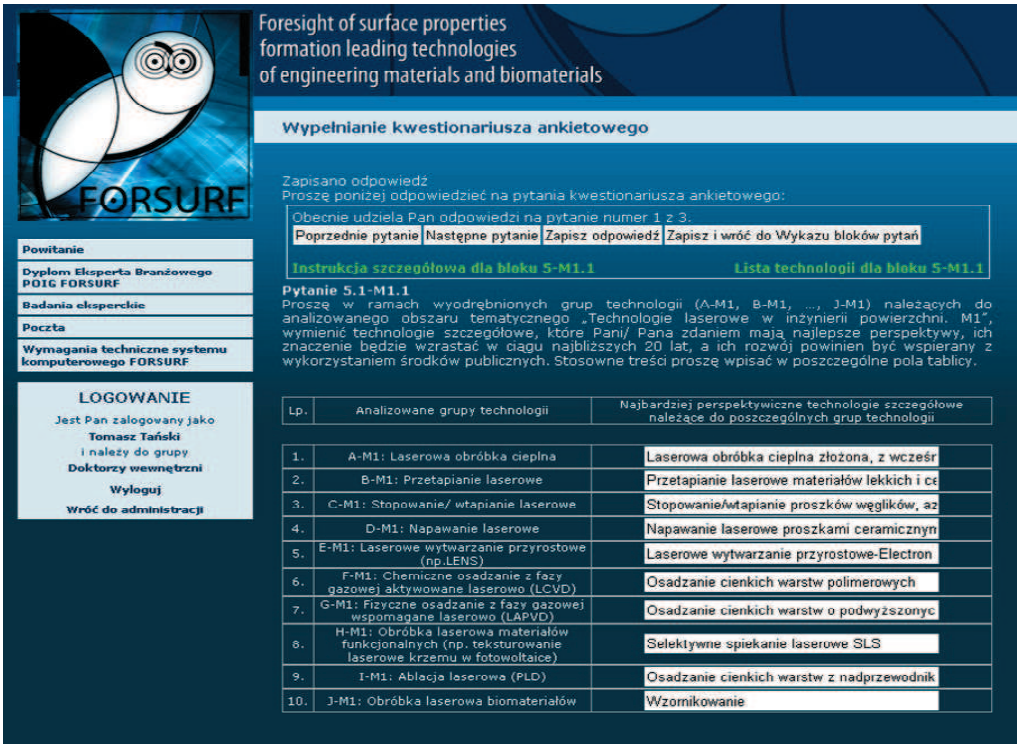
celów naukowo-badawczych prowadzonych działań oraz upowszechnianie informacji o postępie realizowanych prac. W szczególności platforma internetowa zapewnia wszystkim zainteresowanym podmiotom i jednostkom pozyskiwanie *on-line* szczegółowych informacji dotyczących celów i założeń realizowanych badań, śledzenie na bieżąco postępu prac oraz wyrażanie własnych opinii w ramach konsultacji społecznych *on-line*. Nowości, informacje o ogłaszanych konkursach, programy ogólne i szczegółowe Paneli eksperckich, informacje o najnowszych publikacjach wraz z ich skrótami, *fotoeseje* ze spotkań ekspertów i inne informacje, istotne w toku badań, są cyklicznie przesyłane w postaci *Newslettera* zdeklarowanym subskrybentom.

Tablica 8. *Funkcje platformy internetowej i poziom dostępności użytkowników do jej zasobów*

Lp.	Funkcje platformy internetowej	Poziom dostępności*
1.	Śledzenie na bieżąco pośrednich i finalnych wyników badań oraz bieżących wydarzeń obejmujących panele eksperckie, wydawnictwa i debatę publiczną *on-line*	(1), (2)
2.	Otrzymywanie w subskrypcji *Newslettera* dotyczącego wydarzeń, nowości i postępu realizowanych prac	(1), (2)
3.	Czynne uczestnictwo w debacie publicznej *on-line*	(1), (2)
4.	Wypełnianie kwestionariuszy ankietowych *on-line*	(2)
5.	Elektroniczna korespondencja indywidualna	(2), (3)
6.	Elektroniczna korespondencja wieloseryjna	(3)
7.	Wprowadzanie do systemu i zarządzanie danymi personalnymi o ekspertach	(3)
8.	Generowanie nowych kwestionariuszy ankietowych	(3)
9.	Zarządzanie informacjami, opracowywanie, zamieszczanie i modyfikowanie informacji na stronie internetowej i w *Newsletterze*	(3)
10.	Zarządzanie finansami, umowami i dokumentacją systemową	(3)
11.	Transfer danych do/z kompatybilnego systemu umów uczelnianych	(3)
12.	Generowanie wyników badań w postaci tabelarycznych lub graficznych zestawień	(3)
13.	Dodawanie, odejmowanie i modyfikowanie istniejących modułów systemu	(3)

*) Poziom dostępności: (1) – ogólny, (2) – ekspercki (3) – zarządczo-administracyjny.

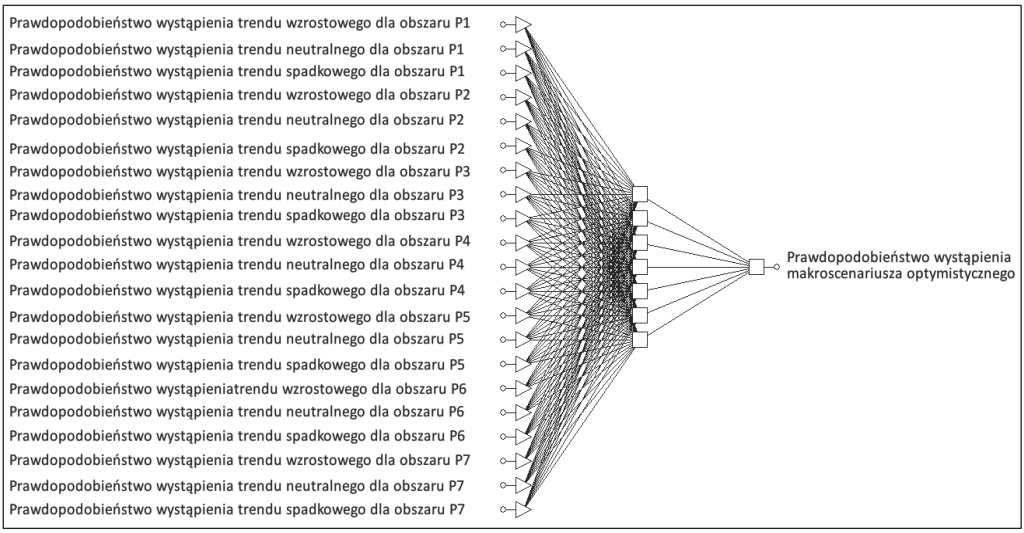
Platformę internetową WB FIRM cechuje duża elastyczność i możliwość dynamicznego dopasowania zarówno do obiektywnie zmieniających się wewnętrznych i zewnętrznych uwarunkowań realizacji badań, jak i subiektywnych potrzeb jej wewnętrznych i zewnętrznych klientów, stanowiąc niejako *żywy organizm*, podlegający ciągłej rozbudowie, aktualizacjom i modyfikacjom. Najczęściej wprowadzane zmiany miały na celu maksymalizację realizowanych zadań i funkcji, doskonalenie interfejsu użytkownika, zwiększanie bezpieczeństwa przechowywania danych, wzmacnianie odporności na zakłócenia, dopasowanie do istniejących, powszechnie stosowanych i stale podlegających zmianom rozwiązań informatycznych. Przykładową stronę platformy internetowej, przedstawiającą jedną z kart kwestionariusza ankietowego wypełnionego przez wybranego eksperta, zaprezentowano na rysunku 31.



Rysunek 31. *Platforma internetowa WB FIRM. Interfejs użytkownika [159]*

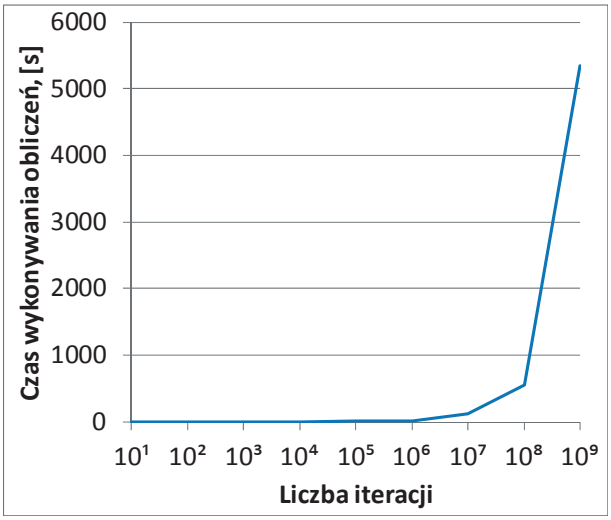
Ostatni element technologii informacyjnej, zastosowanej w ramach prowadzonych prac, stanowią sztuczne **sieci neuronowe** do zarządzania zintegrowanymi badaniami foresightowymi (ang.: *Neural Network for Foresight Integrated Research Management* – NN FIRM) opracowane z użyciem komercyjnego oprogramowania *Statistica Neural Networks* w wersji 4.0*F* (podrozdział 3.5 niniejszej pracy). Zaprojektowanie sieci stanowiło podstawę niezbędną do realizacji celów informatycznych pracy, następnie wzbogaconą o oryginalne oprogramowanie SCENNET21, służące do określenia zależności pomiędzy prawdopodobieństwem wystąpienia danego makroscenariusza a rozwojem poszczególnych obszarów tematycznych inżynierii powierzchni materiałów oraz oprogramowanie SCENNET48, umożliwiające określenie, w jaki sposób kluczowe mezoczynniki rozwoju inżynierii powierzchni materiałów wpływają na prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych makroscenariuszy.

Zadaniem **programu SCENNET21**, napisanego w języku *C++*, jest znalezienie optymalnych parametrów wejściowych, w celu uzyskania zadanej wartości wyjściowej dla wybranych sieci neuronowych. Umożliwia on wyszukiwanie maksymalnej wartości wyjściowej,



Rysunek 32. *Schemat przykładowego modelu sieci neuronowej zaimplementowanego w języku C++ i dołączonego do programu SCENNET21 jako funkcja*

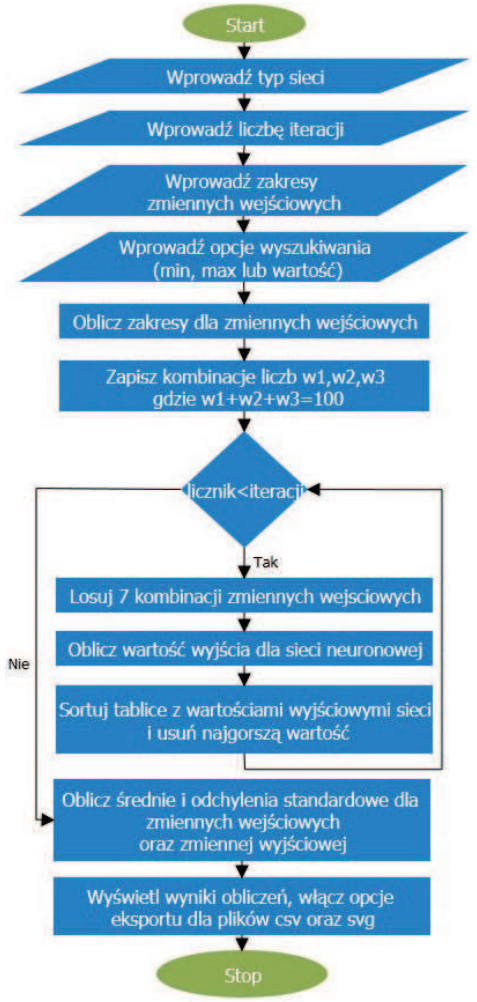
minimalnej wartości wyjściowej i wartości zadanej przez użytkownika oraz znalezienie wartości suboptymalnych dla jednej z 6 sieci neuronowych przygotowanych za pomocą programu *Statistica Neural Networks* 4.0*F*. Sieci zaimplementowano w języku *C*++ i dołączono do programu jako funkcje. Każda z tych funkcji, jako parametry wejściowe, przyjmuje 21-elementową tablicę reprezentującą zmienne wejściowe wybranej sieci neuronowej, a wynikiem jej działania jest liczba reprezentująca zmienną wyjściową sieci neuronowej. Zbiór 21 parametrów wejściowych jest podzielony na siedem trzyelementowych grup, z których każda odpowiada jednemu analizowanemu obszarowi tematycznemu, odpowiednio od *M*1 do *M*7 oraz od *P*1 do *P*7, w zależności od wybranej sieci. Trzy elementy wewnątrz grupy oznaczają kolejno: prawdopodobieństwo wystąpienia trendu wzrostowego, prawdopodobieństwo wystąpienia trendu ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie i prawdopodobieństwo wystąpienia trendu spadkowego w odniesieniu do poszczególnych grup technologii, na tle ogółu technologii inżynierii powierzchni. Każdy parametr wejściowy funkcji może przyjmować wartości z zakresu od 0 do 100. Przykład modelu sieci neuronowej, sporządzonego w odniesieniu do optymistycznego makroscenariusza dotyczącego pola badawczego *P*, zaprezentowano na rysunku 32. Zbiór wszystkich sześciu modeli stanowi kombinację dwóch rozpatrywanych pól badawczych (*M* i *P*) i trzech rodzajów makroscenariuszy, o strukturze różniącej się liczbą neuronów w warstwie ukrytej.



Rysunek 33. *Wykres zależności czasu obliczeń do liczby przeprowadzanych iteracji [97]*

Program SCENNET21 umożliwia ustawienie minimalnej oraz maksymalnej wartości zakresu wyszukiwania indywidualnie w przypadku każdej zmiennej wejściowej. Suma trzech prawdopodobieństw wystąpienia poszczególnych trendów musi być równa 100. W zakresie od 0 do 100 dla każdego obszaru tematycznego otrzymuje się ok. 5000 kombinacji spełniających warunek sumy trzech prawdopodobieństw równej 100. Ze względu na bardzo dużą liczbę możliwych kombinacji zastosowano metodę wyszukiwania losowego (Monte Carlo). Sprawdzenie 10^4 kombinacji zajmuje średnio 200 ms. Przyrost czasu obliczeń w odniesieniu do liczby iteracji przedstawiono na wykresie (rys. 33). Pomiary czasu wykonano na komputerze z procesorem *Intel Core i*5 M560 2,67GHz i 4GB pamięci RAM. Zbiór rozwiązań zbliżonych do optymalnych otrzymuje się po sprawdzeniu około 10^7 iteracji, natomiast kolejne z nich minimalnie wpływają na poprawę otrzymanych rezultatów, co przy wzrastającym wykładniczo czasie koniecznym do ich wykonania decyduje o niecelowości ich przeprowadzania.

Zasadę działania programu SCENNET21 przedstawia schemat blokowy (rys. 34). W pierwszej kolejności użytkownik określa parametry wyszukiwania obejmujące: liczbę iteracji wyszukiwania rozwiązania, sieć, która będzie funkcją celu, zakresy zmiennych wejściowych oraz wartość oczekiwaną dla zmiennej wyjściowej sieci. Wykorzystując wprowadzone dane wejściowe, program oblicza szerokość zakresów poszukiwań, a następnie wszystkie możliwe kombinacje prawdopodobieństw dotyczące każdego obszaru tematycznego, dające sumę 100. Symulacje przeprowadzono przy założeniu, że obszar poszukiwań wartości zmiennych



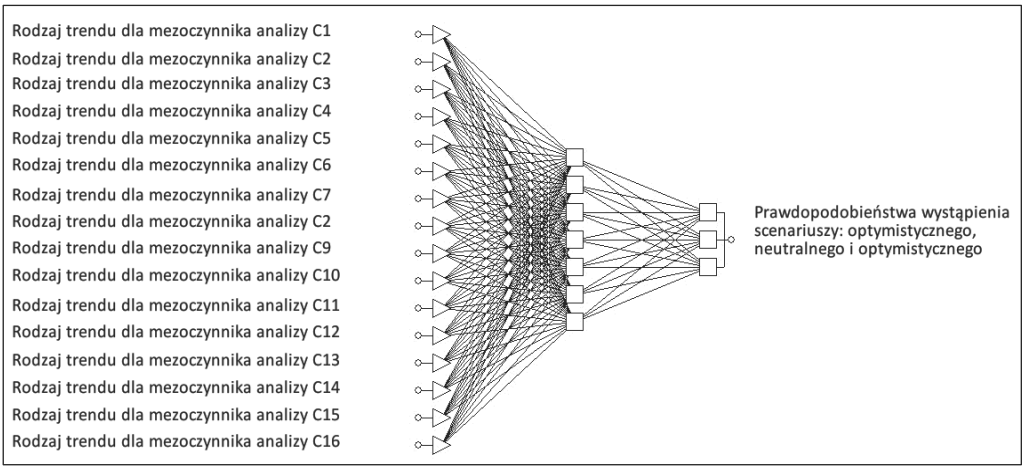
Rysunek 34. *Schemat blokowy programu SCENNET21 [97]*

decyzyjnych jest ograniczony do zakresu zmian, zdefiniowanych w ograniczeniach modeli neuronowych. Kolejnym krokiem jest wylosowanie siedmiu kombinacji prawdopodobieństw zapisanych na poprzednim etapie. Następnie jest uruchamiana funkcja reprezentująca sieć neuronową, gdzie parametrami wejściowymi jest siedem kombinacji liczb wylosowanych w poprzednim kroku. Wartość wyjścia sieci jest zapisywana do tablicy *magazyn*, a następnie usuwana jest z niej najgorsza wartość. Wymienione etapy są powtarzane do momentu, gdy licznik pętli będzie równy liczbie iteracji określonej na wstępie przez użytkownika. Po zakończeniu obliczeń wyniki są prezentowane w postaci tabeli. Istnieje możliwość eksportu wyników do arkusza kalkulacyjnego (plik z rozszerzeniem *csv*) oraz prezentacji wyników

w postaci wykresu zapisanego do pliku graficznego z rozszerzeniem *svg*. Program dodatkowo posiada opcję generowania etykiet wykresu w języku polskim i angielskim oraz jego zapisu w wersji kolorowej lub monochromatycznej. Wyniki badań wygenerowane z użyciem programu SCENNET21 przedstawiono w podrozdziale 7.1.

Program SCENNET48 jest modyfikacją programu SCENNET21, umożliwiającą określenie wpływu kluczowych szesnastu mezoczynników determinujących rozwój inżynierii powierzchni materiałów, przedstawionych graficznie w podrozdziale 3.2, na prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych makroscenariuszy: optymistycznego, neutralnego i pesymistycznego, z użyciem modelu sieci neuronowej mającego 16 neuronów na wejściu, 3 na wyjściu i 73 w warstwie ukrytej (rys. 35).

Program SCENNET48 daje możliwość wykonania symulacji komputerowych, przy założeniu że zmienna niezależna może przyjmować wartość ze zbioru {1, 0, -1}, odpowiadając kolejno trendowi wzrostowemu, neutralnemu i spadkowemu. Uwzględniając 16 zmiennych, liczba możliwych przypadków wynosi 3^{16}, czyli 43 046 721. Jeżeli poszczególne mezoczynniki mogą przyjmować tylko dwie wartości, liczba przypadków zostaje ograniczona do 2^{16}, czyli 65 536, stąd wykonując symulacje w trzech wariantach przyjęto takie właśnie założenie początkowe. Interfejs użytkownika pozwala ponadto na arbitralne zadanie wartości poszczególnym mezoczynnikom z dostępnego zbioru i obserwację wpływu zmiany tych wartości na prognozowane prawdopodobieństwo wystąpienia danego makroscenariusza.



Rysunek 35. *Schemat modelu sieci neuronowej zaimplementowanego w języku C++ i dołączonego do programu SCENNET48 jako funkcja*

Wyniki symulacji mogą być prezentowane tabelarycznie lub w postaci graficznej. Do predykcji wartości prawdopodobieństwa wystąpienia makroscenariusza program wykorzystuje funkcję klasy *f_16zRun*, będącą implementacją w języku *C++* wcześniej przygotowanej i wytrenowanej jednej z trzech opracowanych w tym celu sztucznych sieci neuronowych. Parametrami wejściowymi tej funkcji jest 16 liczb typu *double*, określających rodzaj występującego trendu i odpowiadających każdemu z 16 mezoczynników. Wartości wyjściowe funkcji zawarte są w tablicy trzech liczb typu *double,* które odpowiadają kolejnym prawdopodobieństwom wystąpienia makroscenariuszy. Każda ze zmiennych wyjściowych może przyjmować wartości z zakresu od 0 do 100, przy czym suma elementów tablicy wartości wyjściowych musi być równa 100. Ogólną zasadę działania programu SCENNET48 przedstawiono na schemacie blokowym (rys. 36).

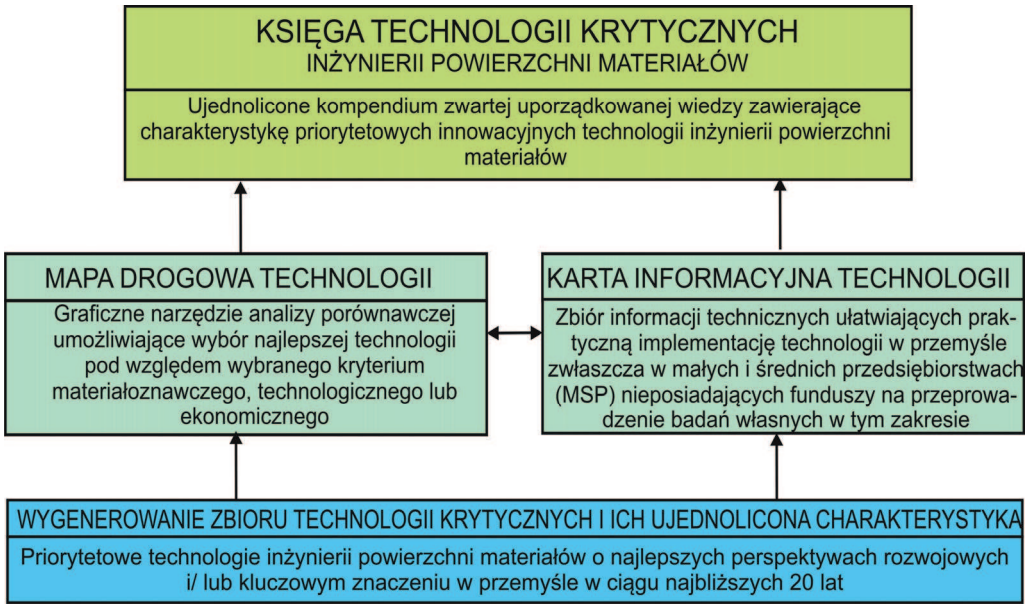
Interfejs użytkownika pozwala na ustalenie wartości wejściowych za pomocą 48 elementów typu *TRadioButton*, podzielonych na 16 grup po 3 elementy umieszczone w elemencie *TPanel*. W celu poprawienia ergonomii interfejsu użytkownika, po wskazaniu dowolnego

Rysunek 36. *Schemat blokowy programu SCENNET48*

elementu *TRadioButton*, w panelu, na którym znajduje się element, zmienia się kolor tła na zielony, żółty lub czerwony, co odpowiada trendowi: wzrostowemu, neutralnemu i spadkowemu dla każdego z 16 mezoczynników. Interfejs użytkownika pozwala dodatkowo na wybór wersji językowej programu: polskiej lub angielskiej. Wyniki symulacji, wykonane z zastosowaniem programu SCENNET48, przedstawiono w podrozdziale 7.2 rozprawy.

4.4. Księga Technologii Krytycznych inżynierii powierzchni materiałów

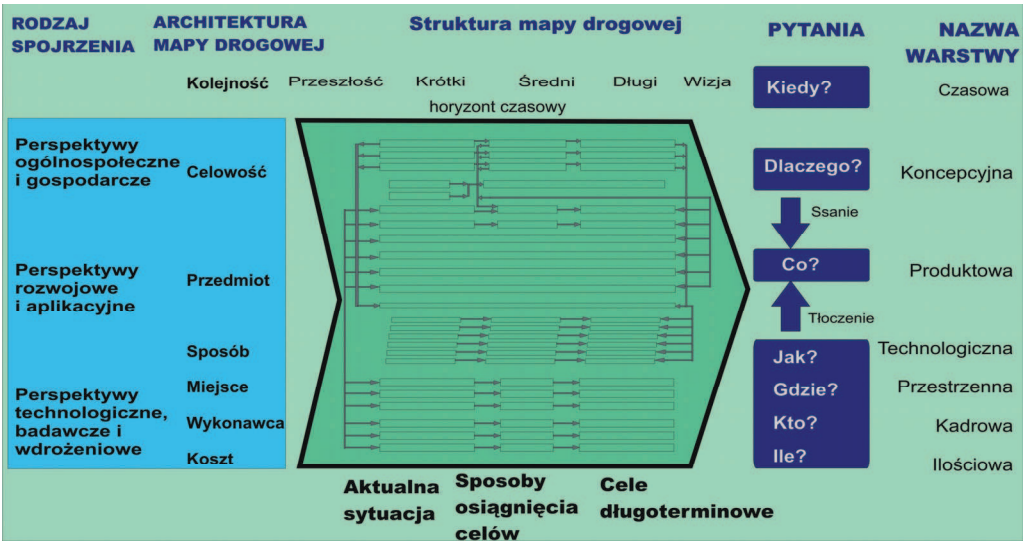
Księga Technologii Krytycznych inżynierii powierzchni materiałów (rys. 37) jest kompendium zwartej wiedzy obejmującej zbiór kilkuset map drogowych i kart informacyjnych technologii inżynierii powierzchni materiałów, będących narzędziem analizy porównawczej pod względem wybranego kryterium materiałoznawczego, technologicznego lub ekonomicznego, przydatnych zwłaszcza w mikro-, małych i średnich przedsiębiorstwach stanowiących 99,8% krajowych przedsiębiorstw wytwarzających 68% PKB generowanego przez wszystkie przedsiębiorstwa w Polsce ogółem [335], lecz nieposiadających wystarczających funduszy na przeprowadzenie badań własnych w tym zakresie. Zbiór technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów wygenerowano na podstawie analizy istniejącej sytuacji, obejmującej



Rysunek 37. *Księga Technologii Krytycznych inżynierii powierzchni materiałów*

ocenę stanu zagadnienia, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi, wspartej pomocniczymi metodami heurystycznymi, co opisano w odrębnym własnym opracowaniu książkowym [76]. Mapy drogowe i karty informacyjne opracowano także w odniesieniu do grupy technologii szczegółowych (*S*1-*S*8), w ramach weryfikacji poprawności metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania inżynierii powierzchni materiałów [90-98, 161, 169-174] (rozdział 5).

Mapy drogowe technologii (ang.: *Technology Roadmaps* – TR) [336-338] utworzono z wykorzystaniem danych pierwotnych pozyskanych w wyniku wykonanych badań eksperymentalno-porównawczych. Układ autorskiej mapy drogowej technologii (rys. 38) odpowiada pierwszej ćwiartce kartezjańskiego układu współrzędnych. Na osi odciętych znajdują się trzy interwały czasowe, dotyczące kolejno lat: 2010-12, 2020 i 2030, a horyzont czasowy całości wyników badań, które uwzględnia mapa, wynosi 20 lat. Na oś rzędnych mapy drogowej technologii naniesiono siedem głównych warstw odpowiadających kolejno na pytania o coraz większym stopniu szczegółowości: Kiedy? Dlaczego? Co? Jak? Gdzie? Kto? Ile?, których ogólną charakterystykę przedstawiono w tablicy 9. Główne warstwy mapy drogowej technologii uporządkowano hierarchicznie, począwszy od górnych najbardziej ogólnych, określających ogólnospołeczne i ekonomiczne przesłanki, przyczyny i powody realizowanych działań, poprzez środkowe charakteryzujące produkt i technologie jego wytwarzania, kończąc na

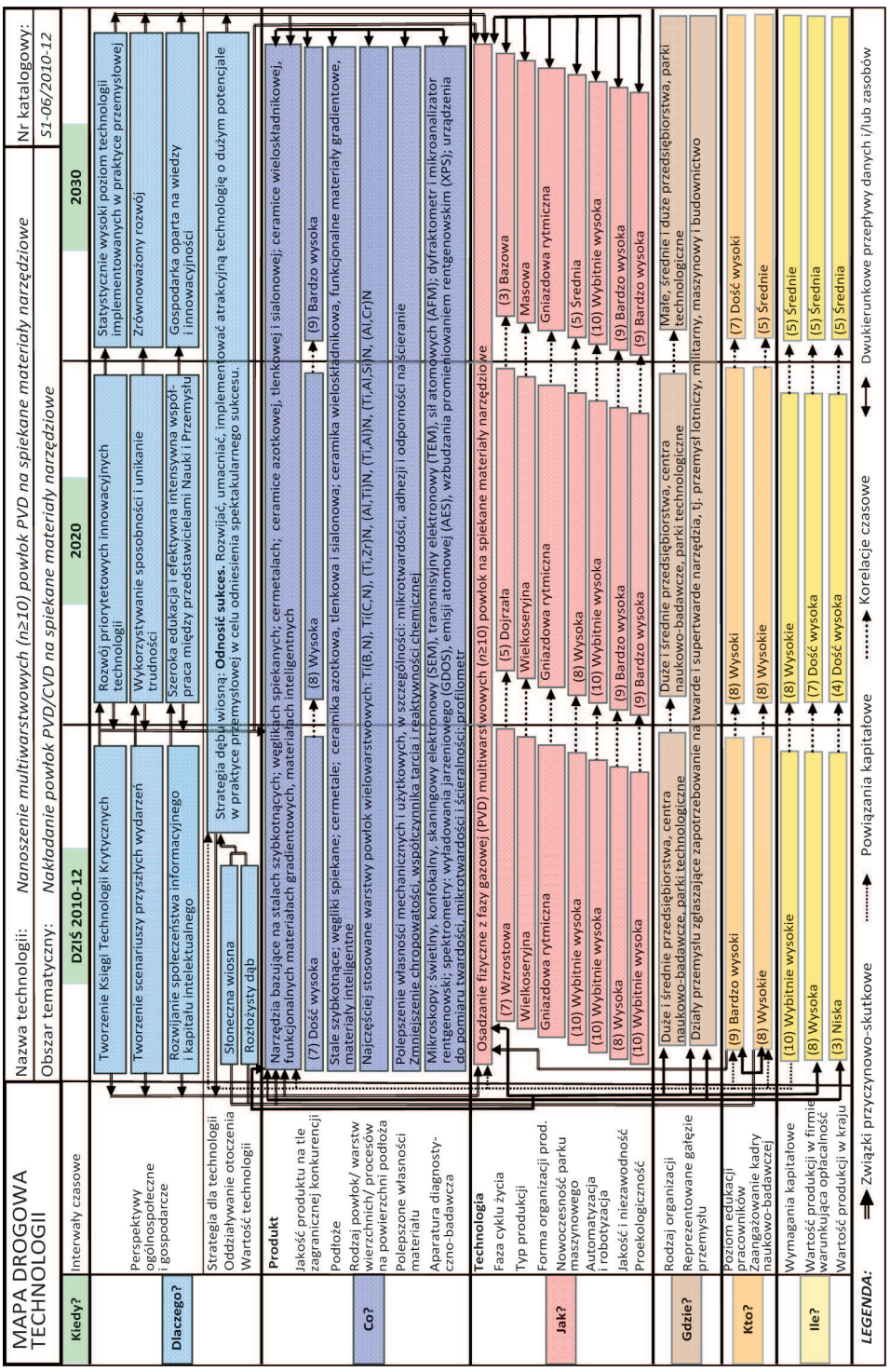


Rysunek 38. *Struktura mapy drogowej technologii [172]*

Tablica 9. *Charakterystyka warstw głównych mapy drogowej technologii*

Lp.	Nazwa warstwy	Zakres	Pytanie	Opis
1.	Czasowa	Kolejność	Kiedy?	Definiuje założone interwały czasowe i horyzont czasowy prowadzonych badań
2.	Koncepcyjna	Celowość	Dlaczego?	Precyzuje perspektywy ogólnospołeczne i gospodarcze prowadzonych działań oraz strategię właściwą dla danej technologii
3.	Produktowa	Przedmiot	Co?	Charakteryzuje produkt powstający w danym procesie technologicznym z uwzględnieniem jego struktury i własności
4.	Technologiczna	Sposób	Jak?	Opisuje daną technologię wziąwszy pod uwagę następujące kryteria szczegółowe: cykl życia, typ i forma produkcji, park maszynowy, automatyzacja i robotyzacja, jakość, ekologia
5.	Przestrzenna	Miejsce	Gdzie?	Określa rodzaj organizacji i reprezentowane gałęzie przemysłu
6.	Kadrowa	Wykonawca	Kto?	Ustala strukturę kadry i oczekiwane kompetencje pracowników
7.	Ilościowa	Koszt	Ile?	Podaje wymagania kapitałowe i szacowaną wielkość produkcji

warstwach dolnych, precyzujących szczegóły organizacyjno-techniczne dotyczące miejsca, wykonawcy i kosztów. Warstwy środkowe mapy drogowej technologii są poddane dwóm typom oddziaływania – *ssaniu* od strony warstw górnych i *tłoczeniu* od strony warstw dolnych. Zależności pomiędzy poszczególnymi warstwami i podwarstwami mapy drogowej technologii przedstawiono za pomocą strzałek, reprezentujących odpowiednio związki przyczynowo-skutkowe, powiązania kapitałowe, korelacje czasowe i dwukierunkowe przepływy danych i/lub zasobów. Opracowane według autorskiej koncepcji mapy drogowe technologii stanowią bardzo wygodne narzędzie analizy porównawczej, umożliwiając wybór technologii najlepszej pod względem wybranego kryterium materiałoznawczego, technologicznego lub ekonomicznego. Ponadto, ich niezaprzeczalną zaletą jest elastyczność, dzięki której w razie potrzeby mapy można uzupełniać i rozbudowywać o dodatkowe podwarstwy, dostosowując je do specyfiki branży, wielkości przedsiębiorstwa, skali działalności firmy bądź indywidualnych oczekiwań przedsiębiorcy. Przykładową mapę drogową technologii sporządzoną w odniesieniu do procesów wytwarzania wielowarstwowych (o liczbie mniejszej niż 10) powłok osadzanych z fazy gazowej na spiekanych materiałach narzędziowych, przedstawiono na rysunku 39.



Rysunek 39. *Przykładowa mapa drogowa technologii dotycząca wytwarzania multiwarstwowych (n≥10) powłok PVD naniesionych na spiekane materiały narzędziowe; współautorzy: A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, J. Mikuła*

a)

KARTA INFORMACYJNA TECHNOLOGII	Nazwa technologii	*Metoda zol-żel*	Nr katalogowy
	Obszar tematyczny	*Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych*	P3-06-2010/11

Istota zjawiska fizykochemicznego

Proces zol-żel wytwarzania powłok jest wieloetapowy, składa się z hydrolizy prekursora (otrzymanie zolu), żelowania (kondensacja), suszenia i densyfikacji. Pierwszym etapem jest sporządzenie roztworów koloidalnych (zoli) w wyniku hydrolizy i kondensacji zastosowanych prekursorów. Dalsza kondensacja prowadzi do polimeryzacji, czyli tworzenia dużych przestrzennych cząsteczek, w których atomy metalu lub niemetalu podstawowego połączone są między sobą mostkami tlenowymi. Reakcjami chemicznymi zachodzącymi podczas procesu zol-żel są hydroliza, kondensacja i polikondensacja. Przejście pomiędzy stanem zolu i kompletnego żelu przebiega w sposób ciągły, co związane jest z płynną zmianą własności reologicznych tworzącej się powłoki, a zwłaszcza lepkości.

Rodzaj możliwej powłoki/ warstwy wierzchniej lub procesów zachodzących na powierzchni podłoża

×	jednowarstwowa	×	wielofazowa	×	amorficzna
×	wielowarstwowa		gradientowa	×	nanokrystaliczna
	multiwarstwowa (>100 warstw)	×	kompozytowa	×	hybrydowa
	przemiany fazowe powierzchni podłoża		zmiana składu chemicznego na powierzchni podłoża		procesy fizyczne na powierzchni podłoża

Szczególne własności powłok/ warstw wierzchnich/ powierzchni podłoża w wyniku zajścia procesów

×	mechaniczne		magnetyczne	×	optyczne	×	trybologiczne
×	chemiczne		dyfuzyjne	×	termiczne	×	antykorozyjne
×	elektryczne		hydromechaniczne		akustyczne		Inne

Zalety	Wady
Nietoksyczność otrzymanych materiałów; dobre własności mechaniczne otrzymanych powłok; niska temperatura procesu.	Niedostateczna adhezja powłoki z materiałem podłoża; niska odporność na ścieranie; duża porowatość.

Najbardziej perspektywiczne technologie szczegółowe i/lub obszary zastosowań

Szerokie perspektywy aplikacji na bazie ceramiki, szkła, polimerów, biomateriałów i drewna. Wytwarzanie cienkich warstw, w tym nanowarstw w produkcji membran, sensorów, implantów i wszczepów medycznych. Produkcja szkieł specjalnych i synteza materiałów szklano-krystalicznych.

Technologie zastępcze/ alternatywne

Natryskiwanie; fizyczne osadzanie z fazy gazowej (PVD).

Rekomendowane źródła literaturowe

1. Llc Books (ed.), Thin Film Deposition: Evaporation, Chemical Vapor Deposition, Sol-Gel, Focused Ion Beam, Thermal Spraying, Diamond-Like Carbon, Books LLC, Tennessee, 2010.
2. S. Sakka (ed.), Sol-gel science and technology, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 2003.
3. B.A. Akgun, C. Durucan, N.P. Mellott, Effect of silver incorporation on crystallization and microstructural properties of sol-gel derived titania thin films on glass, Journal of Sol-Gel Science Technology 58/1 (2011) 277-289.

Wpływ aplikacji technologii na przewidywane i oczekiwane własności materiału	Poziom
Biokompatybilność	Wysoki (8)
Porowatość	Umiarkowany (6)
Przewodnictwo cieplne	Średni (5)
Biodegradowalność	Średni (5)
Brak kruchości	Średni (5)
Energooszczędność	Średni (5)
Podatność na łączenie	Średni (5)
Niezwilżalność	Dość niski (4)
Skuteczność przeciwdziałania technologii skutkom zużycia	**Poziom**
Zużycie ścierne	Dość niski (4)
Korozja naprężeniowa i zmęczeniowa	Dość niski (4)
Pitting (zużycie gruzełkowe)	Dość niski (4)
Korozja lokalna i wżerowa	Dość niski (4)
Scuffing	Dość niski (4)
Zużycie adhezyjne	Dość niski (4)
Fretting	Dość niski (4)
Korozja równomierna	Dość niski (4)
Sekcje przemysłu wg klasyfikacji PKD o najwyższej aplikacyjności technologii	**Poziom**
Badania naukowe i prace rozwojowe	Umiarkowany (6)
Produkcja wyrobów z gumy i tworzyw sztucznych	Niski (3)
Produkcja (...) mineralnych surowców niemetalowych	Niski (3)
Produkcja komputerów (...)	Niski (3)
Produkcja pojazdów samochodowych (...)	Bardzo niski (2)
Produkcja pozostałego sprzętu transportowego	Bardzo niski (2)
Działalność w zakresie architektury i inżynierii (...)	Bardzo niski (2)
Produkcja wyrobów, pozostała	Minimalny (1)
Aplikacyjność metod modelowania i sterowania komputerowego w odniesieniu do technologii	**Poziom**
Systemy ekspertowe	Dość wysoki (7)
Modelowanie wieloskalowe	Dość wysoki (7)
Analiza fraktalna	Dość wysoki (7)
Metody Monte Carlo	Dość wysoki (7)
Logika rozmyta	Dość wysoki (7)
Aktualna faza cyklu życia technologii	**Wzrostowy (7)**
Perspektywy rozwojowe	**Dość wysoki (7)**

b)

KARTA INFORMACYJNA TECHNOLOGII	Nazwa technologii	*Metoda zol-żel*	Nr katalogowy
	Obszar tematyczny	*Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych*	P3-06-2010/11

Opis przebiegu procesu technologicznego

- Przygotowanie powierzchni do nakładania powłok;
- Rozproszenie koloidalnych cząstek w cieczy w celu otrzymania roztworu zolu;
- Nanoszenie roztworu zolu jako powłoki na podłoże;
- Polimeryzacja cząstek zolu w wyniku usunięcia elementów stabilizujących oraz powstanie usieciowanego żelu;
- Końcowa obróbka cieplna (piroliza) pozostałych składników organicznych i nieorganicznych i powstanie powłoki o strukturze amorficznej lub krystalicznej.

Technika zol-żel oferuje wiele metod syntezy nowatorskich i wysoce zaawansowanych wielofunkcyjnych materiałów i umożliwia przystosowanie ich własności do różnych zastosowań, w tym jako powłoki ochronne na powierzchnię konstrukcyjnych materiałów niemetalowych. Poszczególne czynności wykonywane podczas procesu wytwarzania powłok ceramicznych metodą zol-żel (nakładanie, suszenie, wypalanie) są zbliżone do tradycyjnej technologii ceramicznych powłok wypalanych. Jednakże w każdym etapie metody zol-żel dominują procesy i reakcje chemiczne, które są dość łatwe do kontroli oraz przebiegają w dość niskiej temperaturze.

Ogólne fizykochemiczne warunki realizacji procesu technologicznego

Standardowy zakres parametru procesu	Jednostka	od	do
Temperatura	°C	20	1400
Ciśnienie	-	-	-
Warunki prądowo-napięciowe	- -	- -	- -
Czas	h	1	kilkadziesiąt
Środowisko/ atmosfera	Roztwory wodne; związki chemiczne		
Specyficzne warunki realizacji procesu	Reakcje chemiczne		

Metod(a)-y wstępnego przygotowania materiału podłoża

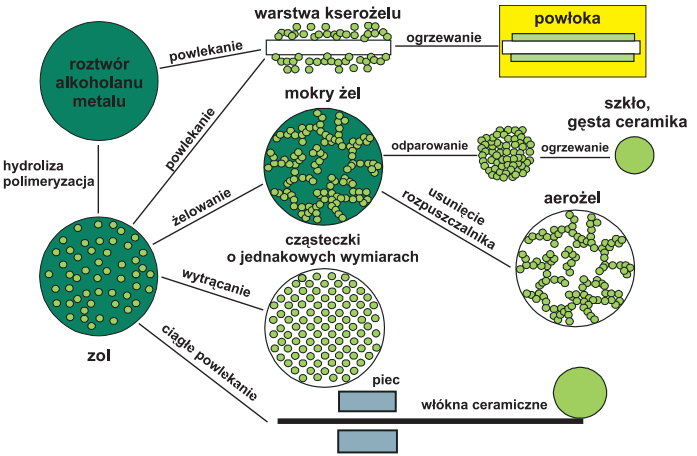
Oczyszczanie wstępne: mechaniczne; chemiczne; fizyczne; fizykochemiczne.

Typ/ rodzaj urządzenia

-

Specyficzne oprzyrządowanie

-



Schemat ogólny/przykładowy przebiegu *procesu uzyskiwania produktów technologią zol-żel.*

Rysunek 40. *Przykładowa karta informacyjna technologii dotycząca metody zol-żel zaimplementowanej w obszarze inżynierii materiałów konstrukcyjnych niemetalowych; a) 1. strona; b) 2. strona; współautorzy: A.D. Dobrzańska-Dankiewicz, K. Lukaszkowicz*

Uszczegółowieniem i uzupełnieniem map drogowych technologii są **karty informacyjne technologii**, zawierające informacje techniczne stanowiące istotną pomoc podczas wdrażania danej technologii w praktyce przemysłowej, w szczególności w małych i średnich przedsiębiorstwach (MSP), niedysponujących kapitałem pozwalającym na przeprowadzenie badań własnych w tym zakresie. Karty informacyjne technologii zawierają: opis przebiegu procesu technologicznego i charakterystykę zjawiska fizykochemicznego towarzyszącego procesom technologicznym, zalety i wady danej technologii, najbardziej perspektywiczne technologie szczegółowe oraz technologie zastępcze/ alternatywne. W karcie informacyjnej technologii określono ponadto rodzaje możliwej do naniesienia powłoki/ warstwy wierzchniej lub procesów zachodzących na powierzchni podłoża, a także szczególne własności powłok/ warstw wierzchnich/ powierzchni podłoża nabyte w wyniku przebiegu procesów technologicznych. Szczególne miejsce poświęcono także ogólnym fizykochemicznym warunkom realizacji procesu technologicznego, metodom przygotowania materiału podłoża, typowi/ rodzajowi urządzeń naukowo-badawczych i możliwemu specyficznemu oprzyrządowaniu. Ponadto wyniki badań pozyskanych drogą badań eksperckich pozwoliły na zamieszczenie w opracowanych kartach następujących danych określonych z wykorzystaniem uniwersalnej skali stanów względnych: wpływu aplikacji technologii na przewidywane i oczekiwane własności materiału, skuteczności przeciwdziałania technologii skutkom zużycia, sekcji przemysłu wg klasyfikacji PKD o najwyższej aplikacyjności technologii, aplikacyjności metod modelowania i sterowania komputerowego oraz perspektyw rozwojowych poszczególnych analizowanych technologii. Dodatkowo każda karta informacyjna technologii zawiera ogólny lub przykładowy schemat rozpatrywanego procesu produkcyjnego oraz trójelementowy wykaz rekomendowanych źródeł literaturowych. Przykładową kartę informacyjną technologii dotyczącą metody zol-żel, możliwej do implementacji m.in. w obszarze materiałów konstrukcyjnych niemetalowych, przedstawiono na rysunkach 40 a) i b).

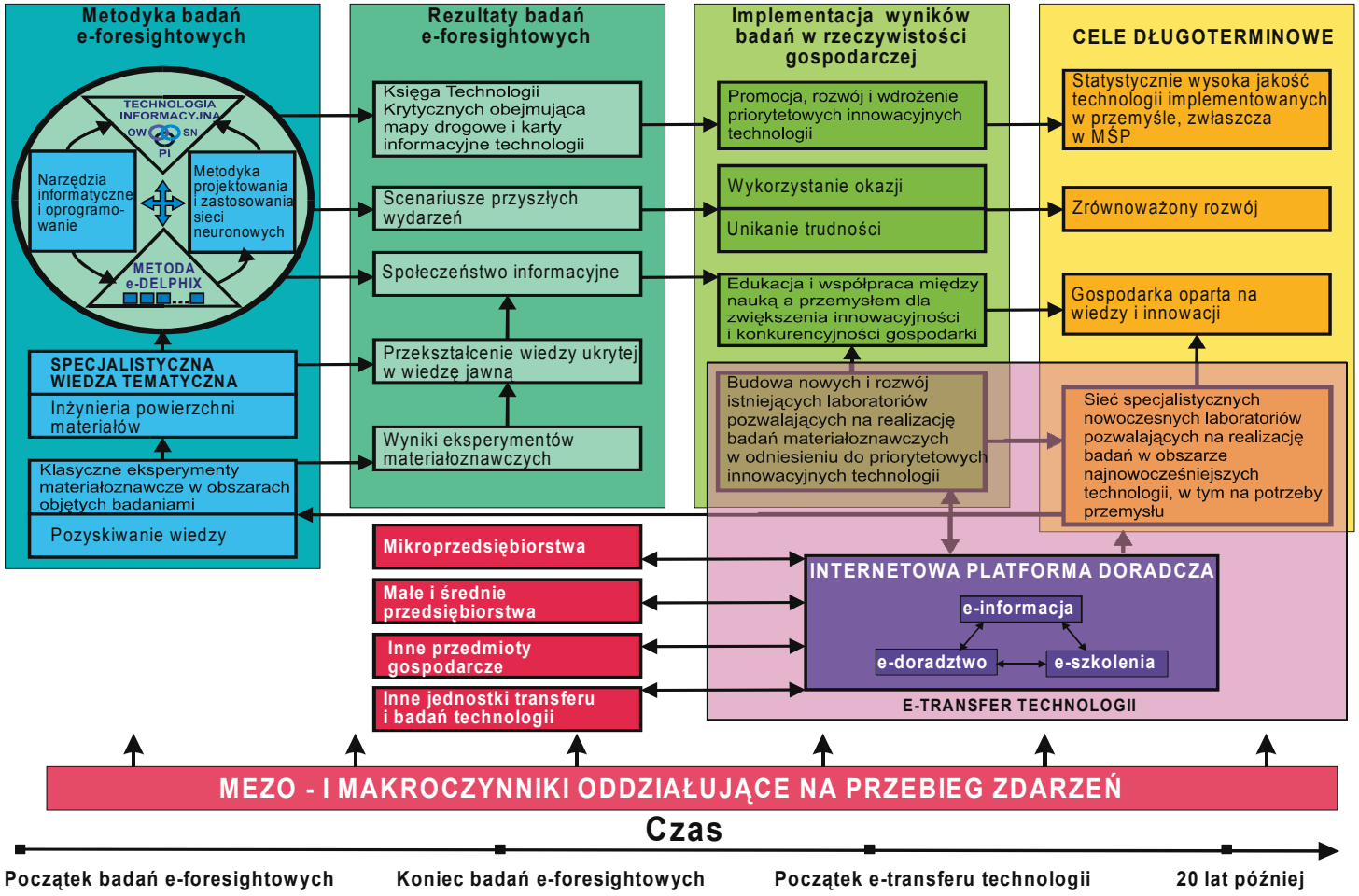
Planuje się, że Księga Technologii Krytycznych, obejmująca mapy drogowe i karty informacyjne technologii, zostanie opublikowana w formie książkowej, lecz przede wszystkim ma ona zaistnieć jako e-Księga Technologii Krytycznych inżynierii powierzchni materiałów, ponieważ informacje w niej zawarte będą głównie rozpowszechniane z użyciem Internetu bez żadnych ograniczeń i bezpłatnie, z wykorzystaniem ogólnodostępnej (*Open Access*) platformy internetowej, zgodnie z nowo opracowaną koncepcją e-transferu technologii [99, 161, 175].

4.5. E-transfer technologii

Istnieje merytoryczne uzasadnienie, aby wyniki badań [159] zostały wdrożone i praktycznie wykorzystane w rzeczywistości gospodarczej. Jednym z ogólnych celów wykonanych prac jest animacja debaty publicznej, w której uczestniczyli krajowi i zagraniczni przedstawiciele świata nauki, gospodarki i administracji publicznej, skutkujące upowszechnieniem wyników badań w środowiskach zainteresowanych podjętą tematyką. Debata publiczna przyczynia się do dalszego zacieśniania współpracy pomiędzy sferą badawczo-rozwojową a gospodarką i aktywizacji przepływu kadr między tymi grupami, co jest również utylitarną konsekwencją działań realizowanych w ramach prowadzonych badań własnych [159], powodującą polepszenie pozycji konkurencyjnej gospodarki i nauki polskiej na tle innych państw Europy i Świata. Zagadnienie współpracy na linii Nauka-Przemysł zostało ocenione przez ekspertów uczestniczących w badaniach e-foresightowych, jako jeden z najistotniejszych czynników determinujących przyszły rozwój inżynierii powierzchni materiałów inżynierskich. Prawdziwość tak sformułowanej tezy potwierdziło 80% spośród 227 ankietowanych ekspertów [159].

Utworzona platforma internetowa umożliwi ogółowi społeczeństwa, a w szczególności środowiskom przemysłowym, ośrodkom naukowym i organizacjom społecznym, pozyskiwanie w dowolnym momencie szczegółowych informacji dotyczących celów i założeń wykonanych, a także aktualnie realizowanych badań, śledzenie wyników tych prac oraz wyrażanie własnych opinii w ramach konsultacji społecznych *on-line*, co zapewnia występowanie pętli sprzężenia zwrotnego. Promocję wyników badań oraz szerokie wykorzystanie elektronicznych narzędzi, takich jak strona internetowa, bazy danych o technologiach kształtowania własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich i biomedycznych oraz produktach, do których mogą być zastosowane, a także konferencje, warsztaty i seminaria zapewnią dostęp do wyników badań bardzo szerokiemu gronu użytkowników.

Rozszerzenie celów e-foresightu na sferę aplikacji i implementacji wiedzy o wyselekcjonowanych technologiach kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich i generalnie technologiach procesów materiałowych i przetwórstwa materiałów inżynierskich, głównie w przemyśle maszynowym i elektrotechnicznym, jest zapewnione przez opracowaną koncepcję centrum **e-transferu technologii** [99, 161, 175] i zadań towarzyszących temu procesowi. Związki pomiędzy procesami e-foresightu a e-transferu technologii przedstawiono schematycznie na rysunku 41. Celem tych działań jest praktyczna

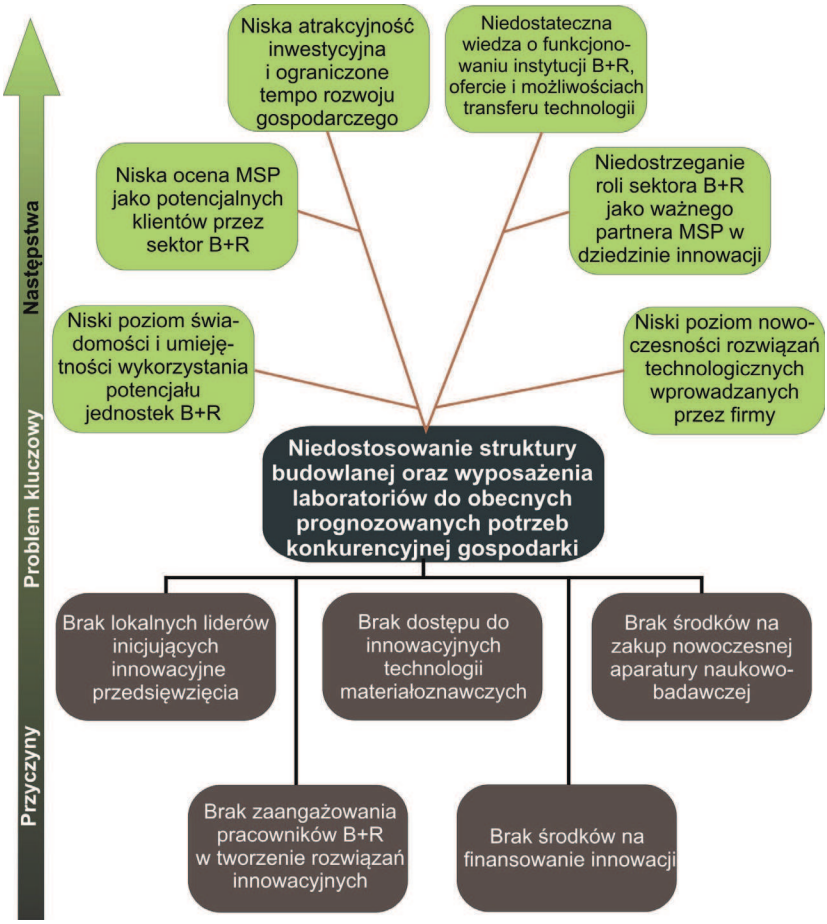


Rysunek 41. *Proces e-foresightu a e-transfer technologii [99, 161, 175]; OW – organizacja wirtualna, SN –sieci neuronowe, PI – platforma internetowa*

implementacja nowoczesnych technologii w wymienionym zakresie przez małe i średnie firmy, co ma zapewniać podniesienie ich innowacyjności i konkurencyjności. Nowe centrum transferu technologii ma być grupą Pracowni i Zespołów Tematycznych. Poszczególne Zespoły będą realizować zadania polegające na transferze technologii, jednak bez świadczenia usług i dedykowania ofert konkretnym przedsiębiorstwom, udostępniając bezpłatnie, na odpowiednio opracowanej platformie internetowej, informacje i wiedzę dotyczącą materiałów inżynierskich oraz technologii procesów materiałowych i obróbki powierzchni, wynikające z wykonanych badań e-foresightowych oraz bieżącego monitorowania problemów materiałoznawczych. Zadania te określono jako e-transfer technologii bądź też elektroniczny transfer technologii (ang.: *technology electronic transfer*), który ma być realizowany na bieżąco, bez żadnych ograniczeń i bezpłatnie, z wykorzystaniem ogólnodostępnej (*Open Access*) platformy internetowej. Rola pierwszego Zespołu polega na doradztwie, sprowadzającym się do możliwości swobodnego i nieograniczonego korzystania przez zainteresowane podmioty z udostępnionych na odpowiednich stronach platformy map drogowych i kart informacyjnych, dotyczących priorytetowych innowacyjnych technologii inżynierii powierzchni materiałów, które będą systematycznie uzupełniane o najnowsze wyniki badań. Działalność kolejnego Zespołu, realizującego funkcję e-szkolenia również zgodnie z formułą *Open Access*, ma polegać na udostępnieniu *on-line* stosownych materiałów szkoleniowych i zapewnieniu beneficjentom możliwości samooceny stanu wiedzy, dotyczącej technicznego doboru materiałów inżynierskich oraz technologii procesów materiałowych i obróbki powierzchni z wykorzystaniem dedykowanych temu zadaniu kart samooceny wiedzy. Beneficjent, biorący udział w e-szkoleniu, w pierwszej kolejności dokonuje wstępnej samooceny poziomu wiedzy na podstawie generowanych systemowo wyników wypełnionego przez niego testu, pobiera dostępne *on-line* materiały szkoleniowe i po przestudiowaniu zalecanych opracowań ponownie dokonuje samooceny dla określania poczynionych postępów. Cykl ten może być wielokrotnie powtórzony aż do osiągnięcia rezultatów satysfakcjonujących beneficjenta. Zespół informacyjny ma być natomiast skupiony na przekazywaniu w trybie otwartym e-informacji o rozwoju zasobów platformy internetowej i podejmowanych inicjatywach e-transferu technologii oraz możliwościach adaptacji nowoczesnych technologii przez małe i średnie przedsiębiorstwa. Podstawą funkcji doradczych, szkoleniowych i informacyjnych, jako istoty e-transferu technologii, będą specjalistyczne badania materiałoznawcze wykonywane w Pracowniach tematycznych, realizujących prace badawcze, zgodnie z trendami i kierunkami rozwoju

wytyczonymi w drodze badań e-foresightowych oraz monitorowanie problemów, do realizacji których planuje się wykorzystanie specjalistycznej aparatury naukowo-badawczej. Przedstawione na rysunku 42 *drzewo problemów* wskazuje przyczyny determinujące problem kluczowy oraz precyzuje przewidywane konsekwencje zaistniałych zdarzeń w skali kraju, choć z dużą dozą prawdopodobieństwa można przypuszczać, że podobne zagadnienia są rozpatrywane także w skali Europy, a nawet Świata.

Nowatorska koncepcja e-transferu technologii, związana z e-doradztwem, e-szkoleniem i e-informacją, wspierana własnymi badaniami naukowymi w zakresie tematyki wynikającej z przeprowadzonych uprzednio badań e-foresightowych i monitoringu aktualnych problemów będących podstawą e-transferu technologii, będzie rozwijana i stanowi istotny wkład w rozwój



Rysunek 42. *Drzewo problemów [175]*

nauki o komputerowo wspomaganym zarządzaniu wiedzą. Zaproponowane podejście umożliwi praktyczną implementację wykonanych badań materiałoznawczo-heurystycznych w przemyśle. Synergiczne oddziaływanie obu koncepcji e-foresightu oraz e-transferu technologii tworzy pełny i zintegrowany system predykcji rozwoju technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych oraz implementacji wyników tych badań w szerokim środowisku menadżerów i inżynierów zatrudnionych w jednostkach przemysłowych. Zgodnie z przyjętymi założeniami koncepcyjnymi, każdy zainteresowany, w dowolnym momencie i bez jakichkolwiek ograniczeń, będzie mógł zapoznać się z całością informacji, a monitoring aktualnych problemów, jako jedynie pośrednia forma interakcji z przedsiębiorstwami, ma umożliwić ukierunkowanie prac badawczych na zaspokojenie realnych potrzeb gospodarki opartej na wiedzy i innowacji.

5. Weryfikacja poprawności opracowanej metodologii na podstawie wybranych technologii szczegółowych inżynierii powierzchni materiałów

5.1. Metodyka prezentacji wyników weryfikacji doświadczalnej nowo opracowanej metodologii

Poprawność nowo opracowanej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów zweryfikowano, przy współudziale licznego zespołu współpracowników [90-98, 161, 169-175, 339], na przykładzie ośmiu grup technologii szczegółowych: obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco (*S*1), laserowego przetapiania i wtapiania cząstek węglików w warstwę powierzchniową odlewniczych stopów magnezu (*S*2), fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) powłok na stop miedzi z cynkiem (*S*3), wybranych technologii obróbki cieplno-chemicznej stali (*S*4), nakładania powłok PVD/ CVD na spiekane materiały narzędziowe (*S*5), teksturowania krzemu polikrystalicznego do celów fotowoltaiki (*S*6), wytwarzania spiekanych materiałów gradientowych klasyczną metodą metalurgii proszków (*S*7), wybranych technologii modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich (*S*8), traktując każdy z wymienionych przykładów jako oddzielne studium przypadku (ang. *case study*). Każdorazowo wykonano pełen zestaw badań materiałoznawczych uzasadniających praktyczne pola aplikacyjne, poparte studiami literaturowymi dotyczącymi tych przypadków. Pozwoliło to za każdym razem sformułować wniosek merytoryczny dotyczący perspektyw rozwojowych analizowanych technologii kształtowania struktury i własności warstwy powierzchniowej wybranych materiałów inżynierskich, wytypowanych w tych studiach przypadków. Wyniki ocen formułowanych na podstawie klasycznych badań materiałoznawczych porównano z ocenami perspektyw rozwojowych analizowanych technologii odniesionych do wybranych materiałów, opierając się na wynikach uzyskanych z wykorzystaniem opracowanej w ramach niniejszej pracy metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów. Na użytek porównań prowadzonych w niniejszym rozdziale sformułowano następujące **założenie**:

Wyniki klasycznych eksperymentów materiałoznawczych, służących określeniu perspektyw rozwojowych analizowanych grup technologii szczegółowych i wyniki badań heurystycznych, bazujących na opiniach ekspertów, wykonanych zgodnie z nowo opracowaną metodologią, są tożsame i pozwalają na wyciągnięcie analogicznych wniosków.

Wykazanie prawdziwości tak sformułowanego założenia stanowi cel niniejszego rozdziału rozprawy.

Bardzo duży stopień szczegółowości przeprowadzonych prac materiałoznawczo-heurystycznych, dotyczących wybranych priorytetowych innowacyjnych technologii inżynierii powierzchni materiałów i wynikająca z tego duża objętość materiału opracowanego w ramach prac własnych uniemożliwia jednak zaprezentowanie w niniejszej rozprawie pełnych wyników wykonanych badań odrębnie i w całości w odniesieniu do każdego ze studiów przypadku. Zagadnieniu temu zostało poświęcone odrębne kilkusetstronicowe anglojęzyczne opracowanie książkowe [161], seria kilkunastu artykułów, w tym dziewięciu monograficznych, m.in. [90-98, 171-175, 180-188, 339] i kilka rozdziałów w książkach naukowych, np. [99, 169-170], w związku z czym w niniejszej pracy zdecydowano się przedstawić istotę rozpatrywanych zagadnień na reprezentatywnym przykładzie.

Wykorzystując technikę *benchmarkingu* proceduralnego [340], polegającego na implementacji istniejących sprawdzonych procedur/ rozwiązań/ podejść w odniesieniu do innego obszaru tematycznego bądź dziedziny wiedzy, do wyboru reprezentatywnego przykładu, prezentującego zakres wykonanych badań materiałoznawczo-heurystycznych przeprowadzonych w celu weryfikacji poprawności nowo opracowanej metodologii, zastosowano opisaną w podrozdziale 4.1 niniejszej pracy dendrologiczną macierz wartości technologii [181, 184]. Macierz dendrologiczna, umożliwiająca graficzną prezentację wyników analizy preferencji przeprowadzonej na podstawie metody punktacji ważonej, cechując się uniwersalnością i oryginalną formułą, może być zastosowana w różnych obszarach zarządzania wiedzą i informacją, gdy zachodzi konieczność przekształcenia ukrytej wiedzy jakościowej dostępnej jedynie ekspertom/ specjalistom w otwartą wiedzę ilościową możliwą do prezentacji z użyciem metod i narzędzi analitycznych. Zagadnienie to pojawia się wielokrotnie w badaniach naukowych, zwykle na ich początkowym i/lub końcowym etapie. Na etapie planowania zakresu badań często istnieje konieczność wyboru szczegółowej tematyki badawczej z bardzo obszernego zakresu dyscypliny lub specjalności naukowej, gdy z oczywistych powodów, jakimi są ograniczenia sprzętowe i czasowe, niemożliwe jest objęcie szczegółowymi badaniami, zwłaszcza eksperymentalnymi, wszystkich nasuwających się aspektów. Problem powraca zwykle na etapie opracowywania końcowych wyników badań, gdy z uwagi na ograniczoną objętość publikacji, z szerokiego spektrum wykonanych badań należy wybrać do prezentacji tylko niektóre, najważniejsze, najbardziej reprezentatywne bądź kluczowe dla całości prowadzonych rozważań, jak ma to miejsce w przypadku niniejszej pracy. Zastosowanie macierzy dendrologicznej, w celu zobiektywizowanego wyboru zakresu planowanych badań lub prezentowanych wyników badań, jest rozsądną alternatywą do metody wyboru losowego.

Uniwersalność i elastyczność prezentowanego podejścia potwierdza jego udane zastosowanie do rozwiązania problemów naukowych dotyczących różnych obszarów tematycznych. Przykładowo, metodę tę zastosowano w pracy habilitacyjnej [341] w obszarze inżynierii dentystycznej do analizy grup protez, w tym protez konwencjonalnych klasycznych i podścielanych miękkim materiałem, protez utrzymywanych na jednym lub dwóch implantach różniących się ponadto typem złączy (komercyjne, silikonowe) i implantoprotez sztywnopodpartych, w celu wytypowania grup protez poddanych szczegółowym badaniom z użyciem metody elementów skończonych (MES). Znalazła ona także zastosowanie w pracach doktorskich dotyczących biomateriałów do analizy porównawczej postaci geometrycznych wewnątrzustrojowych protez przełyku [342] oraz do oceny atrakcyjności technik opracowania kanałów korzeniowych, materiału do wypełniania kanału korzeniowego, technik obturacji kanału korzeniowego i metod oceny szczelności wypełnień kanałów korzeniowych [343]. Prezentowane podejście zaimplementowano również w obszarze nanomateriałów do oceny perspektyw związanych z wytwarzaniem, charakterystyką oraz modelowaniem struktury, własności i technologii wytwarzania nowej generacji wysoko innowacyjnych rozwiniętych porowatych i kompozytowych funkcjonalnych materiałów nanostrukturalnych z nanowłóknami [344].

Analiza preferencji jest podejściem badawczym polegającym na kwalifikowaniu obiektów w ustalonej skali, czego wyrazem jest hierarchia ważności obiektów, którą przedstawia w sposób uporządkowany szereg preferencyjny [345]. Do podstawowych metod analizy preferencji należy metoda rangowania, polegająca na ustaleniu ważności obiektu w danym zbiorze pod względem ustalonych aspektów preferencyjnych, oraz metoda punktacji, polegająca na ocenie obiektów za pomocą punktów w dowolnej skali liczb rzeczywistych [346]. Do określenia wartości poszczególnych grup technologii, pod kątem przydatności do prezentacji w rozprawie, zastosowano metodę punktacji ważonej w celu oceny komparatystycznej, zmierzającej do kwalifikacji przydatności poszczególnych grup technologii w kontekście relacji między nimi. Należy zwrócić uwagę, że opisywana metoda wiąże się z zastosowaniem zasady relatywizacji kryteriów oceny, czyli założeniem różnic w istotności stosowanych kryteriów oraz zasady dopuszczalności, zakładającej określoną zbiorowość warunków dopuszczalności, stanowiącą filtr selekcyjny kwalifikujący pozytywnie lub negatywnie dany obiekt [347]. Metoda punktacji ważonej umożliwia przeprowadzenie wielokryterialnej oceny agregatowej z wykorzystaniem skali przedziałowej. W prowadzonych badaniach zastosowano jednobiegunową skalę dodatnią bez zera, zwaną uniwersalną skalą stanów względnych, zaprezentowaną w podrozdziale 3.2 niniejszej pracy.

W celu wyboru reprezentatywnego przykładu grupy technologii szczegółowych do prezentacji w rozprawie przyjęto szczegółowe kryteria oceny atrakcyjności i potencjału rozpatrywanych grup technologii szczegółowych (tabl. 10) i wprowadzono ich gradację, przypisując określone wagi poszczególnym kryteriom, a następnie obliczono wartości ważone w odniesieniu do poszczególnych kryteriów, które zsumowano otrzymawszy wartości będące podstawą analizy porównawczej, co przedstawiono w tablicy 11. Następnie wykorzystując dendrologiczną macierz atrakcyjności technologii, otrzymane wyniki zaprezentowano w formie graficznej (rys. 43). Przeprowadzona analiza preferencji wykazuje, że najwyższą ocenę ważoną, wziąwszy pod uwagę przyjęte kryteria, otrzymuje, oznaczona na rysunku 43 kolorem zielonym, grupa technologii *S*1, odpowiadająca obróbce laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco i jako taka właśnie ona jest szczegółowo scharakteryzowana w kolejnym podrozdziale niniejszej rozprawy. Syntetyczne wyniki dotyczące pozostałych siedmiu grup technologii szczegółowych poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym,

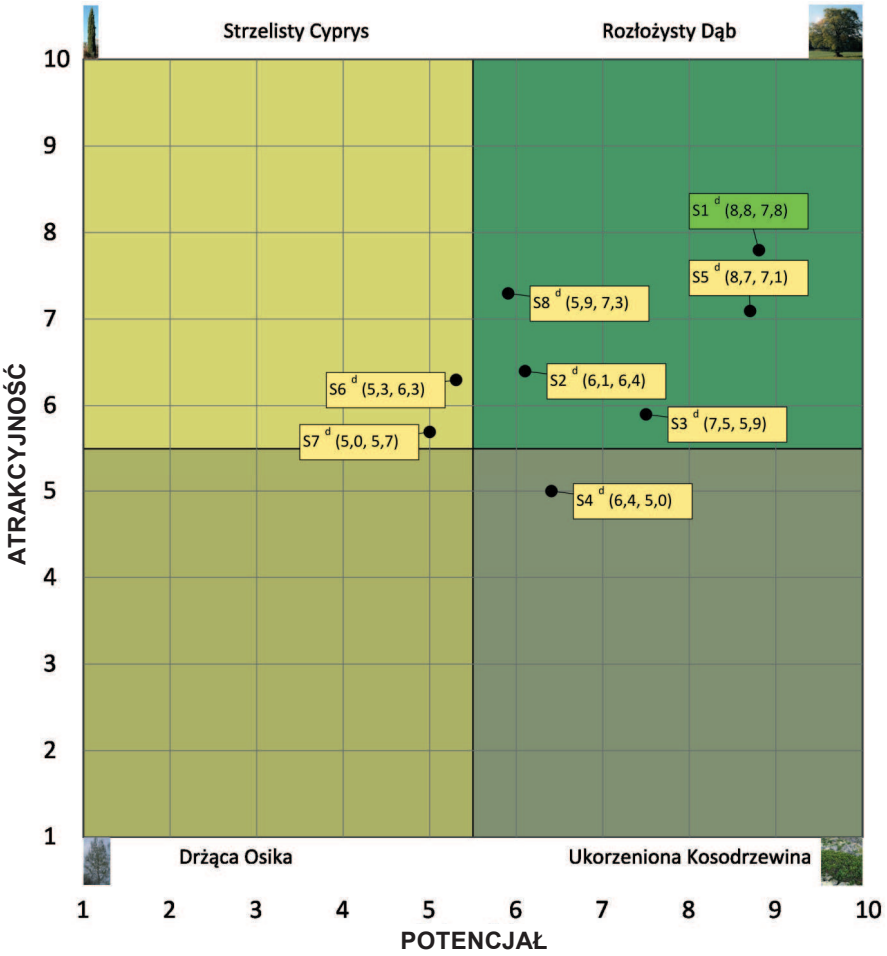
Tablica 10. *Szczegółowe kryteria oceny potencjału i atrakcyjności grup technologii poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym w celu weryfikacji poprawności nowo opracowanej metodologii*

	Potencjał	**Waga**
Kryterium 1	Liczba analizowanych technologii szczegółowych	0,1
Kryterium 2	Zakres badań materiałograficznych stanowiących wyniki badań materiałoznawczych	0,2
Kryterium 3	Zakres zestawień liczbowych stanowiących wyniki badań materiałoznawczych	0,2
Kryterium 4	Zróżnicowanie wyników badań heurystycznych	0,2
Kryterium 5	Stopień jednorodności otrzymanych wyników badań umożliwiający dokonanie analizy porównawczej	0,3
	Atrakcyjność	**Waga**
Kryterium 1	Aktualna aplikacyjność w warunkach przemysłowych	0,1
Kryterium 2	Perspektywy aplikacyjności w przemyśle na tle innych technologii inżynierii powierzchni materiałów w oparciu o wyniki wykonanego e-foresightu [159]	0,3
Kryterium 3	Perspektywy dalszych prac naukowo-badawczych na tle innych technologii inżynierii powierzchni materiałów w oparciu o wyniki wykonanego e-foresightu [159]	0,3
Kryterium 4	Dokonania Uczelni w analizowanym obszarze mierzone liczbą wykonanych badań i publikacji z danego zakresu	0,2
Kryterium 5	Możliwość dokonania uogólnień i wysnucia szerszych wniosków	0,1

Tablica 11. *Wyniki analizy wielokryterialnej grup technologii szczegółowych poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym*

Symbol	Grupa technologii szczegółowych	Potencjał						Atrakcyjność					
		Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5	Średnia ważona	Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5	Średnia ważona
*S*1	Obróbka laserowa stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco	0,9	1,6	1,6	2	2,7	8,8	0,7	2,4	2,1	1,8	0,8	7,8
*S*2	Obróbka laserowa odlewniczych stopów magnezu	0,6	1,6	1,2	0,6	2,1	6,1	O,3	1,5	2,1	1,6	0,9	6,4
*S*3	Fizyczne osadzanie z fazy gazowej powłok na stop miedzi z cynkiem	0,4	1,6	1,6	1,2	2,7	7,5	0,3	1,5	1,8	1,4	0,9	5,9
*S*4	Wybrane technologie obróbki cieplno-chemicznej stali	0,4	1,6	1,6	1,6	1,2	6,4	1,0	0,9	0,3	2,0	0,8	5,0
*S*5	Nakładanie powłok PVD/CVD na spiekane materiały narzędziowe	1,0	1,6	1,8	1,6	2,7	8,7	0,7	1,8	1,8	1,8	1,0	7,1
*S*6	Teksturowanie krzemu polikrystalicznego do celów fotowoltaiki	0,4	1,0	0,8	1,6	1,5	5,3	0,2	1,5	2,4	1,2	1,0	6,3
*S*7	Wytwarzanie spiekanych materiałów gradientowych klasyczną metodą metalurgii proszków	0,4	1,0	1,2	1,2	1,2	5,0	0,1	1,5	1,5	1,8	,8	5,7
*S*8	Wybrane technologie modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich	0,6	0,8	1,4	1,6	1,5	5,9	0,7	2,4	1,8	1,6	0,8	7,3

analogicznym do przedstawionego szczegółowo reprezentatywnego przykładu, zamieszczono w podrozdziale 5.3 niniejszej pracy, lecz w znacznie większym uproszczeniu. Uogólniony opis zawiera krótką charakterystykę wpływu zastosowanej metody obróbki powierzchniowej na strukturę i własności badanych materiałów inżynierskich oraz pozycje strategiczne przeanalizowanych technologii lub ich grup na tle innych technologii i otoczenia dalszego, zwizualizowane z użyciem macierzy strategii kontekstowych wraz z krótkim opisem możliwości ich praktycznej aplikacji i prognozowanych kierunków rozwoju strategicznego.



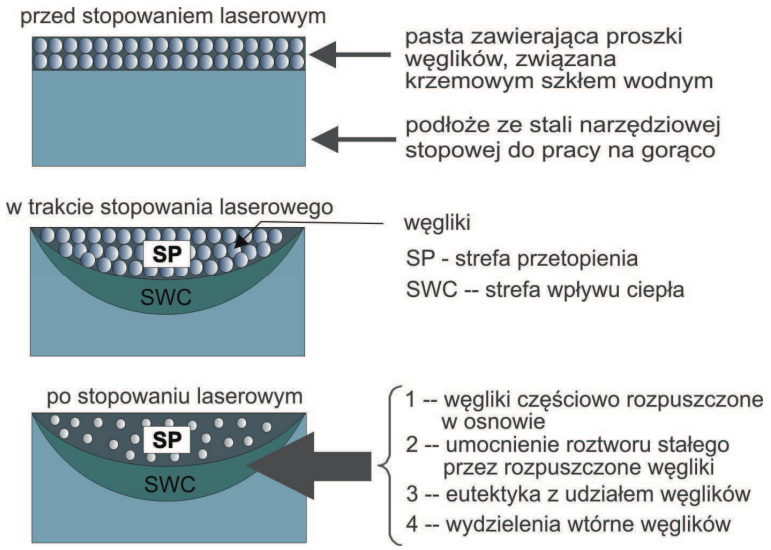
Rysunek 43. *Pozycjonowanie technologii szczegółowych poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym z wykorzystaniem dendrologicznej macierzy wartości technologii*

5.2. Reprezentatywny przykład implementacji metodologii w odniesieniu do obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco

Wybrany przykład to obróbka laserowa stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco. Wyboru przykładu do prezentacji dokonano na podstawie wyników analizy przeprowadzonej z wykorzystaniem macierzy dendrologicznej, co samo w sobie stanowi prezentację uniwersalności metody opracowanej w niniejszej pracy i możliwości jej zastosowania do rozwiązania odrębnego zagadnienia dotyczącego zarządzania wiedzą i informacją, różnego od zasadniczo poruszanego w pracy.

S1 Obróbka laserowa stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco

Wśród różnych procesów obróbki powierzchniowej oraz wytwarzania materiałów gradientowych istotną rolę odgrywają metody powierzchniowej obróbki laserowej. Metody te opisano zarówno w światowej [20, 117, 204, 205, 217], jak i krajowej [57, 116, 278] literaturze w odniesieniu do różnorodnych materiałów inżynierskich oraz w pracach własnych Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach [95, 219, 240, 250, 256, 257, 348]. Laserowe przetapianie warstw wierzchnich materiałów służy głównie kształtowaniu ich struktury i własności, co ma miejsce w procesie wytworzenia jednorodnej chemicznie, drobnokrystalicznej warstwy wierzchniej bez zmiany składu chemicznego materiału. Stopowanie laserowe polega natomiast na polepszeniu własności mechanicznych i użytkowych materiału w wyniku umocnienia jego warstwy wierzchniej pierwiastkami stopowymi z częściowo rozpuszczonych cząstek twardych faz węglików, tlenków lub azotków. Przewagę laserowej obróbki powierzchniowej nad innymi metodami inżynierii powierzchni stanowią: krótki czas procesu, elastyczność i precyzja wykonania operacji technologicznych możliwych do realizacji na różnych typach materiałów, od trudno obrabialnych poprzez miękkie, na kruchych



***Rysunek 44**. Schemat wariantów zmian strukturalnych zachodzących w warstwie powierzchniowej stali narzędziowych stopowych do pracy na gorąco przetapianych, stopowanych i wtapianych laserowo proszkami faz międzymetalicznych [99, 345, 349]*

skończywszy, z wydajnością i dokładnością niejednokrotnie znacznie przewyższającą inne stosowane obecnie metody [34, 60, 61, 97, 143, 146, 147, 174, 253, 258]. Możliwość precyzyjnej regulacji warunków procesu, takich jak: prędkość skanowania powierzchni przez wiązkę laserową i jej moc, rodzaj i grubość materiału stopującego i/lub osłona gazowa, pozwala na otrzymanie warstwy stopowanej o przewidywanych własnościach, zależnych od warunków eksploatacji.

Stale stopowe narzędziowe do pracy na gorąco stanowią wciąż szeroko stosowaną grupę materiałów narzędziowych, szczególnie interesującą ze względu na ich relatywnie niską cenę oraz bardzo dobre własności użytkowe. W celu polepszenia tych własności tradycyjnie stosowano obróbkę cieplną, cieplno-chemiczną bądź cieplno-mechaniczną. Atrakcyjną alternatywą jest laserowa obróbka warstw wierzchnich stali narzędziowych stopowych do pracy na gorąco w celu poprawy ich własności użytkowych, zwłaszcza twardości i odporności na ścieranie. Rysunek 44 przedstawia schematycznie mechanizmy decydujące o umocnieniu stali obrabianych laserowo. Przetapianie i/ lub stopowanie laserowe dzięki swoim zaletom, głównie dużej gęstości mocy promieniowania laserowego, która umożliwia precyzyjne nagrzewanie i kontrolowane chłodzenie niewielkiej objętości materiału, cieszy się coraz większym zainteresowaniem w wielu ośrodkach badawczych i przemysłowych w kraju [90, 92, 125, 144, 145, 169, 170, 251, 252, 254, 255] i na świecie [61, 218]. Utrzymujące się znaczenie przemysłowe stali stopowych narzędziowych do pracy na gorąco wraz z zaletami laserowej obróbki powierzchniowej stanowiły podstawę wykonania serii interdyscyplinarnych badań materiałoznawczo-heurystycznych [92, 97, 161] w celu wyznaczenia wpływu warunków przetapiania i/lub stopowania na rozdrobnienie struktury oraz własności mechaniczne i użytkowe warstwy wierzchniej, a także – określenia wartości technologii laserowej obróbki powierzchniowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco na tle mikro- i makrootoczenia.

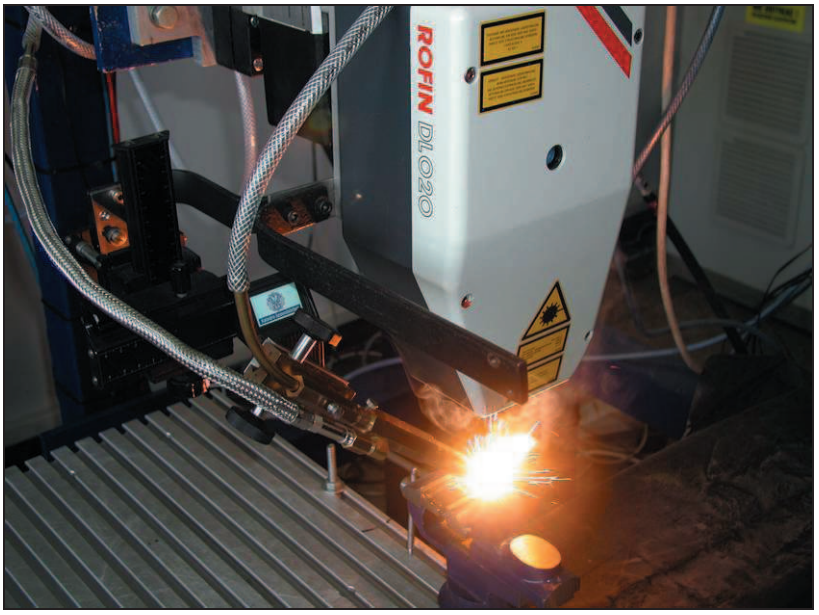
Badania wykonano na próbkach ze stali narzędziowych stopowych X40CrMoV5-1 oraz 32CrMoV12-28 do pracy na gorąco, o składzie chemicznym podanym w tablicy 12. Po

Tablica 12. *Skład chemiczny badanych stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco*

Gatunek stali	Stężenie masowe pierwiastków								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	Mo	V
X40CrMoV5-1	0,41	0,44	1,09	0,015	0,010	5,40	0,01	1,41	0,95
32CrMoV12-28	0,31	0,37	0,25	0,020	0,002	2,95	–	2,70	0,54

wytopieniu w próżniowym piecu elektrycznym przy ciśnieniu ok. 1 Pa ze stali odlano ok. 250 kg wlewki i poddano je kuciu wstępnemu na pręty o średnicy 76 mm i długości 3 m, które następnie wyżarzono zmiękczająco w celu zapewnienia dobrej obrabialności i równomiernego rozkładu węglików w osnowie. Metodami obróbki skrawaniem wykonano próbki, które poddano standardowej obróbce cieplnej składającej się z hartowania i dwukrotnego odpuszczania. Austenityzowanie stali X40CrMoV5-1 wykonano w piecu próżniowym w temperaturze 1020°C przez 30 minut, stosując przy podgrzewaniu dwa 30-minutowe przystanki izotermiczne w 640 i 840°C. Po hartowaniu próbki odpuszczano dwukrotnie, każdorazowo przez 2 h, w temperaturze 560 i 510ºC. Austenityzowanie stali 32CrMoV12-28 wykonano w temperaturze 1040ºC przez 30 minut, stosując dwa przystanki izotermiczne w 585 i 850ºC. Po hartowaniu zastosowano dwukrotne odpuszczanie przez 2 h w temperaturze 550 i 510ºC. Po obróbce cieplnej próbki piaskowano i poddano obróbce mechanicznej na szlifierce magnetycznej, zwracając szczególną uwagę, by nie dopuścić do powstania pęknięć, uniemożliwiających wykorzystanie próbek do dalszych badań.

Obróbkę powierzchniową badanych stali wykonano z użyciem lasera diodowego dużej mocy HPDL ROFIN DL 020 (rys. 45), którego dane techniczne przedstawiono w tablicy 13.



***Rysunek 45**. Laser diodowy dużej mocy HPDL ROFIN DL 020 w czasie pracy użyty do powierzchniowej obróbki laserowej badanych stali [92]*

***Tablica 13**. Parametry techniczne lasera diodowego dużej mocy HPDL ROFIN DL 020*

Parametr	Wartość
Długość fali promieniowania laserowego, nm	808±5
Moc wyjściowa wiązki laserowej (promieniowanie ciągłe), W	2300
Zakres mocy, W	100-2300
Długość ogniskowa wiązki laserowej, mm	82, 32
Wymiary ogniska wiązki laserowej, mm	1,8 x 6,8, 1,8 x 3,8
Zakres gęstości mocy w płaszczyźnie ogniska wiązki laserowej, kW/cm^2	0,8-36,5

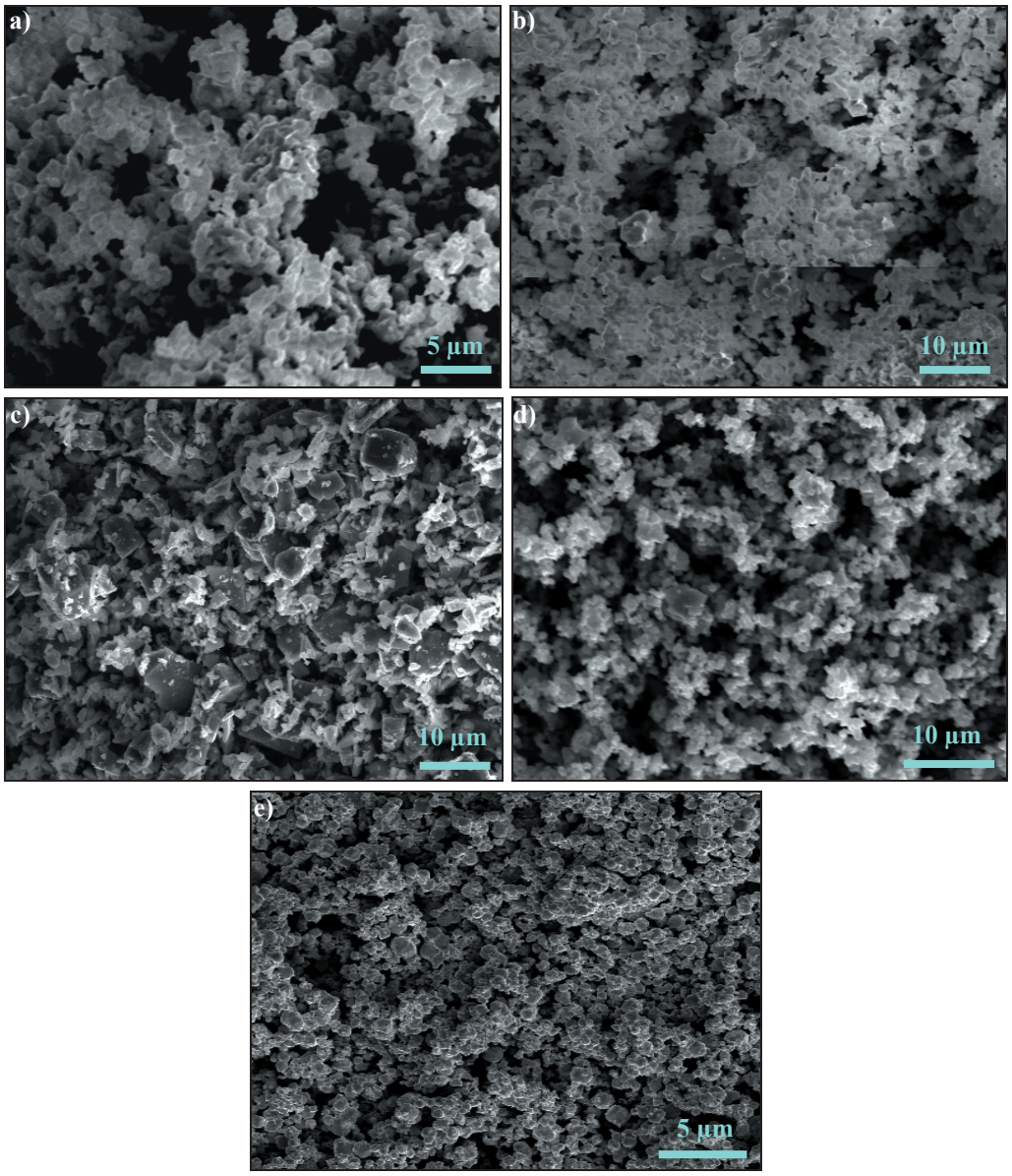
Procesy laserowej obróbki powierzchniowej wykonano przy stałej prędkości zapewniającej ich stabilność, wynoszącej 0,5 m/min, zmieniając moc wiązki laserowej w zakresie 1,2-2,3 kW, z zastosowaniem atmosfery ochronnej argonu o objętości 20 dm^3/min wdmuchiwanego przez dyszę o średnicy 12 mm.

Powierzchniowa obróbka laserowa stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28 obejmowała przetapianie laserowe bez użycia proszków oraz przetapianie i stopowanie proszkami węglików niobu, tantalu, tytanu, wanadu i wolframu. Na odtłuszczone powierzchnie próbek nałożono proszkowe powłoki o grubości 0,05 mm, w postaci pasty zawierającej węgliki związane lepiszczem nieorganicznym – krzemowym szkłem wodnym Na_4SiO_4+$Na_2Si_2O_5$. Własności proszków zastosowanych do badań przedstawiono w tablicy 14, natomiast na rysunkach 46a-e zaprezentowano ich zdjęcia wykonane z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).

Wykonano eksperymenty materiałoznawcze: badania strukturalne, własności mechanicznych, innych własności fizycznych oraz własności użytkowych stali X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28 przetopionych oraz przetopionych i stopowanych laserowo, których zakres wraz z wykazem

***Tablica 14**. Własności proszków węglików użytych do badań*

Własności proszków	NbC	TaC	TiC	VC	WC
Twardość HV, GPa	1800	1600	3200	2600	2400
Temperatura topnienia, °C	3480-3610	3780-3985	3065-3180	2650-2830	2730-2870
Gęstość, g/cm^3	7,60	14,50	4,94	5,81	15,77
Współczynnik rozszerzalności cieplnej α, 10^{-6}·K^{-1}	7,6	7,8	8,3	7,5	23,8



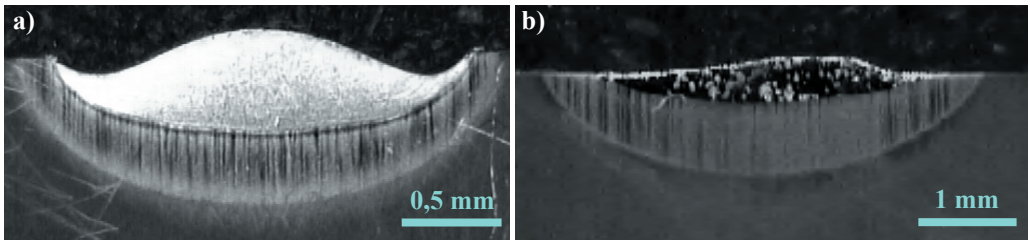
Rysunek 46. *Proszki: a) NbC, b) TaC, c) TiC, d) VC, e) WC, zastosowane w procesie stopowania laserowego stali X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28; skaningowy mikroskop elektronowy[92, 97]*

wykorzystanej aparatury naukowo-badawczej zestawiono w tablicy 15, stanowiącej rozszerzony i uszczegółowiony wyciąg z ogólnej metodyki badań materiałoznawczych opisanej w podrozdziale 3.3 niniejszej pracy.

***Tablica 15**. Szczegółowy zakres wykonanych badań materiałoznawczych wraz z wykazem aparatury naukowo-badawczej zastosowanej do badań*

Rodzaj badania	Aparatura naukowo-badawcza
Badania strukturalne	
Badania matariałograficzne materiałów po laserowej obróbce powierzchniowej, proszków do badań i powierzchni zarysowanej	Mikroskop świetlny Leica MEF4A sprzężony z komputerowym analizatorem obrazu Leica-Qwin; SEM DSM-940 firmy Opton
Pomiary w mikroskali: głębokości strefy przetopienia i wpływu ciepła, szerokości lica ściegu, głębokości pęknięć	Mikroskop świetlny Leica MEF4A sprzężony z komputerowym analizatorem obrazu Leica-Qwin
Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego pierwiastków po obróbce powierzchniowej, ilościowa i jakościowa	Skaningowy mikroskop elektronowy DSM-940, Opton wyposażony w spektrometr energii EDS LINK ISIS firmy Oxford
Badania dyfrakcyjne i obserwacje struktury cienkich folii stali X40CrMoV5-1 po stopowaniu NbC i stali 32CrMoV12-28 po stopowaniu VC	Transmisyjny mikroskop elektronowy JEM 3010UHR firmy JEOL
Badania własności mechanicznych	
Badania twardości metodą Rockwella w skali C	Twardościomierz firmy Zwick ZHR 4150TK
Badania mikrotwardości statyczną metodą Vickersa	Ultramikrotwardościomierz DUH 202 firmy Shimadzu
Badania innych własności fizycznych	
Badania średniego arytmetycznego odchylenia profilu od linii średniej R_a (chropowatości)	Profilometr Sutronic 3+ firmy Taylor Hobson
Badania własności użytkowych	
Badania odporności na zużycie ścierne metodą metal-proszek ceramiczny (względny procent ubytku masy próbki)	Stanowisko pomiarowe do prowadzenia testu ścieralności zgodnego z amerykańską normą ASTM G65
Badania odporności na zmęczenie cieplne (głębokość pęknięć)	Urządzenie nagrzewające indukcyjnie obracające się próbki chłodzone wodą

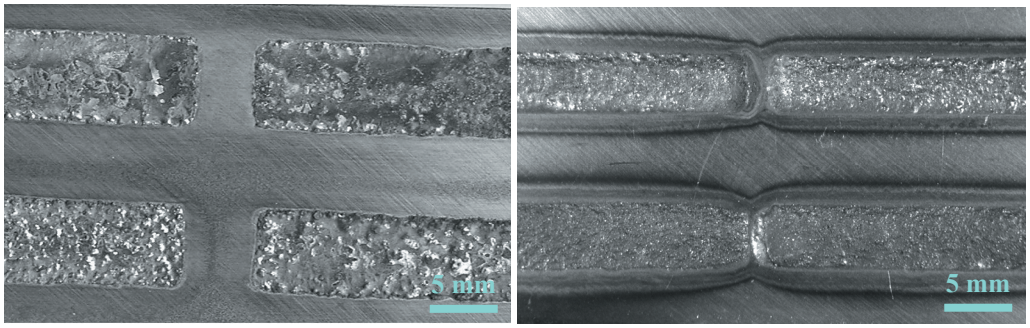
Przetapianie laserowe badanych stali w warstwie wierzchniej skutkuje utworzeniem strefy przetopienia (SP) oraz strefy wpływu ciepła (SWC), których grubość wzrasta wraz ze wzrostem zastosowanej do przetapiania mocy lasera. Przetopienie stali bez użycia proszków węglików powoduje zauważalną, acz nieznaczną poprawę własności warstw wierzchnich badanych stali w porównaniu do ich analogicznych własności uzyskanych w wyniku konwencjonalnej obróbki cieplnej, w zależności od mocy wiązki lasera zastosowanej do przetapiania.



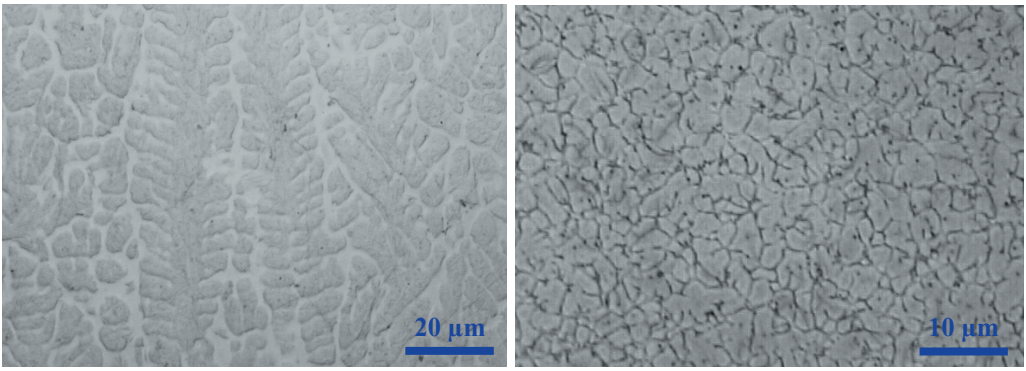
Rysunek 47. *Warstwa wierzchnia po stopowaniu laserowym stali: a) X40CrMoV5-1 węglikiem tantalu, moc lasera 2,3 kW, b) 32CrMoV12-28 węglikiem wolframu, moc lasera 2,0 kW; mikroskop świetlny [92, 97]*

Wprowadzanie do ciekłego jeziorka metalu dodatków stopujących w postaci proszków węglików powoduje natomiast istotną poprawę własności mechanicznych i użytkowych badanych stali, w porównaniu do stali zarówno poddanych konwencjonalnej obróbce cieplnej, jak i przetapianiu laserowemu bez użycia proszków. Na rysunkach 47a, b przedstawiono przykładowe struktury warstwy wierzchniej stali X40CrMoV5-1 po stopowaniu węglikiem tantalu i stali 32CrMoV12-28 po stopowaniu węglikiem wolframu.

Na podstawie badań w mikroskopie świetlnym stwierdzono charakterystyczną topografię oraz kształt lica ściegu powstałego w wyniku przetapiania i stopowania warstw wierzchnich badanych stali do pracy na gorąco laserem diodowym dużej mocy HPDL, w zakresie 1,2-2,3 kW. Na kształt lica wpływają warunki stopowania, zwłaszcza moc wiązki lasera oraz rodzaj materiału stopującego. Na rysunku 48 przedstawiono typowe widoki lica ściegu po laserowym przetopieniu i stopowaniu warstwy wierzchniej stali X40CrMoV5-1 węglikiem wolframu (rys. 48a) i stali 32CrMoV12-28 stopowanej węglikiem wanadu (rys. 48b).

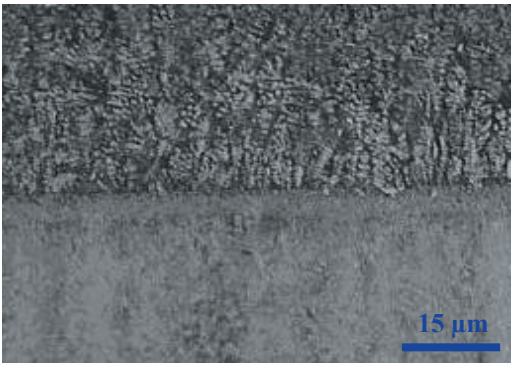


Rysunek 48. *Widok lica po stopowaniu laserowym: a) stali X40CrMoV5-1 węglikiem wolframu, b) stali 32CrMoV12-28 węglikiem wanadu; moc lasera 1,2-2,3 kW; mikroskop świetlny [92, 97]*

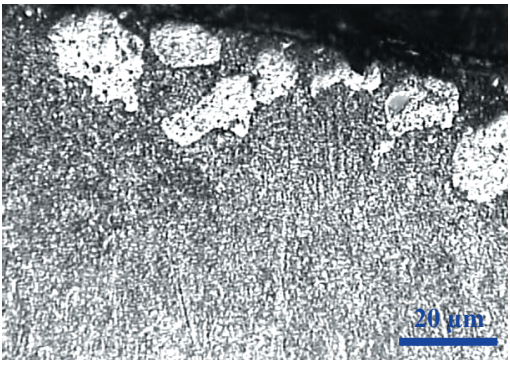


Rysunek 49. *Strefa centralna przetopienia warstwy wierzchniej stali: a) X40CrMoV5-1 po stopowaniu węglikiem tytanu, moc lasera 1,2 kW, b) 32CrMoV12-28 po stopowaniu węglikiem wanadu, moc lasera 2,0 kW; skaningowy mikroskop elektronowy [92, 97]*

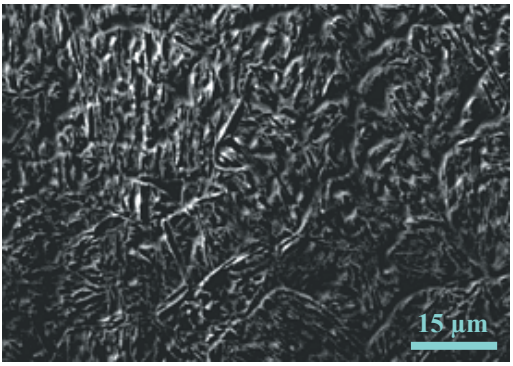
Badania struktury warstwy wierzchniej stali X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28 wykonane w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) wykazują, że stal zarówno po przetopieniu, jak i po stopowaniu laserowym ma w strefie przetopionej strukturę dendrytyczną, charakteryzując się występowaniem obszarów o bardzo zróżnicowanej morfologii (rys. 49-53), co jest związane z procesem krzepnięcia materiału. W obszarze centralnym strefy przetopionej odprowadzanie ciepła następuje we wszystkich kierunkach, a utworzona struktura zbudowana jest z drobnych równoosiowych kryształów z siatką węglików, co prezentują przykładowe fotografie strefy centralnej przetopienia warstwy wierzchniej (rys. 49) analizowanych stali. Bardzo wyraźna zmiana struktury występuje na granicy strefy przetopienia i wpływu ciepła



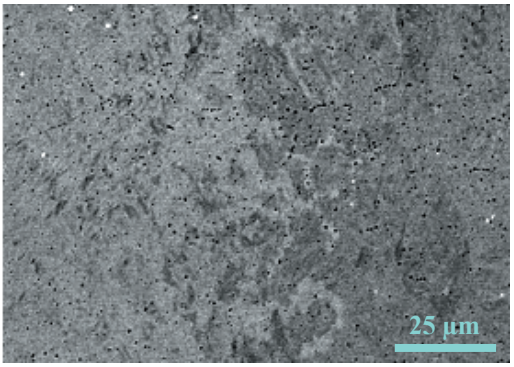
Rysunek 50. *Granica strefy przetopienia warstwy wierzchniej stali X40CrMoV5-1 po stopowaniu NbC; moc lasera 2,3 kW; skaningowy mikroskop elektronowy [92, 97]*



Rysunek 51. *Powierzchnia stali 32CrMoV12-28 po stopowaniu TaC; moc lasera 1,6 kW; skaningowy mikroskop elektronowy [92, 97]*



Rysunek 52. *Warstwa wierzchnia stali po stopowaniu proszkiem węglika wanadu, moc lasera 2,3 kW; skaningowy mikroskop elektronowy [92]*

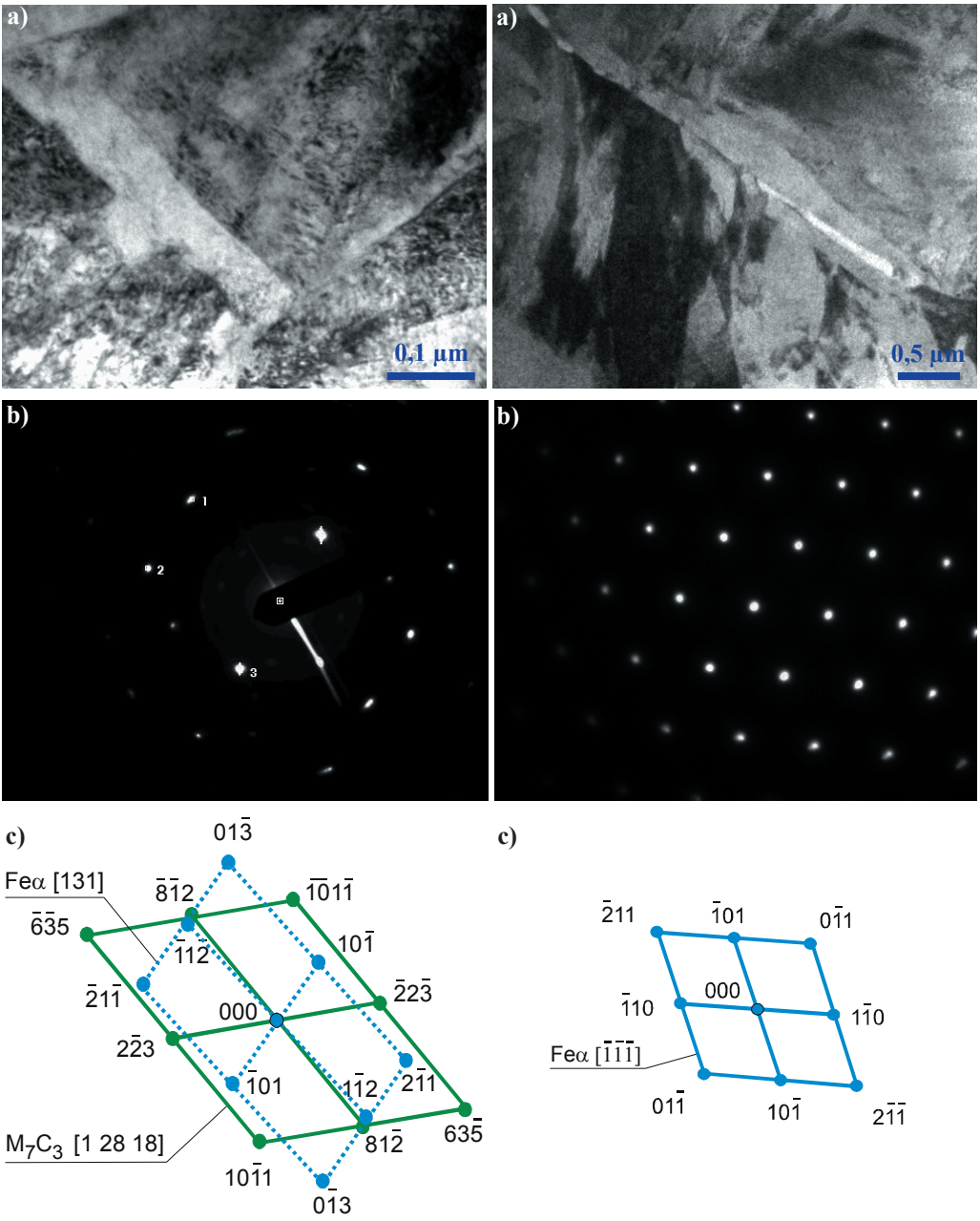


Rysunek 53. *Strefowa budowa warstwy wierzchniej stali X40CrMo5-1 przetopionej laserowo, moc lasera 1,2 kW; skaningowy mikroskop elektronowy [92]*

stali stopowanych proszkami węglików (rys. 50). W pobliżu powierzchni występują w niektórych przypadkach aglomeraty węglików stosowanych w procesie stopowania laserowego (rys. 51). Zmiany struktury spowodowane przetapianiem laserowym (rys. 53) są mniejsze niż po stopowaniu badanych stali z użyciem proszków węglików (rys. 49-52).

Liniowa i punktowa analiza składu chemicznego, z wykorzystaniem spektrometru rozproszonego promieniowania rentgenowskiego wykonana na zgładach poprzecznych warstwy wierzchniej przetapianej i/lub stopowanej laserem o różnej mocy, wykazuje obecność pierwiastków C, Fe, Mn, Si, Cr, W, Mo, V, wchodzących w skład badanych stali X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28 we właściwych dla nich, różniących się od siebie proporcjach. W toku tych badań potwierdzono także obecność w warstwie wierzchniej pierwiastków pochodzących z proszków węglików zastosowanych do stopowania [92].

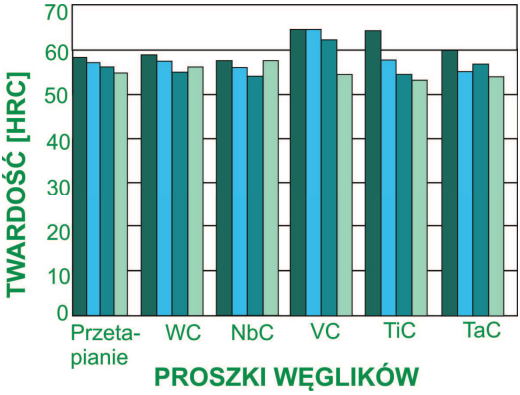
Badania struktury cienkich folii przeprowadzone w transmisyjnym mikroskopie elektronowym (TEM) na próbkach ze stali X40CrMoV5-1 po stopowaniu węglikiem wanadu (rys. 54) oraz 32CrMoV12-28 po stopowaniu węglikiem niobu (rys. 55) wykazują, że osnową warstwy wierzchniej po powierzchniowej obróbce laserowej jest martenzyt listwowy o dużej gęstości dyslokacji. W martenzycie warstwy wierzchniej stali stopowanych laserowo znajdują się również drobne dyspersyjne wydzielenia węglików typu M_3C lub M_7C_3. Wykonane badania potwierdzają obecność w strukturze warstwy wierzchniej stali, przeważnie na granicach ziarn cząstek węglików odpowiednio wanadu i niobu, zastosowanych w procesie stopowania laserowego. Wielkości zaobserwowanych cząstek węglików są mniejsze, niż wynikałoby to



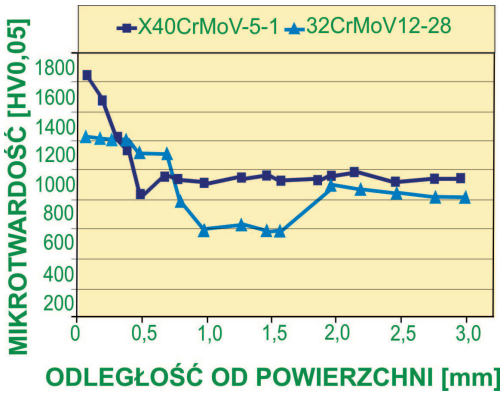
Rysunek 54. *Struktura cienkiej folii*) ze stali X40CrMoV5-1 po stopowaniu węglikiem niobu; moc lasera 2,0 kW*

Rysunek 55. *Struktura cienkiej folii*) ze stali 32CrMoV12-28 po stopowaniu węglikiem wanadu; moc lasera 1,6 kW*

**) a) obraz w polu jasnym, b) dyfraktogram z obszaru jak na rysunku a, c) rozwiązanie dyfraktogramu z rysunku b; transmisyjny mikroskop elektronowy [92, 97]*



Rysunek 56. *Twardość warstwy wierzchniej stali X40CrMoV5-1 przetopionej i stopowanej proszkami węglików w zakresie mocy lasera kolejno: 1,2; 1,6; 2,0 i 2,3 kW*



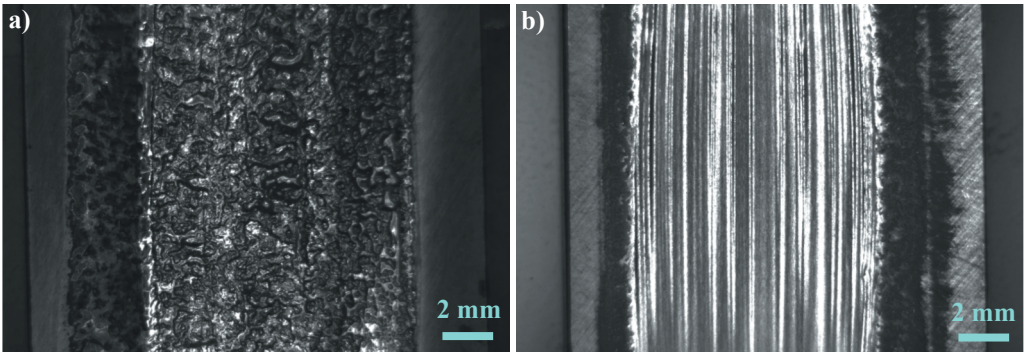
Rysunek 57. *Zmiany mikrotwardości warstwy wierzchniej stali 32CrMoV12-28 stopowanej laserowo proszkiem TaC i X40CrMoV5-1 stopowanej NbC; moc lasera 1,6 kW [92, 99]*

z granulacji proszku węglików zastosowanego do badań, co wskazuje na częściowe rozpuszczenie się cząsteczek proszków węglików w osnowie stali. Podczas stopowania laserowego proszkami węglików może nastąpić częściowe ich rozpuszczenie w ciekłym jeziorku metalu bądź też węgliki pozostają nierozpuszczone, tworząc aglomeraty na skutek wtapiania nierozpuszczonych ziarn proszku węglików w roztopione podłoże metalowe.

W ramach prowadzonych badań materiałoznawczych zbadano także wybrane własności mechaniczne, inne własności fizyczne i własności użytkowe stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco poddanych przetapianiu i/lub stopowaniu laserowemu. W szczególności wykonano pomiary twardości, mikrotwardości, chropowatości, odporności na ścieranie i odporności na zmęczenie cieplne.

W większości przypadków laserowa obróbka powoduje wzrost twardości badanych stali (rys. 56). Twardość warstwy wierzchniej stali uzyskana w wyniku przetapiania wzrasta nieznacznie w porównaniu do twardości stali uzyskanej po konwencjonalnej obróbce cieplnej, natomiast twardość warstwy wierzchniej stopowanej proszkami węglików zwiększa się w istotny sposób wprost proporcjonalnie do mocy lasera i zależy od rodzaju proszków węglików użytych w procesie stopowania.

Podobnie, chropowatość powierzchni stali stopowanych proszkami węglików wzrasta wraz ze zwiększaniem mocy wiązki lasera w całym jej zakresie, co jest wywołane występowaniem silnych prądów konwekcyjnych w ciekłej stali spowodowanych dużą mocą wiązki lasera oraz

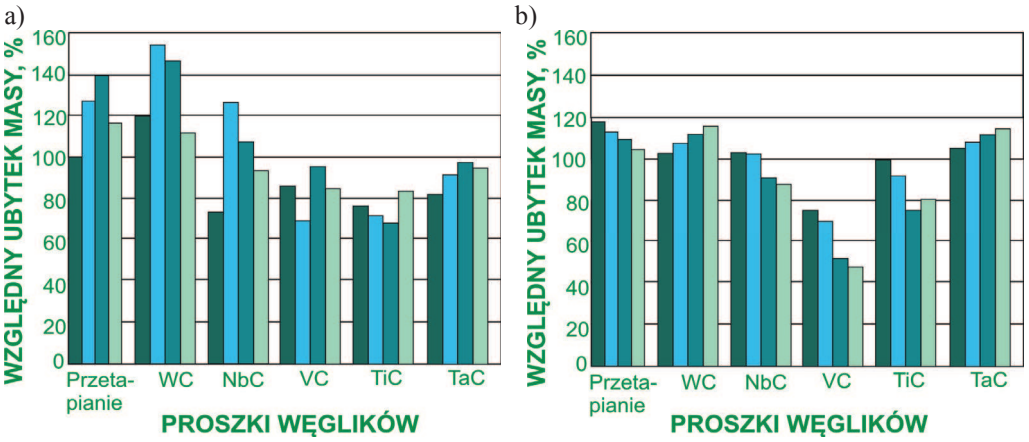


Rysunek 58. *Ślad zużycia warstwy wierzchniej po badaniu ścieralności wg normy ASTM G65 stali: a) X40CrMoV5-1 stopowanej proszkiem wolframu, moc lasera 1,2 kW, b) 32CrMoV12-28 stopowanej proszkiem tytanu, moc lasera 2,0 kW; mikroskop świetlny [92, 97]*

szybką krystalizacją powiązaną z oddziaływaniem strumienia gazu osłonowego. W przypadku zastosowania małych mocy wiązki lasera struktura przetopienia jest stosunkowo jednorodna, jego dno płaskie, natomiast zwiększenie mocy wiązki lasera powoduje wzrost pofalowania dna przetopienia.

Przetapianie i/lub stopowanie laserowe z udziałem proszków węglików wpływa zwykle na wzrost mikrotwardości na przekroju poprzecznym warstwy wierzchniej w funkcji odległości od powierzchni próbek (rys. 57). We wszystkich przypadkach pomiarów mikrotwardości warstwy wierzchniej stali obrobionej cieplnie, przetopionej i/lub stopowanej laserowo stwierdzono także pojawienie się obszaru, w którym zachodzi wyraźny spadek twardości na całej szerokości granicy strefy wpływu ciepła i materiału rodzimego, co następuje w wyniku odpuszczania stali podczas obróbki laserowej, podczas której stal nagrzewa się do temperatury wyższej od temperatury odpuszczania.

Wraz ze wzrostem twardości warstwy wierzchniej po stopowaniu laserowym, wynikającym z rozdrobnienia jej struktury, następuje podwyższenie własności trybologicznych stali. Ślady zużycia warstw wierzchnich stali narzędziowych X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28 po badaniu ścieralności, zgodnie z normą ASTM G65, przedstawiono na rysunku 58. Po próbach ścieralności obliczano względny ubytek masy, przyjmując za 100% ubytek masy próbki ze stali X40CrMoV5-1 przetapianej wiązką lasera o mocy 1,2 kW (rys. 59a) i odpowiednio stali 32CrMoV12-28 – stopowanej proszkiem TiC wiązką lasera o mocy 1,2 kW (rys. 59b). Odporność na zużycie ścierne wzrasta w porównaniu z odpornością stali po standardowej obróbce cieplnej.



Rysunek. 59. *Względny ubytek masy zmierzony po badaniach odporności na zużycie stali a) X40CrMoV5-1, b) 32CrMoV12-28, przetapianych i stopowanych laserowo proszkami węglików w zakresie mocy lasera kolejno: 1,2; 1,6; 2,0 i 2,3 kW [92, 97]*

Odporność na zmęczenie cieplne badanych stali, której miarą jest średnia głębokość pęknięć powstałych podczas nagrzewania indukcyjnego warstwy wierzchniej obracających się próbek chłodzonych wodą [350], w przypadku materiału poddanego wyłącznie przetapianiu laserowemu jest nieznacznie większa od uzyskanej po standardowej obróbce cieplnej, wzrasta natomiast istotnie po stopowaniu proszkami węglików.

Prawidłowo dobrane warunki stopowania, takie jak moc lasera oraz prędkość skanowania pozwalają na uzyskanie wysokiej jakości warstw wierzchnich pozbawionych pęknięć i z regularnym płaskim kształtem lica przetopienia. Wykonane badania, których szczegółowe wyniki zestawiono w tablicy 16, dowodzą, że warstwy wierzchnie uzyskane w wyniku laserowego przetapiania i/lub stopowania proszkami węglików stali X40CrMoV5-1 oraz 32CrMoV12-28 przy użyciu lasera diodowego dużej mocy (HPDL), pracującego w zakresie 1,2-2,3 kW, charakteryzują się wyższymi własnościami mechanicznymi i użytkowymi w porównaniu do stali poddanych konwencjonalnej obróbce cieplnej [251, 252]. Uzyskane wyniki badań materiałoznawczych wskazują zatem na celowość rozwoju technologii laserowej obróbki stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco i uzasadniają rozwój tej technologii w przyszłości.

W celu określenia długoterminowych perspektyw rozwojowych powierzchniowej obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco przeprowadzono także badania heurystyczne z użyciem metodologii nowo opracowanej w niniejszej pracy, przyjmując jako

Tablica 16. *Własności mechaniczne i użytkowe stali narzędziowych stopowych do pracy na gorąco przetapianych i stopowanych z użyciem lasera dużej mocy [97, 99]*

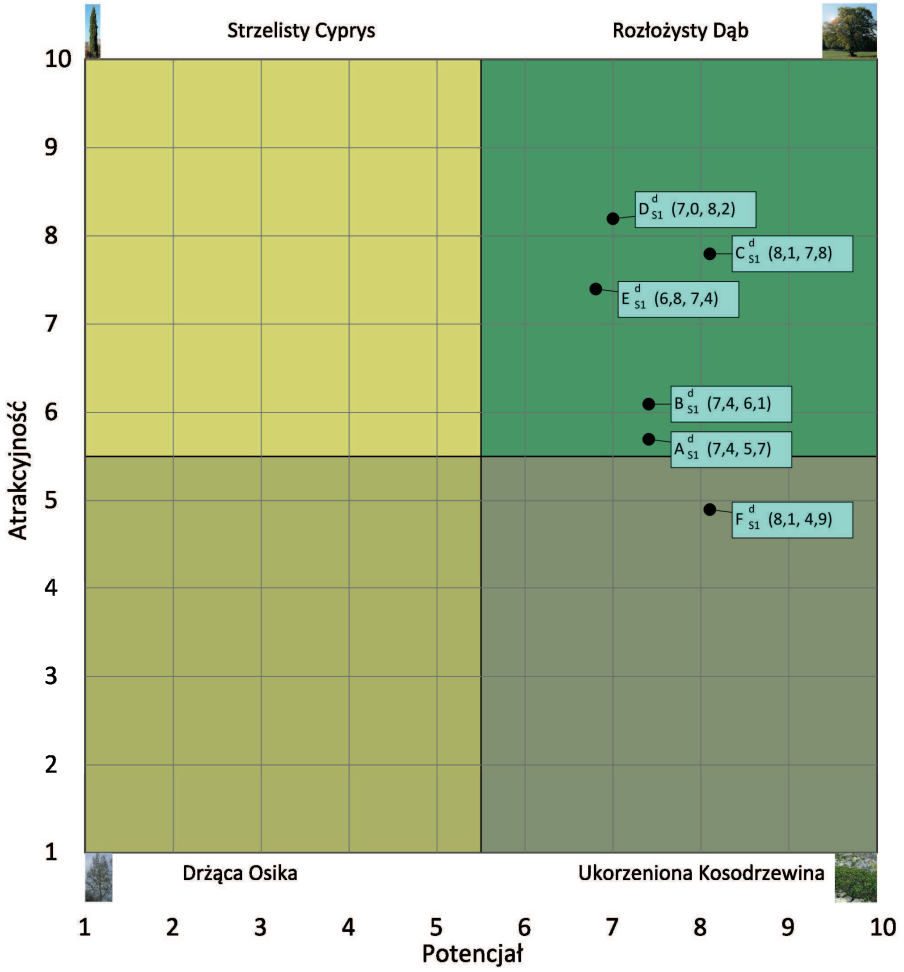
Materiał podłoża	Moc lasera, kW	Głębokość przetopienia warstwy wierzchniej, mm	Chropowatość R_a, µm	Twardość, HRC	Mikrotwardość wyrażona w uniwersalnej skali stanów względnych*)	Odporność na ścieranie**) (względny ubytek masy próbki),%	Odporność na zmęczenie cieplne – średnia głębokość pęknięć, µm
(A_{S1}) Stopowanie laserowe proszkiem NbC							
X40CrMoV5-1	1,2	1,43	12,1	58,4	8	72	bd.***)
	1,6	1,90	14,8	55,7	7	78	bd.
	2,0	2,64	23,2	56,6	9	67	bd.
	2,3	3,32	25,9	58,4	10	71	bd.
32CrMoV12-28	1,2	1,28	6,4	55,2	6	104	67
	1,6	1,74	9,8	56,1	7	104	54
	2,0	2,45	11,2	60,7	8	91	62
	2,3	2,61	18,2	60,7	9	90	51
(B_{S1}) Stopowanie laserowe proszkiem TaC							
X40CrMoV5-1	1,2	1,62	4,9	56,7	6	52,5	24
	1,6	2,33	5,4	58,8	8	56	25
	2,0	3,00	5,6	58,4	8	61	19
	2,3	3,52	8,7	60,3	9	55	18
32CrMoV12-28	1,2	0,99	6,8	65,1	9	105	bd.
	1,6	1,87	9,4	65,5	10	106	bd.
	2,0	2,56	9,3	67,3	10	110	bd.
	2,3	2,79	14,4	67,1	10	112	bd.
(C_{S1}) Stopowanie laserowe proszkiem TiC							
X40CrMoV5-1	1,2	1,42	2,5	55,3	10	49	24
	1,6	1,66	5,3	56,5	8	47	24
	2,0	2,21	6,1	57,5	8	46	20
	2,3	2,56	8,4	62,1	9	52	16
32CrMoV12-28	1,2	0,85	7,8	53,2	1	100	18
	1,6	1,39	11,1	51,5	1	96	15
	2,0	1,78	12,7	44,6	2	76	1
	2,3	2,13	12,9	41,1	2	82	8
(D_{S1}) Stopowanie laserowe proszkiem VC							
X40CrMoV5-1	1,2	1,32	9,2	55,7	8	53	24
	1,6	1,62	9,6	61,8	7	45	24
	2,0	2,18	9,8	62,6	7	58	23
	2,3	2,40	10,8	62,6	8	50	22
32CrMoV12-28	1,2	1,30	9,60	57,2	5	77	16
	1,6	1,55	10,6	56,7	5	73	14
	2,0	1,93	11,6	57,3	5	55	7
	2,3	2,27	19,2	58,4	6	53	4

Materiał podłoża	Moc lasera, kW	Głębokość przetopienia warstwy wierzchniej, mm	Chropowatość R_a, µm	Twardość, HRC	Mikrotwardość wyrażona w uniwersalnej skali stanów względnych*)	Odporność na ścieranie**) (względny ubytek masy próbki),%	Odporność na zmęczenie cieplne – średnia głębokość pęknięć, µm
(E_{S1}) Stopowanie laserowe proszkiem WC							
X40CrMoV5-1	1,2	1,46	18,6	55,6	5	76	61
	1,6	1,79	20,4	57,5	1	94	50
	2,0	1,98	23,8	57,9	1	94	46
	2,3	2,12	36,7	58,7	5	67	47
32CrMoV12-28	1,2	0,81	26,8	53,2	5	104	bd.
	1,6	1,27	30,4	51,5	5	107	bd.
	2,0	1,39	33,7	44,6	6	115	bd.
	2,3	1,91	33,8	41,1	6	117	bd.
(F_{S1}) Przetapianie laserowe bez użycia proszku							
X40CrMoV5-1	1,2	0,56	1,3	54,5	6	64	42
	1,6	1,03	1,5	56,0	3	78	39
	2,0	1,47	2,6	56,8	5	85	32
	2,3	1,67	3,6	57,7	6	70	28
32CrMoV12-28	1,2	0,52	0,6	53,2	1	120	76
	1,6	0,92	0,6	51,5	1	116	74
	2,0	1,13	0,7	44,6	2	114	63
	2,3	1,67	0,8	41,1	2	110	6

*) W dziesięciostopniowej skali wartość 1 odpowiada 500 HV, a 10 odpowiada 1800 HV.
**) Względny ubytek masy po próbie ścieralności obliczono przyjmując za 100% ubytek masy próbek ze stali 32CrMoV12-28 stopowanej laserowo proszkiem TiC z mocą lasera 1,2 kW.
***) Skrót *bd.* oznacza brak danych.

kryterium analizy porównawczej rodzaj proszku nanoszonego na podłoże lub jego brak. Wyodrębniono tym samym sześć homogenicznych grup technologii:

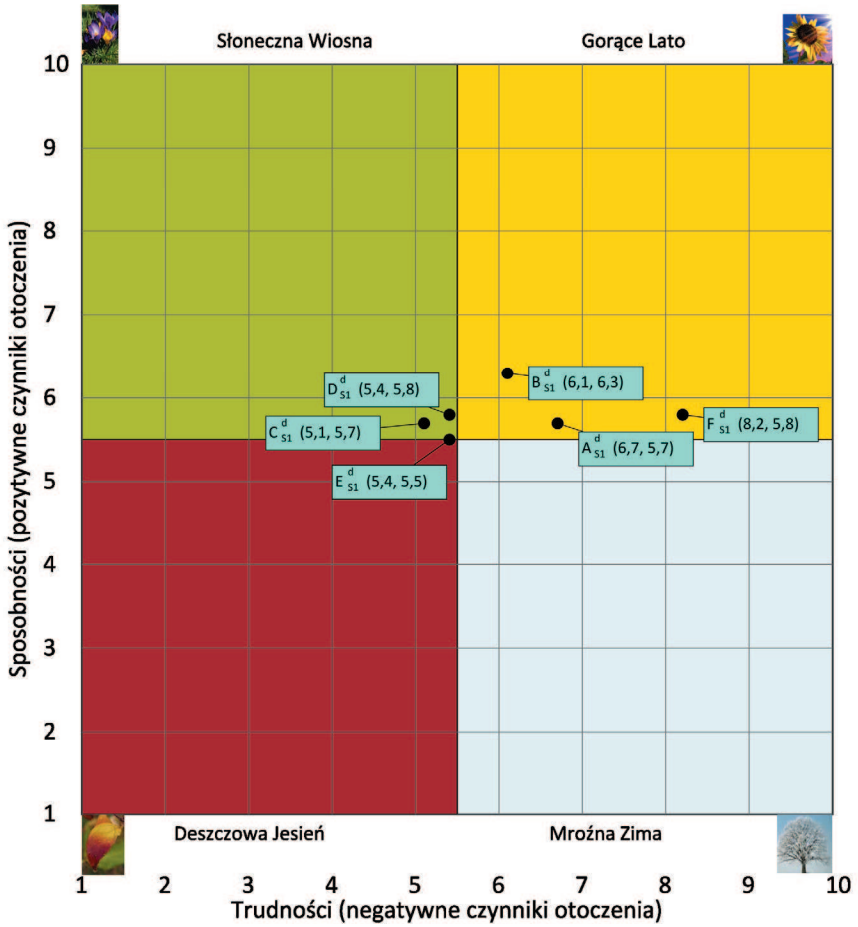
- A_{S1}: powierzchniową obróbkę laserową stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika niobu,
- B_{S1}: powierzchniową obróbkę laserową stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika tantalu,
- C_{S1}: powierzchniową obróbkę laserową stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika tytanu,
- D_{S1}: powierzchniową obróbkę laserową stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika wanadu,
- E_{S1}: powierzchniową obróbkę laserową stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika wolframu,



***Rysunek 60**. Dendrologiczna macierz wartości technologii dotycząca technologii laserowej obróbki powierzchniowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco*

- F_{S1}: przetapianie laserowe stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco bez użycia proszków.

Poszczególne grupy technologii zostały ocenione przez ekspertów kluczowych pod kątem atrakcyjności i potencjału z zastosowaniem dziesięciopunktowej uniwersalnej skali stanów względnych. Wykorzystując analizę wielokryterialną, obliczono średnią ważoną z rozpatrywanych kryteriów szczegółowych wyodrębnionych w ramach atrakcyjności i potencjału, a otrzymane wyniki dotyczące poszczególnych grup technologii naniesiono na dendrologiczną macierz wartości technologii (rys. 60). W wyniku przeprowadzonej analizy wszystkie technologie



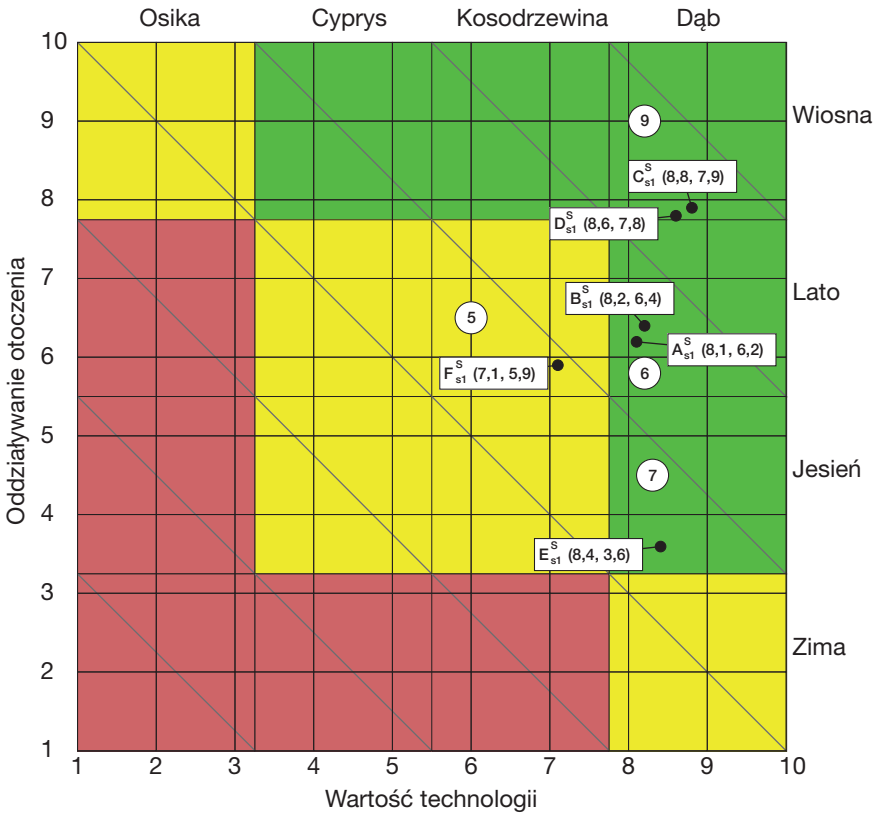
***Rysunek 61**. Meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia dotycząca technologii laserowej obróbki powierzchniowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco*

obróbki laserowej z użyciem proszków węglików (A_{S1}-E_{S1}) zakwalifikowano do najbardziej obiecującej ćwiartki macierzy, zawierającej technologie charakteryzujące się zarówno dużym potencjałem, jak i wysoką atrakcyjnością, zwanej rozłożystym dębem. Najwyższym potencjałem określającym obiektywną wartość technologii charakteryzuje się powierzchniowa obróbka laserowa stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika tytanu C^d_{S1} (8,1, 7,8). Najwyższą atrakcyjnością odzwierciedlającą subiektywne postrzeganie danej technologii wśród jej potencjalnych użytkowników, zdaniem ekspertów, cechuje się natomiast obróbka laserowa stali stopowych narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika wanadu D^d_{S1} (7,0, 8,2). Przetapianie laserowe stopowych stali

narzędziowych do pracy na gorąco bez użycia proszków F_{S1}^{d} (8,1, 4,9) zostało natomiast umieszczone w ćwiartce zwanej ukorzenioną kosodrzewiną, charakteryzującą dobrze poznane technologie o dużym potencjale i ograniczonej atrakcyjności.

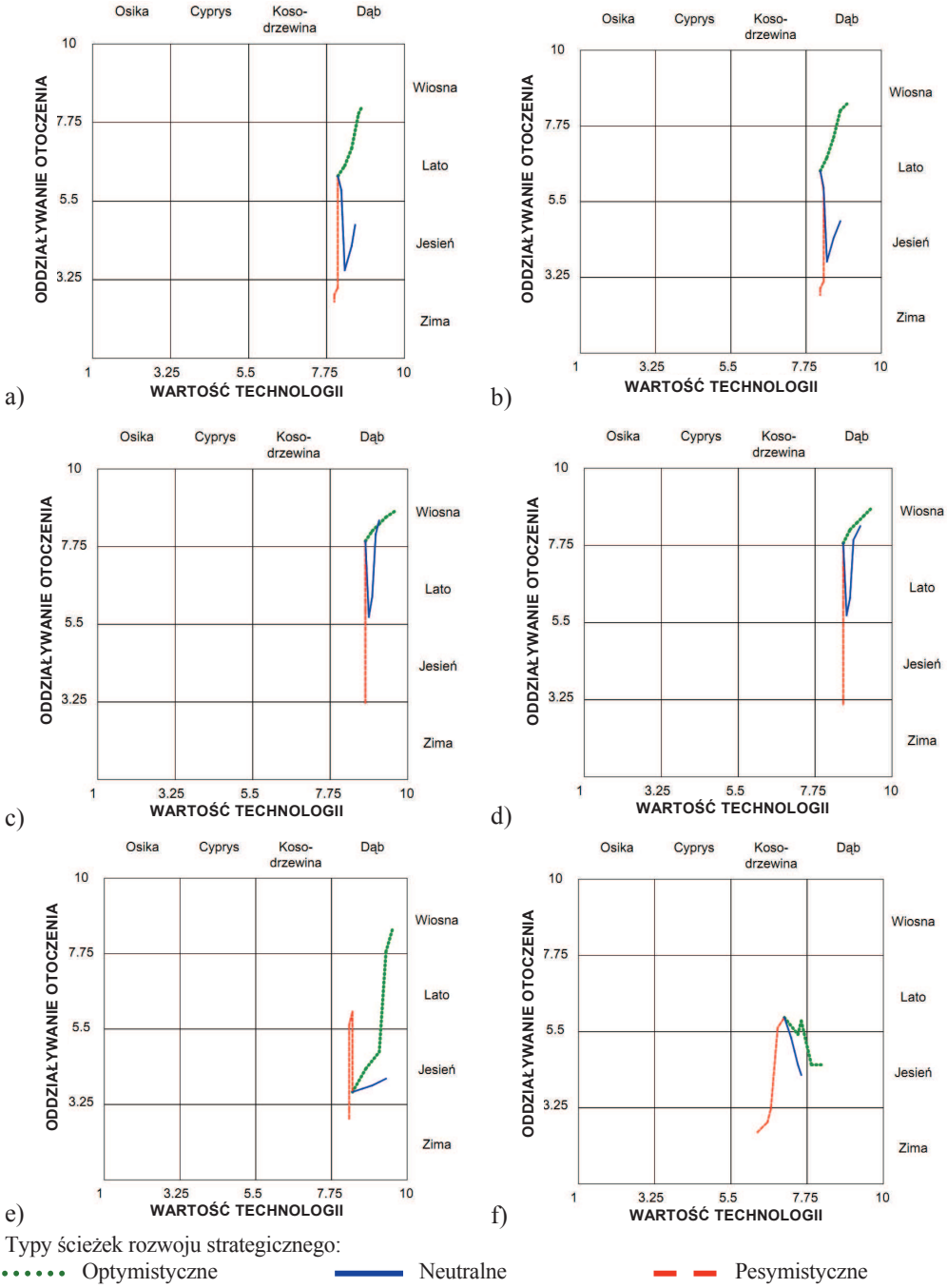
Meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia służy do oceny pozytywnego i negatywnego oddziaływania otoczenia na poszczególne grupy technologii. Wyniki analizy wielokryterialnej, której poddano pozyskane w procesie ankietyzacji oceny ekspertów, wypełniających kwestionariusz ankietowy złożony z kilkudziesięciu pytań, naniesiono na macierz meteorologiczną (rys. 61). Przeprowadzone badania wykazują, że najbardziej sprzyjające warunki otoczenia odpowiadające słonecznej wiośnie towarzyszą grupom technologii C_{S1}^{m} (5,1, 5,7) obróbki laserowej stali stopowych narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika tytanu oraz D_{S1}^{m} (5,4, 5,8) – proszku węglika wanadu. Gorące lato niosące zarówno dużo sposobności, jak i trudności, stanowi otoczenie grup technologii A_{S1}^{m} (6,7, 5,7) obróbki laserowej stali stopowych narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika niobu, B_{S1}^{m} (6,1, 6,3), co odpowiada użyciu proszku węglika tantalu oraz zastosowaniu przetapiania laserowego bez użycia proszków F_{S1}^{m} (8,2, 5,8). Niemalże w samym środku macierzy, jednak w polu deszczowej jesieni o małej liczbie zarówno szans, jak i trudności, znajduje się natomiast obróbka laserowa stali stopowych narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika wolframu oznaczona symbolem alfanumerycznym E_{S1}^{m} (5,4, 5,5).

Otrzymane wyniki z wykorzystaniem programu komputerowego naniesiono na macierz strategii dla technologii (rys. 62). W odniesieniu do najwyżej ocenionych technologii C_{S1}^{s} (8,8, 7,9) obróbki laserowej stali stopowych narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika tytanu oraz D_{S1}^{s} (8,6, 7,8) odpowiadającej użyciu proszku węglika wanadu, których perspektywy rozwojowe oceniono na 9 punktów w dziesięciostopniowej skali, zaleca się zastosowanie strategii dębu wiosną. Strategia ta polega na rozwijaniu, umacnianiu i implementowaniu atrakcyjnej technologii o dużym potencjale w praktyce przemysłowej w celu odniesienia spektakularnego sukcesu. Długoterminowe perspektywy rozwojowe technologii A_{S1}^{s} (8,1, 6,2) obróbki laserowej stali stopowych narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika niobu oraz B_{S1}^{s} (8,2, 6,4), co odpowiada użyciu proszku węglika tantalu, określono jako umiarkowane (6 punktów). Technologie te znajdują się w polu dębu latem, a zalecana dla nich strategia zakłada wykorzystywanie atrakcyjności i potencjału technologii w ryzykownym otoczeniu i unikanie mogących wystąpić trudności,



***Rysunek 62**. Macierz strategii dotycząca technologii laserowej obróbki powierzchniowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco*

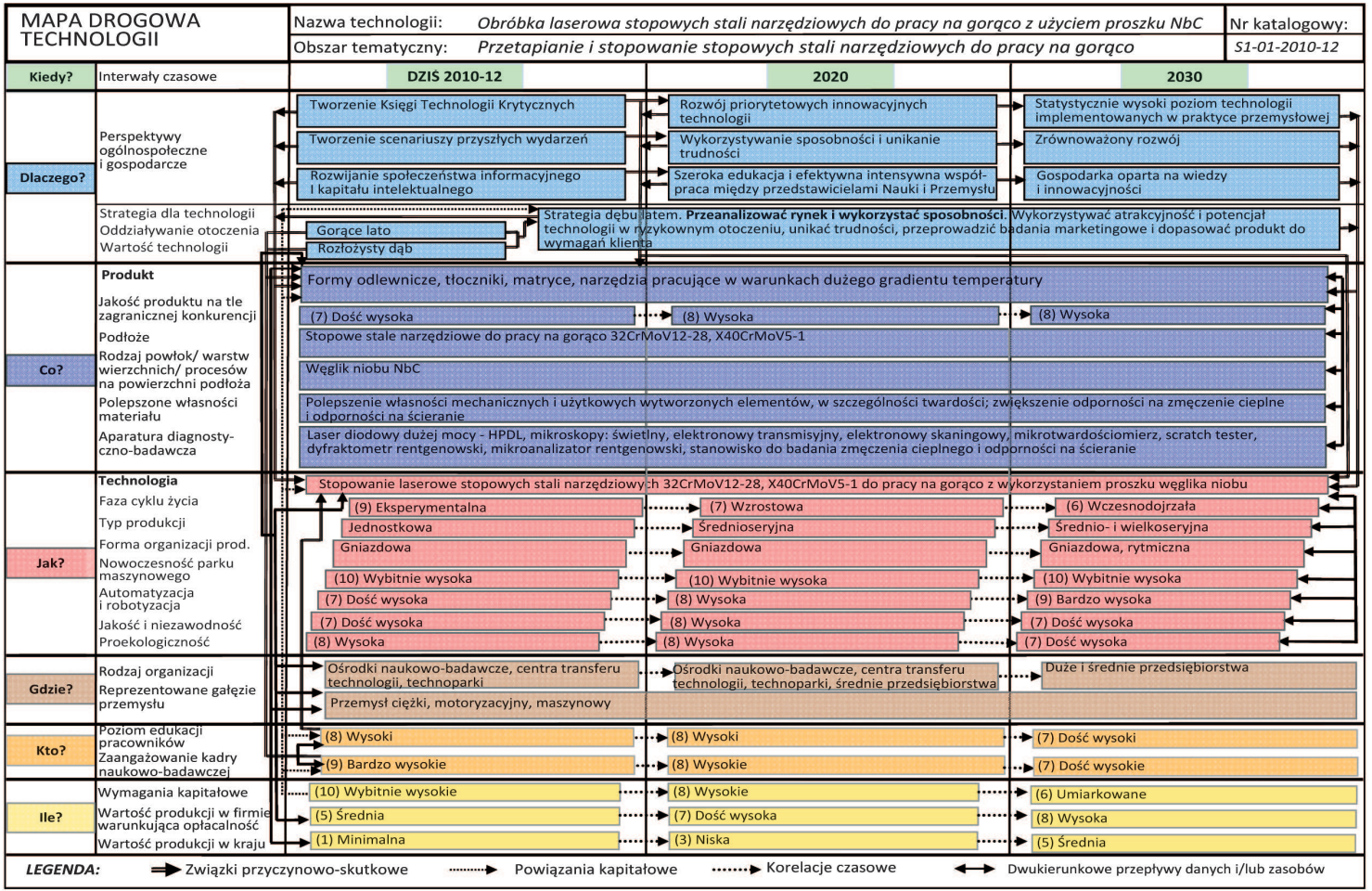
przy równoczesnym dopasowaniu produktu do wymagań klienta, poprzedzonego gruntownymi badaniami marketingowymi. Możliwości rozwojowe obróbki laserowej stali stopowych narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika wolframu oznaczonej symbolem E^s_{S1} (8,4, 3,6) oceniono dość wysoko (7 punktów) i wymaga ona, zgodnie ze wskazaniem macierzy, implementacji strategii dębu jesienią. Postępowanie to wiąże się z odnoszeniem sukcesów z atrakcyjną stabilną technologią na przewidywalnym rynku połączone z poszukiwaniem nowych rynków, grup klientów i produktów możliwych do wytwarzania tą technologią. W odniesieniu do przetapiania laserowego stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco F^s_{S1} (7,1, 5,9) ocenionego średnio (5 punktów) rekomendowane jest zastosowanie strategii kosodrzewiny latem zalecającej uatrakcyjnienie i unowocześnianie technologii o dużym potencjale oraz przeprowadzenie badań marketingowych i dopasowanie produktu finalnego do wymagań klienta.



Rysunek 63. *Ścieżki rozwoju strategicznego dotyczące powierzchniowej obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszków: a) NbC, b) TaC, c) TiC, d) VC, e) WC i f) bez użycia proszków [97]*

Na macierz strategii dla technologii w następnej kolejności naniesiono ścieżki rozwoju strategicznego dotyczące poszczególnych technologii szczegółowych stanowiących prognozę ich rozwoju kolejno w latach: 2015, 2020, 2025 i 2030 w trzech wariantach: optymistycznym, pesymistycznym i najbardziej prawdopodobnym. Uproszczone wykresy prezentujące wyniki wszystkich badań przeprowadzonych w odniesieniu do sześciu przeanalizowanych grup technologii, odpowiadających różnym rodzajom nanoszonych proszków lub przetopieniu bez użycia proszków, przedstawiono na rysunkach 63a-f.

Szczególne własności, w tym twardość, mikrotwardość, odporność na ścieranie i odporność na zmęczenie cieplne, jakie zapewnia laserowa obróbka powierzchniowa wraz z możliwością połączenia ciągliwego rdzenia z twardą powierzchnią, znakomicie zakreślają zakres zastosowań grupy stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco. Oczekiwany zakres zastosowań badanych stali obrobionych laserowo w przemyśle ciężkim, maszynowym, motoryzacyjnym i lotniczym można podzielić na trzy grupy. Pierwszą grupę stanowią stale stosowane na matryce do pras i formy do odlewów pod ciśnieniem, które ze względu na długi kontakt gorącego materiału z narzędziem i związane z tym silne nagrzewanie się powierzchni pracującej powinny charakteryzować się dobrą ciągliwością zapewnioną przez stosunkowo niskie stężenie węgla (0,3-0,4%) i wysoką temperaturą austenityzowania, gwarantującą rozpuszczenie się węglików W, Mo, V, Cr w osnowie. Drugą grupę stanowią stale używane do wytworzenia stosunkowo dużej wielkości matryc kuźniczych i kowadeł do młotów, cechujące się wysoką hartownością i ciągliwością, co jest wymagane ze względu na duże naciski i uderzenia związane z kuciem, mające miejsce podczas pracy narzędzia, przy równoczesnym stosunkowo krótkim kontakcie narzędzia z gorącą odkuwką. Trzecią grupę stanowią stale, z których wytwarzane są walce do walcowania na gorąco, wkładki matrycowe pras i kuźniarek oraz stemple do wyciskania i spęczania produktów, m.in. ze stopów miedzi i aluminium. Zestaw własności użytkowych badanych stali, zapewnionych w wyniku powierzchniowej obróbki laserowej, i zakres możliwych zastosowań wskazują na potrzebę rozwoju zarówno tej grupy materiałów, jak również omawianej grupy technologii służących ich obróbce. Bezsprzecznie, zarówno wyniki wykonanych i szczegółowo opisanych w niniejszym rozdziale klasycznych badań materiałoznawczych, jak i wykonanych niezależnie badań heurystycznych bazujących na opiniach ekspertów, wykonanych zgodnie z metodologią komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, stanowiącą istotę niniejszej



Rysunek 64. *Mapa drogowa technologii dotycząca powierzchniowej obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika niobu; współautorzy: A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, E. Jonda, K. Labisz*

rozprawy, niezależnie potwierdzają potrzebę rozwoju technologii obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco.

Wyniki tradycyjnych badań materiałoznawczych i badań heurystycznych bazujących na opiniach ekspertów stanowiły kanwę utworzenia serii map drogowych analizowanych grup technologii. Rysunek 64 przedstawia reprezentatywną mapę drogową technologii, dotyczącą powierzchniowej obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco z użyciem proszku węglika niobu, natomiast zestawienie zbiorcze zawierające wybrane dane źródłowe wykorzystane do sporządzenia map drogowych wszystkich analizowanych technologii powierzchniowej obróbki laserowej tej grupy stali przedstawiono w tablicy 17. Opracowane według autorskiej koncepcji mapy drogowe technologii stanowią bardzo wygodne narzędzie analizy porównawczej, umożliwiając wybór najlepszej z technologii pod względem wybranego kryterium. Ponadto, ich niezaprzeczalną zaletą jest elastyczność, dzięki której

Tablica 17. *Wybrane dane źródłowe wykorzystane do sporządzenia map drogowych technologii dotyczących badanych technologii powierzchniowej obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco*

Symbol techno-logii	**Analizowany czynnik**																							
	(1)			**(2)**			**(3)**			**(4)**			**(5)**			**(6)**			**(7)**			**(8)**		
	Horyzont czasowy																							
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
A_{S1}	7	8	8	9	7	6	7	8	9	8	7	8	8	8	7	8	8	7	9	8	7	9	9	10
B_{S1}	8	8	8	9	7	6	7	9	9	7	7	8	8	7	7	8	8	6	9	8	7	9	9	8
C_{S1}	6	8	8	9	7	5	7	8	10	5	6	8	9	9	9	9	7	4	9	8	5	8	6	4
D_{S1}	6	8	8	9	7	5	7	8	9	5	7	8	8	8	8	8	7	5	9	6	4	7	5	3
E_{S1}	6	7	8	9	7	5	7	8	10	5	7	9	8	8	8	8	7	3	9	5	4	5	4	4
F_{S1}	6	6	5	4	4	3	6	7	7	5	5	6	7	8	8	5	4	3	5	4	3	4	3	3

Analizowane czynniki:

(1) Jakość produktu na tle zagranicznej konkurencji
(2) Faza cyklu życia technologii
(3) Poziom automatyzacji i robotyzacji
(4) Jakość i niezawodność
(5) Proekologiczność
(6) Poziom edukacji pracowników
(7) Zaangażowanie kadry naukowo-badawczej
(8) Wymagania kapitałowe

Horyzont czasowy:

a: lata 2010-2012
b: rok 2020
c: rok 2030

w razie potrzeby mapy można uzupełniać i rozbudowywać o dodatkowe podwarstwy dostosowując je do specyfiki branży, wielkości przedsiębiorstwa, skali działalności firmy bądź indywidualnych oczekiwań przedsiębiorcy. W ramach prowadzonych prac utworzono także kartę informacyjną technologii stanowiącą uszczegółowienie i uzupełnienie map drogowych technologii. Dwustronicowa karta dotycząca powierzchniowej obróbki stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco (rys. 65a, b) zawiera informacje techniczne przedstawione w formie tabelarycznej, w tym treści opisowe, graficznie przedstawiony schemat procesu, a także wyniki ocen eksperckich dokonanych w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych. Mapy drogowe i karty informacyjne technologii przygotowano w ujednolicony sposób w odniesieniu do wszystkich 140 analizowanych technologii szczegółowych i technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów. Wszystkie wykonane mapy i karty zebrano w Księdze Technologii Krytycznych inżynierii powierzchni materiałów, która zostanie opublikowana w formie książkowej, lecz planuje się, że głównym źródłem rozpowszechniania informacji w niej zawartych będzie Internet. E-Księga Technologii Krytycznych, zgodnie z nowo opracowaną koncepcją e-transferu technologii [99, 161, 175], zostanie udostępniona bezpłatnie i bez żadnych ograniczeń na ogólnodostępnej platformie internetowej, aby stanowiła pomoc podczas wdrażania technologii w praktyce przemysłowej, w szczególności w małych i średnich przedsiębiorstwach, niedysponujących kapitałem pozwalającym na przeprowadzenie badań własnych w tym zakresie.

Informacje podane w niniejszym rozdziale potwierdzają w odniesieniu do stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco oraz wytypowanej technologii obróbki laserowej ich warstwy powierzchniowej prawdziwość przyjętego założenia, że wyniki klasycznych eksperymentów materiałoznawczych i wyniki badań heurystycznych bazujących na opiniach ekspertów, wykonane zgodnie z nowo opracowaną metodologią, są tożsame i pozwalają na wyciągnięcie analogicznych wniosków dotyczących perspektyw rozwojowych analizowanej grupy technologii. Ponadto, wyniki badań uzyskane niezależnie w dwojaki sposób mają walory synergiczne i chociaż wykonanie zaplanowanych badań z wykorzystaniem któregokolwiek z nich prowadzi do porównywalnego wnioskowania, to wykonanie ich pełnego cyklu, aczkolwiek nie jest konieczne, powoduje większą jednoznaczność wniosków dotyczących perspektyw rozwojowych rozpatrywanej technologii i danej grupy materiałów inżynierskich. W odniesieniu do formułowania wniosków dotyczących perspektyw rozwojowych danych technologii i materiałów inżynierskich, klasyczne badania materiałoznawcze umożliwiają

a)

KARTA INFORMACYJNA TECHNOLOGII	Nazwa technologii	*Powierzchniowa obróbka laserowa stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco*	Nr katalogowy
	Obszar tematyczny	*Technologie laserowe w inżynierii powierzchni*	S1-01/2010-12

Istota zjawiska fizykochemicznego

Laserowe wzbogacanie warstw wierzchnich w dodatki stopowe ma na celu zmianę własności materiałów w wąskiej strefie przypowierzchniowej dzięki wtapianiu pierwiastków pochodzących z odpowiednio przygotowanej i naniesionej powłoki. Istotą tego procesu jest przetopienie naniesionej warstwy materiału stopującego oraz podłoża poprzez gwałtowne nagrzanie niewielkiej objętości materiału, intensywne wymieszanie, a następnie krzepnięcie przy bardzo szybkim chłodzeniu. Powstaje wówczas drobnokrystaliczna struktura oraz występuje znaczne przesycenie roztworów stałych, jak również powstają fazy metastabilne. Możliwość precyzyjnej regulacji warunków procesu takich jak: prędkość skanowania powierzchni przez wiązkę laserową oraz jej moc, rodzaj i grubość materiału stopującego, osłona gazowa, pozwala na otrzymanie warstwy stopowanej o przewidywanych własnościach w zależności od warunków eksploatacji.

Rodzaj możliwej powłoki/ warstwy wierzchniej lub procesów zachodzących na powierzchni podłoża

X	jednowarstwowa		wielofazowa		amorficzna
X	wielowarstwowa	X	gradientowa		nanokrystaliczna
	multiwarstwowa (>100 warstw)	X	kompozytowa		hybrydowa
X	przemiany fazowe powierzchni podłoża	X	zmiana składu chemicznego na powierzchni podłoża		procesy fizyczne na powierzchni podłoża

Szczególne własności powłok/ warstw wierzchnich/ powierzchni podłoża w wyniku zajścia procesów

X	mechaniczne		magnetyczne		optyczne	X	trybologiczne
	chemiczne		dyfuzyjne		termiczne	X	antykorozyjne
	elektryczne		hydromechaniczne		akustyczne		Inne:

Zalety	Wady
Wysoka odporność na zużycie ścierne warstwy wierzchniej; uzyskanie drobnokrystalicznej struktury; podwyższona twardość warstwy wierzchniej i odporność na zmęczenie cieplne.	Wysoki koszt urządzenia; wzrost chropowatości powierzchni stwarzający konieczność zastosowania dodatkowej obróbki wykończającej; możliwość powstawania pęknięć w warstwie wierzchniej.

Najbardziej perspektywiczne technologie szczegółowe i/lub obszary zastosowań

Możliwość wykorzystania w celu opracowania metody zwiększenia trwałości eksploatacyjnej narzędzi wykonanych ze stali narzędziowych stopowych do pracy na gorąco w efekcie stopowania laserowego powierzchni z naniesioną warstwą proszków węglików.

Technologie zastępcze/ alternatywne

Technologie plazmowe

Rekomendowane źródła literaturowe

1. F. Bachman, Industrial applications of high power diode lasers in materials processing, Applied Surface Science (2003) 15-21.
2. J. Kusiński, Technologie laserowe w inżynierii materiałowej, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika, z. 82, 2005, 27-33.
3. L.A. Dobrzański, E. Jonda, K. Labisz, M. Bonek, A. Klimpel, Abrasive wear resistance of the hot work tool steels remelted or alloyed by HPDL laser, 13th International Materials Symposium, Pamukkale, 2010, 49-55.

Wpływ aplikacji technologii na przewidywane i oczekiwane własności materiału	Poziom
Odporność na erozję	Dość wysoki (7)
Odporność zmęczeniowa	Dość wysoki (7)
Twardość	Dość wysoki (7)
Odporność na ścieranie	Dość wysoki (7)
Odporność na oddziaływanie wysokiej temperatury	Dość wysoki (7)
Odporność na korozję	Dość wysoki (7)
Niższy koszt wytwarzania	Umiarkowany (6)
Wysoka wytrzymałość	Średni (5)

Skuteczność przeciwdziałania technologii skutkom zużycia	Poziom
Zużycie ścierne	Wysoki (8)
Erozja	Dość wysoki (7)
Fretting	Dość wysoki (7)
Zużycie cieplne	Dość wysoki (7)
Pitting (zużycie gruzełkowe)	Dość wysoki (7)
Zmęczenie cieplne	Dość wysoki (7)
Zużycie adhezyjne	Dość wysoki (7)
Korozja naprężeniowa i zmęczeniowa	Umiarkowany (6)

Sekcje przemysłu wg klasyfikacji PKD o najwyższej aplikacyjności technologii	Poziom
Badania naukowe i prace rozwojowe	Dość wysoki (7)
Produkcja metalowych wyrobów gotowych (...)	Dość wysoki (7)
Produkcja maszyn i urządzeń (...)	Średni (5)
Produkcja pozostałego sprzętu transportowego	Średni (5)
Produkcja pojazdów samochodowych (...)	Średni (5)
Naprawa i instalowanie maszyn i urządzeń	Średni (5)
Działalność w zakresie architektury i inżynierii (...)	Dość niski (4)
Roboty budowlane specjalistyczne	Niski (3)

Aplikacyjność metod modelowania i sterowania komputerowego w odniesieniu do technologii	Poziom
Modelowanie matematyczne	Wysoki (8)
Modelowanie wieloskalowe	Dość wysoki (7)
Sztuczne sieci neuronowe	Dość wysoki (7)
Algorytmy genetyczne	Dość wysoki (7)
Dynamika molekularna	Średni (5)
Aktualna faza cyklu życia technologii	Eksperymentalna (9)
Perspektywy rozwojowe	Wysokie (7)

b)

KARTA INFORMACYJNA TECHNOLOGII	Nazwa technologii	*Powierzchniowa obróbka laserowa stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco*	Nr katalogowy
	Obszar tematyczny	*Technologie laserowe w inżynierii powierzchni*	S1-01/2010-12

Opis przebiegu procesu technologicznego

Stopowanie za pomocą wiązki lasera diodowego (HPDL) warstw wierzchnich stali narzędziowych stopowych do pracy na gorąco stanowi efektywną, wysokowydajną metodę kształtowania własności warstw wierzchnich, pozwalającą na dodatkowe zwiększenie własności eksploatacyjnych. Proces stopowania polega na naniesieniu na podłoże materiału stopującego i na następnym przetopieniu go wraz z warstwą wierzchnią materiału podłoża. Najczęściej stosowanymi materiałami stopującymi są różne fazy, głównie węgliki metali trudno topliwych: TiC, NbC, VC, TaC, WC lub stopy tych metali np. W-Co-Cr-V, Co-W, Cr-Ti, stellity i nadstopy nanoszone przez natryskiwanie cieplne lub elektroiskrowe oraz w postaci past. Przetopienie cienkiej warstwy wierzchniej i jej szybka krystalizacja pozwalają uzyskać strukturę jednorodną chemicznie, drobnokrystaliczną i charakteryzującą się dużą twardością. W zależności od rodzaju zastosowanych dodatków stopujących w postaci proszków węglików, jak również od zastosowanej mocy lasera HPDL, następuje utworzenie drobnej struktury dendrytycznej, a także umocnienie przez wzbogacanie warstwy wierzchniej w dodatki stopowe pochodzące z rozpuszczających się węglików. Materiał w warstwie stopowanej po zakończeniu oddziaływania wiązki laserowej krzepnie, a materiał podłoża w jego sąsiedztwie ulega zahartowaniu. Struktura tej warstwy, jej skład chemiczny i własności fizykochemiczne różnią się od podłoża i od materiału stopującego. Po stopowaniu laserowym konieczne jest zastosowanie obróbki wykończającej, np. szlifowania.

Ogólne fizykochemiczne warunki realizacji procesu technologicznego

Standardowy zakres parametru procesu	Jednostka	od	do
Temperatura	°C	>1300	
Ciśnienie	Pa	ok. 10^5	
Moc lasera	kW	1,2	2,3
Prędkość skanowania wiązki laserowej	m/min	0,3	0,5
Środowisko/ atmosfera	Powietrze, gazy ochronne np. argon		
Specyficzne warunki realizacji procesu	Atmosfera ochronna w postaci nadmuchu gazu osłonowego (argonu) przez dyszę kołową.		

Metod(a)-y wstępnego przygotowania materiału podłoża

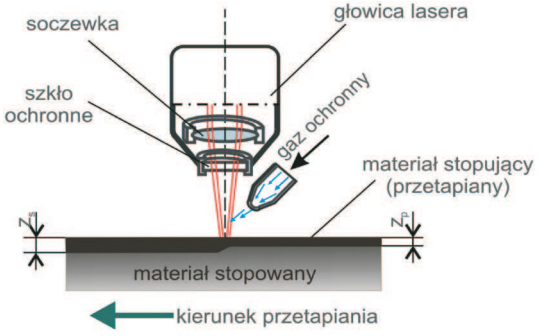
Standardowa obróbka cieplna, polegająca na hartowaniu i dwukrotnym odpuszczaniu; piaskowanie i obróbka mechaniczna na szlifierce magnetycznej, odtłuszczenie powierzchni obrabianej.

Typ/ rodzaj urządzenia

Laser Diodowy Dużej Mocy (HPDL) Rofin SINAR DL 020

Specyficzne oprzyrządowanie

Stolik roboczy, dysza gazu ochronnego, głowica laserowa, układ zasilania i chłodzenia, oraz system komputerowy sterujący pracą lasera i położeniem stolika roboczego.



Schemat procesu laserowego stopowania warstwy wierzchniej materiałów.

Widok stanowiska wykorzystanego podczas stopowania laserowego stali proszkami węglików.

Rysunek 65. *Karta informacyjna technologii dotycząca powierzchniowej obróbki stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco; a) 1. strona, b) 2. strona; współautorzy: A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, E. Jonda*

jedynie formułowanie opisowych wniosków jakościowych i to zwykle w formie postulatywnej. Badania heurystyczne, zgodnie z prezentowaną koncepcją metodologiczną, pozwalają natomiast na formułowanie ocen ilościowych, walidację tych ocen i ich rangowanie, co jest podstawą wykonania analizy porównawczej opierającej się na założonych kryteriach i czyni prognozę bardziej wiarygodną niż w przypadku, gdy takich danych ilościowych z przyczyn obiektywnych pozyskać nie można.

Opisane studium przypadku pozwala na jednoznaczną ocenę, że sformułowaną i sformalizowaną w niniejszej pracy metodologię komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów w analizowanym przypadku ***pozytywnie zweryfikowano doświadczalnie, poprzez klasyczne badania materiałoznawcze.***

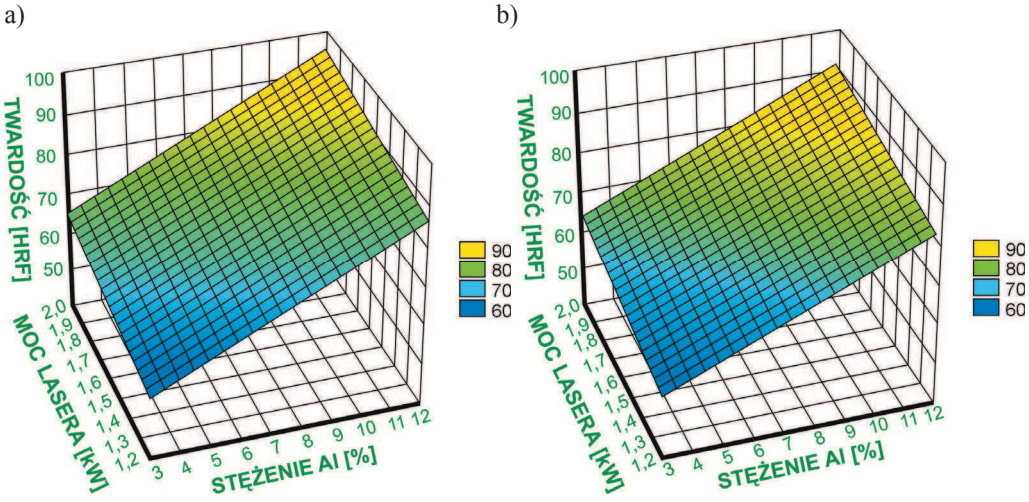
5.3. Syntetyczny opis wykonanych badań materiałoznawczo-heurystycznych

Badania materiałoznawczo-heurystyczne analogiczne do opisanych szczegółowo w podrozdziale 5.2 wykonano również w odniesieniu do pozostałych studiów przypadku dotyczących kolejnych siedmiu grup technologii szczegółowych (*S*2-*S*8). Kompletne wyniki tych badań, a w szczególności: opis materiału do badań i metodyki badań materiałoznawczych; prezentację wyników badań strukturalnych oraz badań własności mechanicznych, innych własności fizycznych, własności użytkowych i badań uzupełniających wspomaganych komputerowo; prezentację macierzy kontekstowych, tj. dendrologicznych, meteorologicznych i strategii dla technologii; ścieżek rozwoju strategicznego oraz map drogowych i kart informacyjnych technologii, wydano w formie obszernej kilkusetstronicowej anglojęzycznej publikacji książkowej [161] oraz zaprezentowano m.in. w pracach [90-99, 169-174, 180-188, 302, 336]. Niniejszy podrozdział rozprawy zawiera jedynie syntetyczny opis efektów końcowych tych badań, w tym: uogólnioną charakterystykę własności materiałów uzyskanych w wyniku poddania ich różnym rodzajom obróbki powierzchniowej, pozycjonowanie strategiczne poszczególnych technologii z użyciem macierzy kontekstowych i perspektywy rozwoju strategicznego. Rozpatrywane szczegółowe rozwiązania materiałoznawcze, wsparte wykonanymi badaniami eksperymentalnymi, stanowią merytoryczne uzasadnienie dla opisanych w niniejszym podrozdziale wyników badań heurystycznych, bazujących na wiedzy eksperckiej, wynikających z nowo opracowanej metodologii, co potwierdza celowość wykonywania takich

właśnie badań, bez konieczności każdorazowego poparcia ich szczegółowymi, kosztownymi z natury rzeczy i długotrwałymi badaniami materiałoznawczymi. Wyniki te są również kolejnymi przykładami doświadczalnej weryfikacji przyjętego założenia, sformułowanego na początku podrozdziału 5.1, że możliwe jest wykonywanie badań z wykorzystaniem nowo opracowanej autorskiej metodologii, w celu ustalenia perspektyw rozwoju poszczególnych technologii kształtowania struktury i własności warstwy powierzchniowej materiałów inżynierskich, bez każdorazowej potrzeby wykonywania ponownych i gruntownych badań materiałoznawczych.

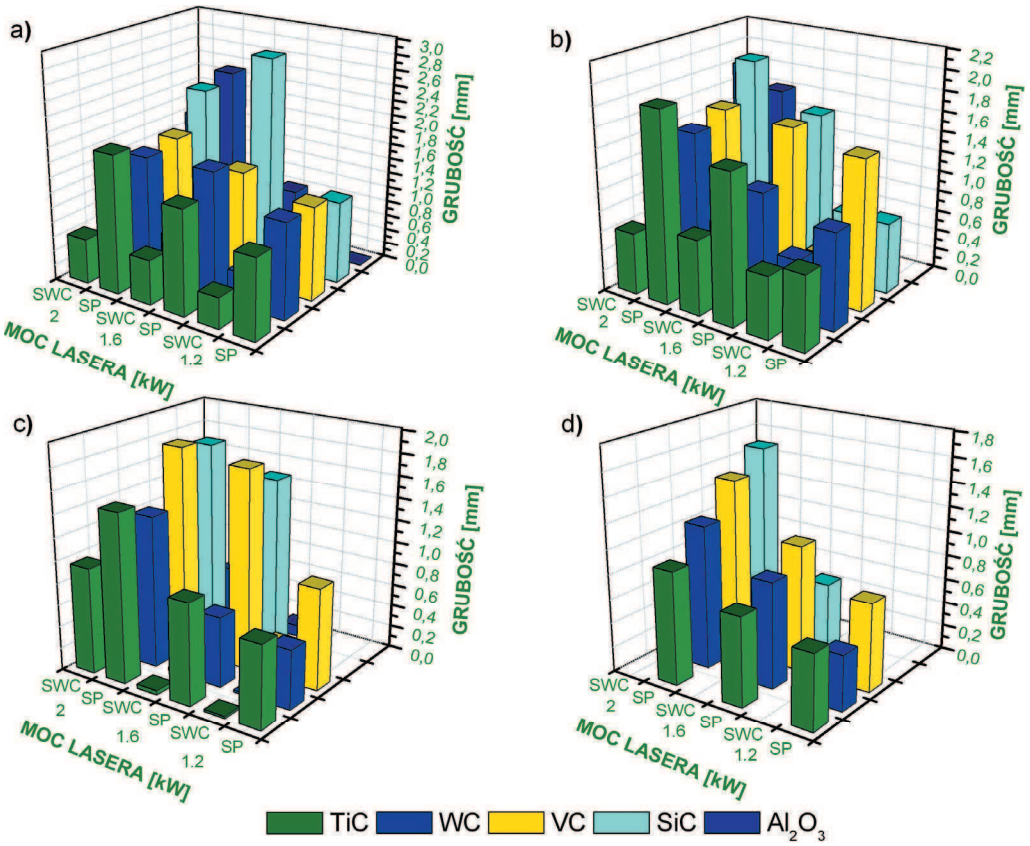
S2 Obróbka laserowa odlewniczych stopów magnezu

W odniesieniu do grupy technologii *S*2 – obróbki laserowej odlewniczych stopów magnezu MCMgAl12Zn1, MCMgAl9Zn, MCMgAl6Zn1, MCMgAl3, przyjęto jako kryterium podziału rodzaj proszku naniesionego na podłoże, w celu przeprowadzenia prac eksperymentalno-porównawczych [90, 161, 169, 170, 336]. Wyodrębniono w ten sposób następujące grupy technologii szczegółowych obejmujących wtapianie w podłoże cząstek odpowiednio: węglika tytanu (A_{S2}), węglika wolframu (B_{S2}), węglika wanadu (C_{S2}), węglika krzemu (D_{S2}) i tlenku aluminium (E_{S2}).



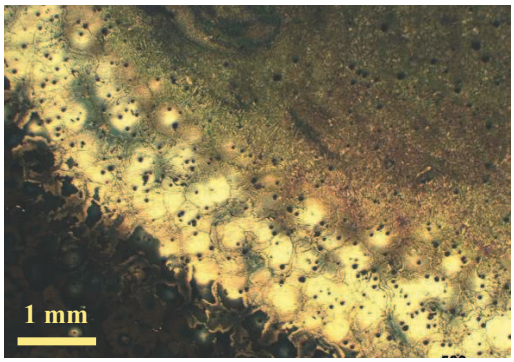
Rysunek 66. *Symulacja wypływu mocy lasera i stężenia aluminium na twardość odlewniczych stopów magnezu poddanych obróbce laserowej z użyciem: a) proszków węglika tytanu, b) proszków węglika wanadu; prędkość skanowania 0,75 m/min [90, 161]*

Wyniki wykonanych badań materiałoznawczych wykazują pozytywny wpływ powierzchniowej obróbki laserowej na jakość i strukturę badanych odlewniczych stopów magnezu oraz obiecujące polepszenie własności mechanicznych i użytkowych badanego materiału, w tym zwłaszcza twardości, która w istotny sposób zależy od mocy lasera i stężenia pierwiastków stopowych, np. Al (rys. 66). Wtapianie z użyciem lasera wszystkich wymienionych proszków węglików i tlenku wpływa na rozdrobnienie struktury w całym badanym zakresie mocy lasera i na zróżnicowanie wielkości ziarn w poszczególnych strefach warstwy wierzchniej badanych stopów. W warstwach wierzchnich występują dwie strefy: przetopienia (SP) i wpływu ciepła (SWC), których charakterystyczne wielkości (np. grubość warstwy) zależne są od zastosowanej mocy lasera i wtapianych proszków węglików lub tlenku. Grubość uzyskanej warstwy wierzchniej odlewniczych stopów magnezu zwiększa się wraz ze wzrostem

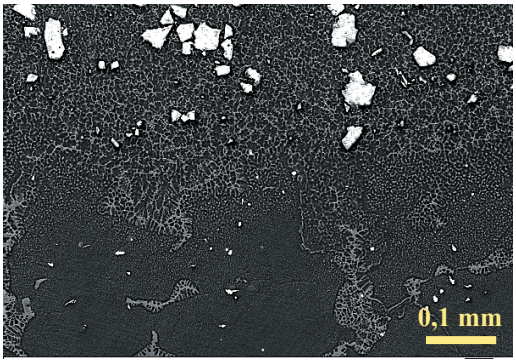


Rysunek 67. *Wpływ mocy lasera i proszków węglików lub tlenku użytych w procesie obróbki laserowej na grubość strefy przetopienia (SP) i strefy wpływu ciepła (SWC) [90, 161]*

mocy lasera w zakresie od 1,2 do 2,0 kW i wynosi od dziesiątych części mm do ok. 4 mm w stopie MCMgAl12Zn1 z wtapianym SiC (rys. 67). Struktura materiału krzepnącego po wtapianiu laserowym charakteryzuje się zróżnicowaną morfologią (rys. 68 i 69) i składa się z dyspersyjnych cząstek zastosowanego węglika TiC, WC, VC, SiC lub tlenku Al_2O_3, rozmieszczonych w dendrytach roztworu stałego α-Mg z eutektyką płytkową $Mg_{17}Al_{12}$ i α-Mg w obszarach międzydendrytycznych, oraz z wydzieleń faz zawierających Mg i Si, jak również faz o dużym stężeniu Mn i Al. Główne osie dendrytów zorientowane są zgodnie z kierunkami odprowadzania ciepła, a morfologia i udział faz są zależne od warunków procesu laserowej obróbki powierzchniowej, rodzaju cząstek wtapianych i składu chemicznego podłoża (stop pod- lub nadeutektyczny). Na dyfraktogramach rentgenowskich z warstwy wierzchniej odlewniczych stopów magnezu Mg-Al-Zn po wtapianiu laserowym proszków węglików WC, TiC, VC, SiC lub tlenku Al_2O_3 zidentyfikowano refleksy od faz α-Mg, γ–$Mg_{17}Al_{12}$, a także refleksy od użytych proszków (rys. 70). Zmiany składu chemicznego w miejscach rozmieszczenia różnych faz na przekroju warstwy wierzchniej stwierdzono w wyniku badań rozkładu powierzchniowego pierwiastków, których przykład dotyczący materiału MCMgAl6Zn1 po wtapianiu węglika tytanu przedstawiono na rysunku 71. Zastosowane warunki obróbki laserowej mają również wpływ na chropowatość powierzchni odlewniczych stopów magnezu po wtapianiu laserowym. Przy niezmiennej prędkości skanowania i natężeniu podawania



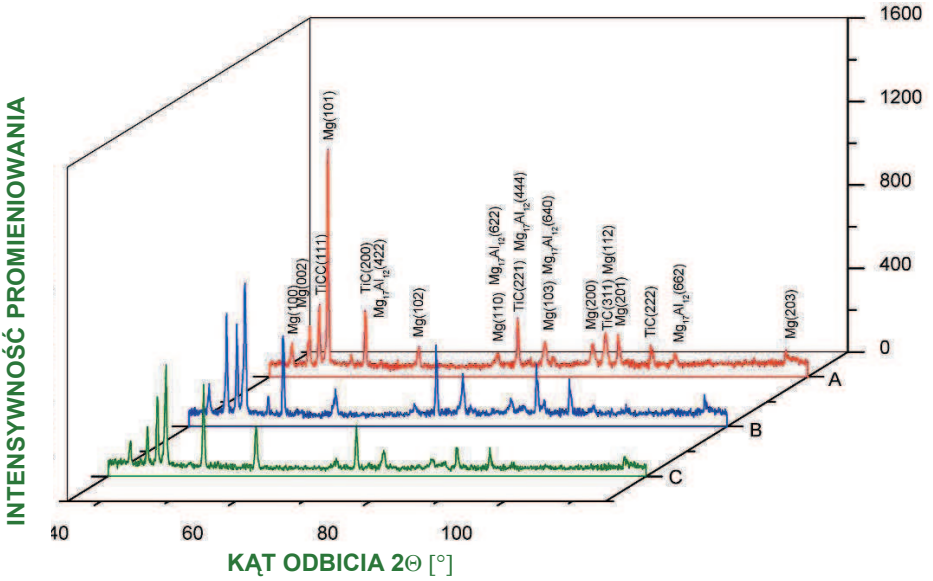
Rysunek 68. *Obszar pomiędzy strefą przetopienia a podłożem ze stopu MCMgAl9Zn1 poddanego obróbce laserowej z użyciem proszku węglika wanadu; prędkość skanowania 0,75 m/min, moc lasera 2,0 kW; mikroskop świetlny [90, 161]*



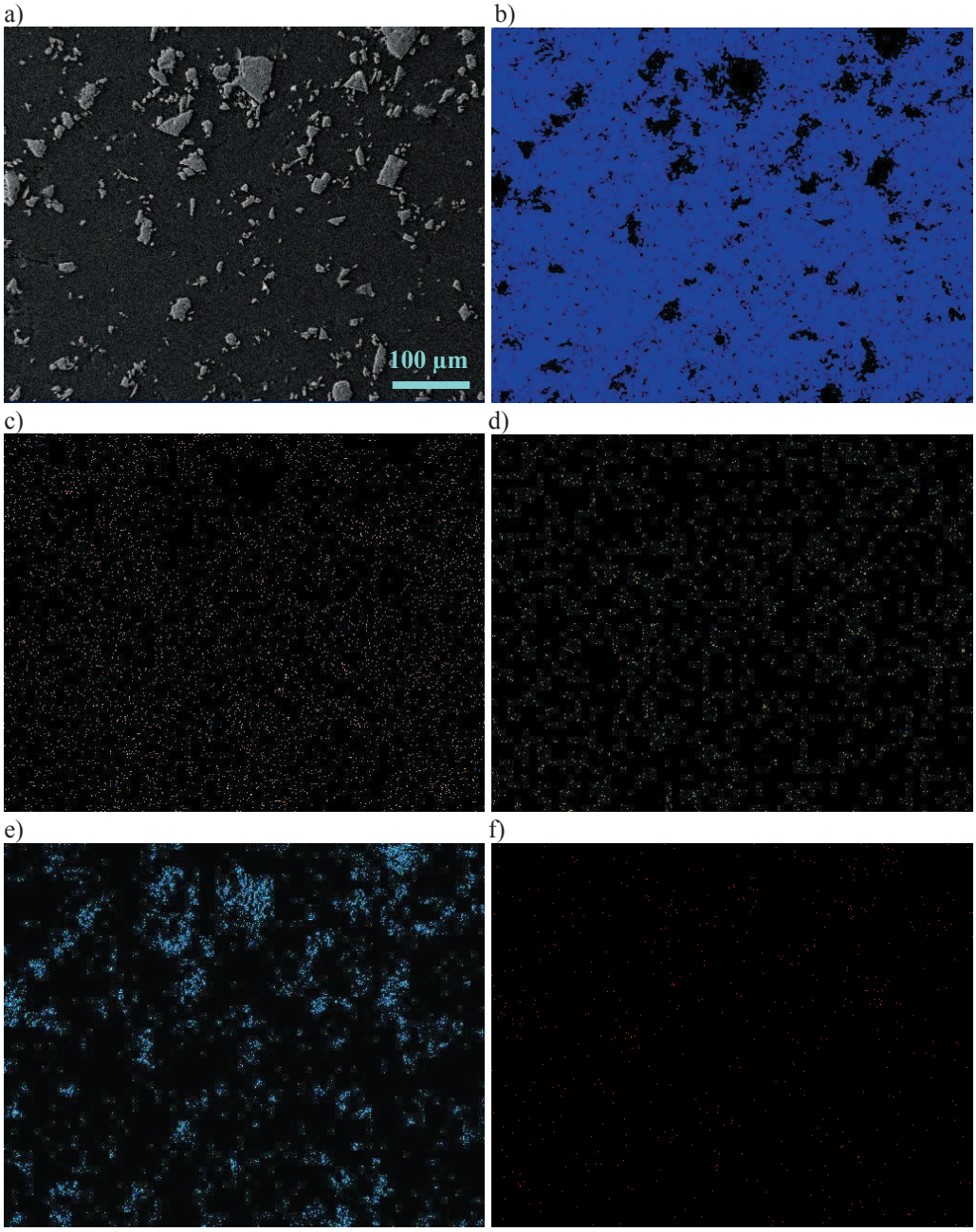
Rysunek 69. *Obszar na styku strefy przetopionej i podłoża ze stopu MCMgAl9Zn1 poddanego obróbce laserowej z użyciem proszku węglika tytanu; prędkość skanowania 1 m/min, moc lasera 1,6 kW; skaningowy mikroskop elektronowy [90, 161]*

proszku, wraz ze wzrostem mocy lasera zmniejsza się chropowatość powierzchni. Zmierzone wartości chropowatości powierzchni zawierają się w przedziale od 4,0 µm do 42,5 µm. W odlewniczych stopach magnezu Mg-Al-Zn poddanych przetapianiu i wtapianiu cząstek węglików i tlenku, w wyniku rozdrobnienia ziarn i występowania twardych cząstek użytych proszków maksymalną twardość, ok. 103 HRF, uzyskano w warstwie wierzchniej stopu MCMgAl12Zn1, w który wtapiano proszki węglika tytanu przy mocy lasera 1,2 kW i prędkości wtapiania 0,5 m/min. Uzyskane wyniki badań materiałoznawczych potwierdzają potrzebę rozwijania opisanej grupy technologii.

W wyniku przeprowadzonej oceny wartości technologii wykazano, że wszystkie grupy technologii (A_{S2}-E_{S2}) charakteryzują się zarówno dużym potencjałem, jak i atrakcyjnością, stąd zakwalifikowano je do najbardziej obiecującej ćwiartki macierzy dendrologicznej, zwanej rozłożystym dębem. Najlepszy wynik A^d_{S2} (9,7; 9,8) osiągają odlewnicze stopy magnezu poddane obróbce laserowej węglikiem tytanu, a najgorsze te, w których wykorzystano do obróbki laserowej węglik krzemu D^d_{S2} (7,6, 8,5). Wyniki oceny pozytywnego i negatywnego oddziaływania otoczenia na poszczególne grupy technologii wskazują, że w przypadku wszystkich poddanych badaniom grup technologii otoczenie jest niezwykle sprzyjające,



Rysunek 70. *Dyfraktogram rentgenowski odlewniczego stopu magnezu MCMgAl12Zn1 po obróbce laserowej proszkiem węglika tytanu; prędkość skanowania 0,75 m/min, moc lasera: A – 1,2 kW, B – 1,6 kW, C – 2,0 kW [90, 161]*



Rysunek 71. *Struktura warstwy wierzchniej stopu magnezu MCMgAl6Zn1 poddanego obróbce laserowej z użyciem węglika tytanu: a) obraz uzyskany z wykorzystaniem elektronów wtórnych (SE) oraz rozkład powierzchniowy pierwiastków: b) Mg, c) Al, d) Zn, e) Ti, f) C; prędkość skanowania 0,75 m/min, moc lasera 1,6 kW; skaningowy mikroskop elektronowy [90, 161]*

niosące dużo sposobności i sprawiające niewiele trudności, stąd wszystkie analizowane grupy technologii znajdują się w ćwiartce odpowiadającej słonecznej wiośnie, co wróży bardzo dobrze ich rozwojowi. Ponownie najwyższą ocenę uzyskuje grupa technologii oznaczona jako A^m_{S2} (4,0, 7,4), a najniższą – grupa technologii oznaczona jako E^m_{S2} (3,8, 6,0) odpowiadająca wtapianiu laserowemu z użyciem tlenku aluminium. Wyniki badań przedstawione w postaci graficznej za pomocą macierzy dentrologicznej i meteorologicznej na kolejnym etapie prac badawczych naniesiono na macierz strategii dla technologii. Najwyższą możliwą ocenę (10 punktów) uzyskują grupy technologii oznaczone jako A^s_{S2} (9,8, 8,4) i C^s_{S2} (9,7, 8,4) odpowiadające obróbce laserowej odlewniczych stopów magnezu odpowiednio węglikiem tytanu i węglikiem wanadu, a pozostałe grupy technologii (B_{S2}, D_{S2} i E_{S2}) oceniono na 9 punktów, co oznacza ich bardzo wysoką pozycję na tle otoczenia. W odniesieniu do wszystkich analizowanych bardzo dobrze rokujących grup technologii zaleca się zastosowanie strategii dębu wiosną, polegającej na rozwijaniu, umacnianiu i implementowaniu atrakcyjnej technologii o dużym potencjale w praktyce przemysłowej, w celu odniesienia spektakularnego sukcesu.

Analizując otrzymane wyniki badań, należy stwierdzić, że możliwe będzie zastosowanie badanych stopów Mg-Al-Zn oraz technologii ich obróbki, także alternatywnie warstw wierzchnich zapewniających możliwie najkorzystniejsze własności *quasi-gradientowe* warstwy powierzchniowej produktów, w praktyce przemysłowej, zwłaszcza w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, gdzie wymagane są niewielka masa produktów, zwiększona odporność na ścieranie, podwyższone własności wytrzymałościowe elementów, jak również możliwość naprawy elementów już gotowych. Obowiązek zmniejszenia masy elementów samochodowych, związany z przepisami dotyczącymi ograniczenia emisji spalin, wywołuje intensywne zainteresowanie magnezem. Najnowsze badania i analizy rozwoju magnezu i jego stopów koncentrują się na redukcji masy wytworzonych z niego elementów lub produktów, oszczędności energii i ograniczaniu negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Wraz ze zmniejszeniem masy obserwuje się poprawę warunków jazdy, co jest związane głównie z dynamicznym zachowaniem się pojazdów. Potrzeba zmniejszenia masy pojazdu jest bardzo ważna, ponieważ coraz więcej z nich wyposażonych jest w dodatkowe akcesoria (np. poduszki powietrzne, pasy bezpieczeństwa, systemy podnoszenia i opuszczania szyb w samochodzie), które zwiększają masę i mają wpływ nie tylko na bezpieczeństwo, ale

również na atrakcyjność użytkową tych pojazdów. Zastosowanie magnezu i jego stopów w przemyśle samochodowym w ciągu ostatniej dekady stale rośnie, z powodu wykorzystania go do produkcji takich elementów, jak: zawory, zegary, kierownice, armatura kierownicy, cylindry, kadłuby skrzynek przekładniowych, obudowy sprzęgła, skrzynie korbowe niższe, kolektory wlotowe, hamulce i pedały gazu oraz siedzenia. Obecnie w samochodach wielu marek stosuje się 7-26 kg magnezu do produkcji różnych elementów. Przykładowo, firma *General Motors* w swoich dużych samochodach (*Savana*, *Expres*) zużywa 26,3 kg odlewów ze stopów magnezu, a w samochodach mniejszych (*Safari*, *Astro*) – 16,5 kg, *Ford-F*150 – 14,5 kg, *VW Passat* oraz *Audi A*4 i *A*6 od 13,6 do 14,5 kg, *Alfa Romeo* – 9,3 kg. Zakładając, że 20 kg stopu magnezu będzie wykorzystywane w 25% z ok. 60 mln samochodów produkowanych rocznie w skali światowej, oznacza to, że przemysł samochodowy potrzebuje 300 tysięcy ton stopów magnezu. Strategia dotycząca wykorzystania magnezu w pojazdach, w celu osiągnięcia *drugiego wieku magnezu*, opiera się na zastosowaniu elementów odlewanych. Dalszy rozwój własności stopów magnezu (np. zwiększona odporność na pełzanie) będzie pomocny. Materiał, z którego wykonane są elementy znajdujące się w karoserii, blachach i wytłoczkach w ekskluzywnych pojazdach, charakteryzuje się dobrą ciągliwością i możliwością pochłaniania energii.

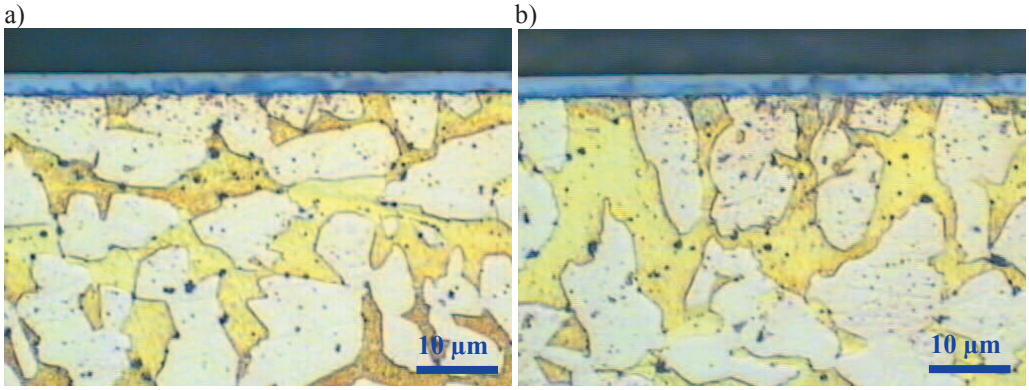
Przeprowadzone rozeznanie wskazuje, że istnieje ciągłe zapotrzebowanie, zgłaszane przez przemysł, na kompleksowe badania dotyczące przetwarzania magnezu, rozwoju jego stopów, łączenia, obróbki powierzchni, odporności na korozję i poprawy własności mechanicznych i użytkowych. Wśród różnych metod służących polepszeniu własności warstwy wierzchniej stopów magnezu, w tym: odporności na korozję, własności smarnych, wysokiej odporności na tarcie, odporności na zaparowanie, twardości i własności dekoracyjnych, można wyróżnić pokrywanie galwaniczne, anodowanie, fizyczne nanoszenie powłok z fazy gazowej (PVD) i platerowanie. Należy jednak podkreślić, że zalety powierzchniowej obróbki laserowej, takie jak krótki czas procesu, elastyczność i precyzja wykonania operacji technologicznych, dzięki możliwości dokładnej regulacji warunków procesu: prędkości skanowania i mocy wiązki lasera, rodzaju i grubości wtapianego materiału oraz objętości gazu osłonowego, decydują o możliwości efektywnego jej zastosowania w celu polepszenia własności elementów wytworzonych z odlewniczych stopów magnezu i stopniowego uzyskiwania przewagi konkurencyjnej nad technologiami opcjonalnymi.

Zarówno klasyczne badania materiałoznawcze, jak i oceny dokonane z użyciem metodologii opracowanej w niniejszej rozprawie, wskazują na uzasadnioną potrzebę rozwoju laserowej obróbki powierzchniowej odlewniczych stopów magnezu pozytywnie weryfikując i w tym przypadku przyjęte założenie o możliwości prognozowania rozwoju technologii bez konieczności wykonywania w tym celu badań materiałoznawczych.

S3 Fizyczne osadzanie z fazy gazowej powłok na stop miedzi z cynkiem

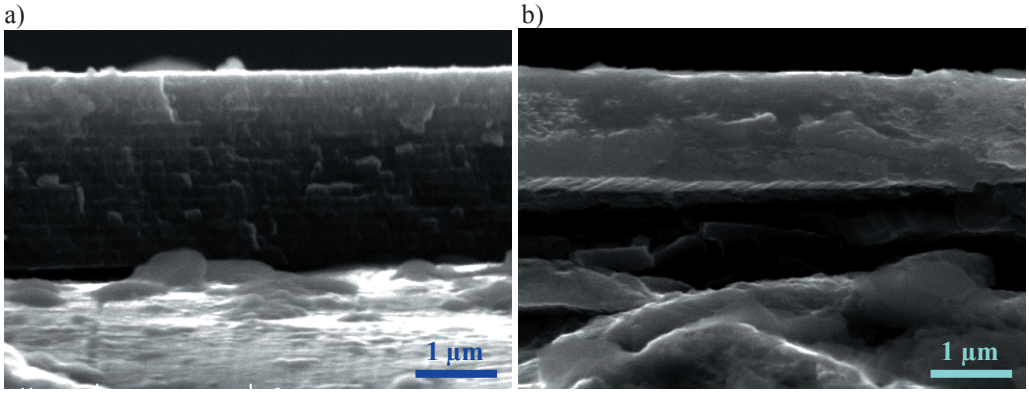
Grupę technologii *S*3 obejmującą fizyczne osadzanie z fazy gazowej (PVD) powłok na stop miedzi z cynkiem CuZn40Pb2, stosując jako kryterium podziału liczbę warstw składających się na daną powłokę PVD, na potrzeby wykonanych badań eksperymentalno-porównawczych [91, 161, 171] podzielono na trzy homogeniczne grupy: nanoszenie jednowarstwowych (A_{S3}), wielowarstwowych złożonych z 15 warstw (B_{S3}) i multiwarstwowych złożonych ze 150 warstw (C_{S3}) powłok metodą reaktywnego rozpylania magnetronowego (ang.: *Reactive Magnetron Sputtering* – RMS). Technologia ta, jako jedna z wielu możliwości fizycznego osadzania powłok z fazy gazowej (PVD), polega na rozpylaniu materiału, będącego substratem otrzymywanej powłoki, przez jony gazu wytworzone w obszarze między plazmą a wsadem. Rozpylone jony przechodzą przez plazmę, a ulegając jonizacji oraz ewentualnym reakcjom z jonami i atomami gazu reaktywnego, powodują osadzanie się powłoki.

Badania struktury warstwy wierzchniej (rys. 72), fraktograficzne (rys. 73), składu fazowego, tekstury, własności mechanicznych i użytkowych, w tym odporności na erozję, ścieranie

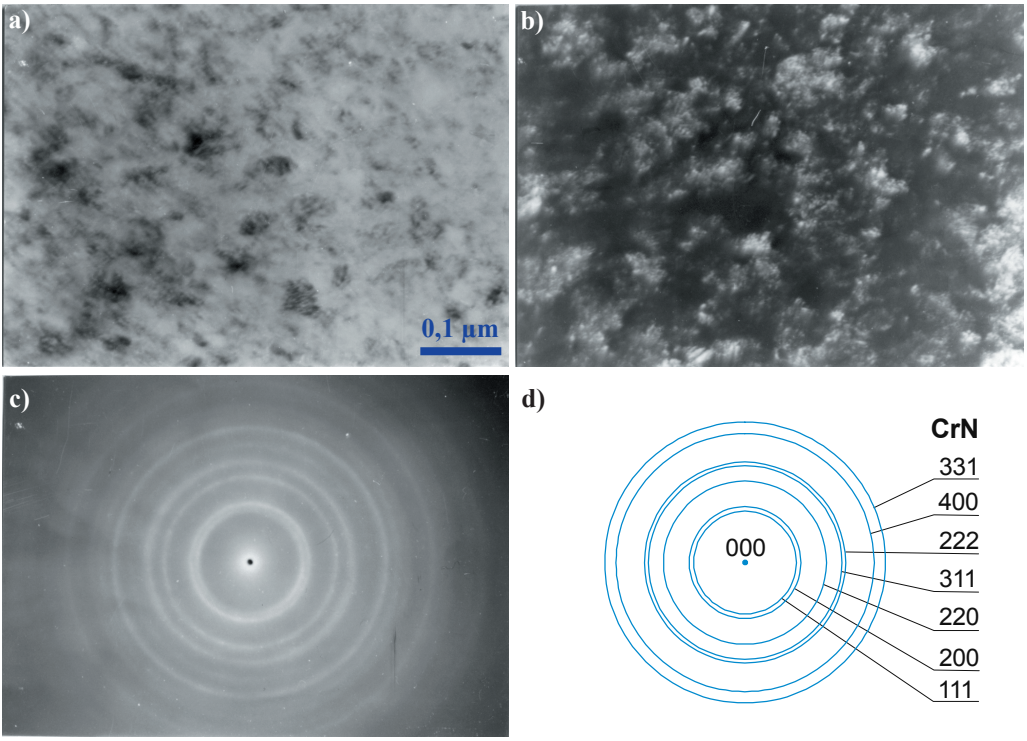


Rysunek 72. *Powłoki: a) Mo/TiAlN×15 i b) Mo/TiAlN×150, naniesione na podłoże ze stopu miedzi z cynkiem; mikroskop świetlny [91, 161]*

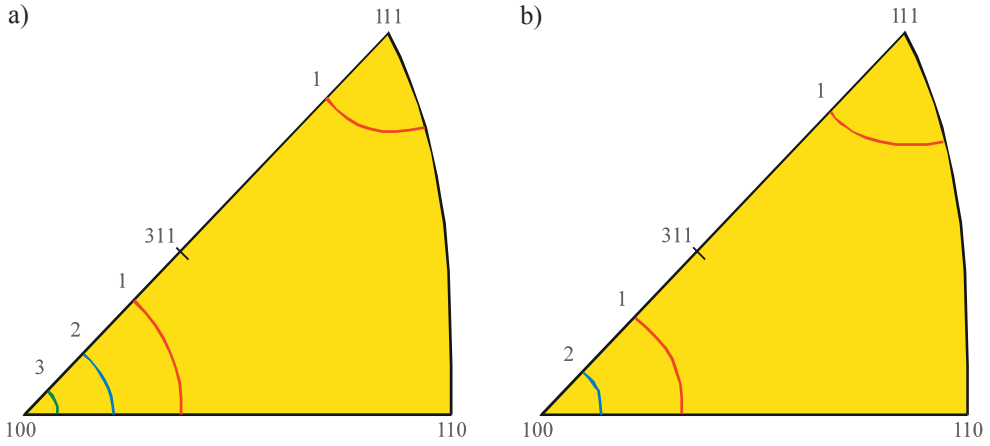
i korozję, składające się na wykonane eksperymenty materiałoznawcze, wykazują znaczne polepszenie własności elementów wykonanych z miękkiego stopu miedzi z cynkiem, w wyniku naniesienia twardych jedno-, wielo- lub multiwarstwowych powłok PVD metodą reaktywnego rozpylania magnetronowego (RMS). Morfologia powierzchni badanych powłok cechuje się dużą niejednorodnością związaną z występowaniem na powierzchni licznych cząstek w kształcie kropli lub zbliżonym do kulistego, co związane jest z istotą procesu fizycznego osadzania powłok z fazy gazowej (PVD). Wyniki badań cienkich folii otrzymanych z powłok (rys. 74) wykazują obecność drobnych krystalitów o średniej wielkości ok. 50-120 nm. Skład fazowy powłok i podłoża badano także metodą rentgenowskiej jakościowej analizy fazowej. Analiza tekstury badanych powłok wykonana z wykorzystaniem odwrotnych figur biegunowych (rys. 75) wskazuje w większości przypadków na teksturę podwójną {111} i {100} lub {110} i {311}. Badania zmiany stężenia składników powłok oraz materiału podłoża w zależności od liczby naniesionych warstw (rys. 76) wskazują, że w strefie połączenia od powierzchni powłok następuje zwiększanie się stężenia pierwiastków wchodzących w skład podłoża, przy równoczesnym gwałtownie zmniejszającym się stężeniu pierwiastków tworzących powłoki. Naniesienie powłok na badane próbki powoduje znaczne zwiększenie chropowatości R_a do 0,15-0,29 μm i współczynnika tarcia do 0,33-0,52. W wyniku badań twardości dynamicznej wykazano, że największą twardością cechują się powłoki jednowarstwowe, a wraz ze wzrostem liczby warstw twardość powłok maleje. Moduł Younga badanych powłok zawiera się w przedziale 348-210 GPa. Mniejsze wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej są charakterystyczne dla powłok wielowarstwowych. Polepszone własności wytrzymałościowe



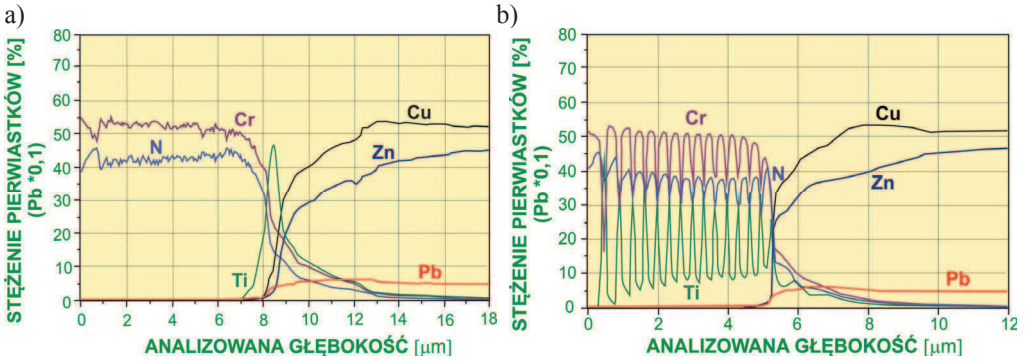
Rysunek 73. *Przełom powłok: a) Ti/TiAlN×15 i b) Ti/TiAlN×150 naniesionych na podłoże ze stopu miedzi z cynkiem CuZn40Pb2; skaningowy mikroskop elektronowy [91, 161, 171]*



Rysunek 74. *Struktura cienkiej folii wykonanej z powłoki Ti/CrN×1 naniesionej na podłoże CuZn40Pb2; a) obraz w polu jasnym, b) obraz w polu ciemnym z refleksów 111, c) dyfraktogram z obszaru jak na rysunku a, d) rozwiązanie z dyfraktogramu z rysunku c; transmisyjny mikroskop elektronowy [91, 161]*



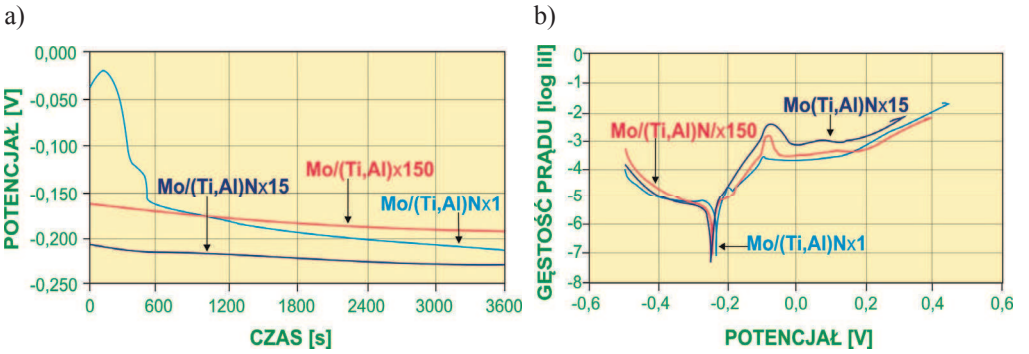
Rysunek 75. *Odwrotne figury biegunowe przedstawiające rozkład normalnej do powierzchni naniesionej powłoki: a) Ti/CrN×1 i b) Ti/CrN×15, w trójkącie podstawowym 100-110-111 [91, 161]*



Rysunek 76. *Zmiany stężenia składników powłoki: a) Ti/CrN×1 i b) Ti/CrN×15 oraz materiału podłoża; badania wykonano w spektrometrze optycznym wyładowania jarzeniowego GDOS [91, 161]*

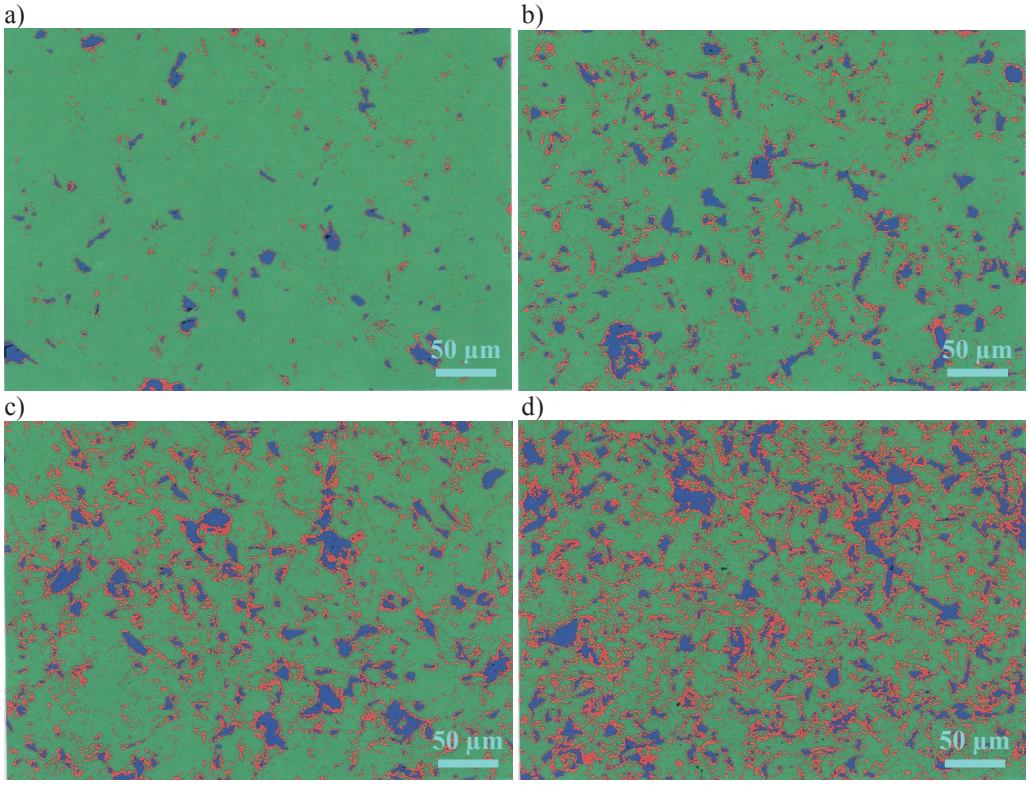
materiału po naniesieniu powłoki potwierdzają wyniki badań naprężeń własnych wykonane metodami analizy rentgenowskiej. Metodą zarysowania wyznaczono wartości obciążenia krytycznego, charakteryzującego przyczepność badanych powłok do materiału podłoża. Stwierdzono, że obciążenie krytyczne maleje wraz ze wzrostem liczby warstw w powłoce. Próba przełomu próbek wskazuje na dobrą przyczepność powłok do podłoża, jednak przy obciążeniu maksymalnym ma miejsce prawie całkowita ich delaminacja [171].

Naniesienie powłok z fazy gazowej (PVD) pozwala na polepszenie własności użytkowych pokrytych nimi elementów. Analiza krzywych polaryzacji anodowej i potencjału korozyjnego (rys. 77) wskazuje na lepszą odporność korozyjną próbek z naniesionymi powłokami (0,2-0,6 µA/cm^2), co potwierdzają wyniki pomiarów impedancyjnych i polaryzacyjnych. Najlepsze



Rysunek 77. *Krzywe potencjału korozyjnego w funkcji czasu (a) i krzywe polaryzacji anodowej (b) w jednomolowym roztworze HCl dotyczące powłok typu Mo/(Ti,Al)N naniesionych na podłoże ze stopu miedzi z cynkiem [91, 161]*

własności antykorozyjne wykazują powłoki wielowarstwowe o liczbie warstw 150 i 15, natomiast największą odporność na działanie erodenta – powłoki jednowarstwowe, a w szczególności Ti/CrN×1. Odporność erozyjna powłok jednowarstwowych jest około czterokrotnie większa od wielowarstwowych, co związane jest najpewniej z występowaniem w nich licznych naprzemianległych miękkich warstw czystego tytanu. Liczba warstw w powłoce decyduje o gęstości miejsc, w których następuje inicjacja uszkodzenia erozyjnego (rys. 78). Wyniki badania metodą *pin-on-disc* odporności na zużycie ścierne materiału z naniesionymi powłokami wskazują, że najlepszymi własnościami trybologicznymi cechują się powłoki jednowarstwowe, a w szczególności powłoki Ti/CrN×1. Przeprowadzona analiza wykazuje, że nie jest możliwe opracowanie jednej uniwersalnej powłoki, lecz w zależności od przewidywanych warunków eksploatacji zasadne jest nanoszenie powłok wielowarstwowych, zwiększających znacznie odporność korozyjną, lub twardych powłok jednowarstwowych odpornych na zużycie



Rysunek 78. *Powierzchnia powłoki Ti/ZrN×1 na różnych etapach testu erozyjnego: a) po 0,1 s, b) po 0,2 s, c) po 0,3 s, d) po 0,4 s; skaningowy mikroskop elektronowy [91, 161]*

ścierne i erozję, zwiększających odporność na zadrapania i rysy powstające podczas kontaktu z twardymi materiałami. Badania materiałoznawcze wskazują na celowość rozwoju opisywanych technologii.

Na podstawie oceny wartości technologii wszystkie grupy technologii zakwalifikowano do najbardziej obiecującej ćwiartki macierzy dendrologicznej, zwanej rozłożystym dębem, charakteryzującej technologie o dużym potencjale i wysokiej atrakcyjności. Najlepszy wynik osiąga grupa technologii C_{S3}^{d} (7,5, 8,5) pokrywania multiwarstwowymi (o liczbie 150) powłokami fizycznie osadzanymi z fazy gazowej (PVD), nieco gorszy – grupa technologii pokrywania powłokami jednowarstwowymi A_{S3}^{d} (7,0, 8,0), a najsłabszy – grupa technologii B_{S3}^{d} (6,6, 7,6) pokrywania powłokami wielowarstwowymi o liczbie 15. Badania intensywności oddziaływania pozytywnych i negatywnych czynników otoczenia na analizowane technologie wykazują, że we wszystkich przypadkach otoczenie jest niezwykle sprzyjające, niosące dużo sposobności i niewiele trudności, czego obrazem jest umieszczenie wszystkich analizowanych technologii w ćwiartce odpowiadającej słonecznej wiośnie. Ponownie najwyższą ocenę uzyskuje grupa technologii oznaczona jako C_{S3}^{m} (3,5, 7,4), nieco niższą – grupa technologii A_{S3}^{m} (4,0, 7,2), a najniższą – grupa technologii oznaczona jako B_{S3}^{m} (4,4, 6,4). Na kolejnym etapie badań sporządzono macierz strategii dla technologii przedstawiającą graficznie miejsce technologii nanoszenia powłok o zróżnicowanej liczbie warstw metodą reaktywnego odparowania magnetronowego na podłoże CuZn40Pb2, z uwzględnieniem ich wartości i intensywności oddziaływania otoczenia oraz wskazującą odpowiednią strategię postępowania. Wszystkie trzy analizowane technologie, jako bardzo dobrze rokujące, znajdują się w najlepszym z możliwych polu macierzy – dębu wiosną, otrzymując 9 punktów w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, a rekomendowana w odniesieniu do nich strategia polega na rozwijaniu, umacnianiu i implementacji atrakcyjnych technologii o dużym potencjale w praktyce przemysłowej, w celu odniesienia przez nie spektakularnego sukcesu.

Elementy wykonane z miękkich stopów metali nieżelaznych, w tym stopów miedzi z cynkiem, pokryte twardymi jedno-, wielo- lub multiwarstwowymi powłokami naniesionymi z fazy gazowej, znajdują zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, meblarskim i armatury sanitarnej oraz budownictwie. Dalszych badań wymaga określenie odporności na zmęczenie cieplne twardych powłok nanoszonych na miękkie podłoże, w celu zdefiniowania możliwego zakresu ich zastosowań. Opisywana grupa technologii jest proekologiczną

alternatywą do tradycyjnych, niekorzystnie oddziałujących na środowisko technologii galwanicznych, wpływa na obniżenie kosztów produkcji, poprawę warunków pracy poprzez całkowitą eliminację zagrożenia zdrowia i życia pracowników, jak również pozwala wykluczyć wszelkie problemy związane z utylizacją odpadów, występujące w przypadku stosowania konwencjonalnych technologii galwanicznych. Powłoki naniesione metodą fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) charakteryzują się ponadto bardzo dobrą przyczepnością do podłoża, wysoką odpornością na korozję, wymaganą odpornością na zużycie ścierne oraz małą chropowatością połączoną z dużym połyskiem, oczekiwanym ze względów estetycznych. Ograniczeniem w stosowaniu twardych powłok na miękkim podłożu jest powstawanie wysokich naprężeń w samych powłokach oraz na styku materiał podłoża-powłoka.

Prognozowane kierunki przyszłego rozwoju technologii fizycznego osadzania powłok z fazy gazowej (PVD) przewidują stosowanie w procesach wytwórczych temperatury zbliżonej do 600ºC, zapewniającej zwiększenie przyczepności powłoki do materiału podłoża przez uzyskanie połączenia częściowo dyfuzyjnego. Przewiduje się, że przyszłość należy do powłok nanostrukturalnych, w tym nanokompozytowych, inteligentnych i hybrydowych. Duże nadzieje wiąże się także z zastosowaniem modulowanych powłok wielowarstwowych o dużej liczbie pojedynczych warstw. W szczególności na uwagę zasługują powłoki zbudowane z niewielkiej liczby pojedynczych warstw, których wytwarzanie zasadza się na zakłóceniu kolumnowego wzrostu kryształów w procesie PVD, powłoki z dużą liczbą warstw nieizostrukturalnych, a także powłoki z dużą liczbą warstw izostrukturalnych, tzw. *supersieci*.

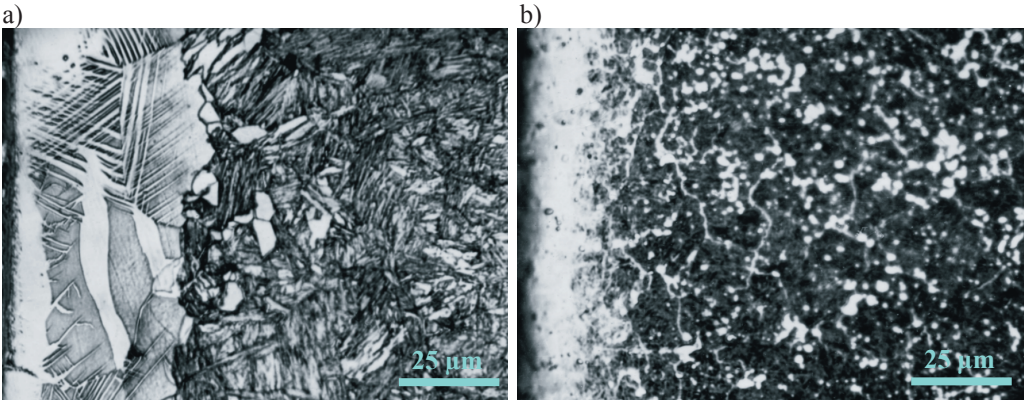
Wykonane badania materiałoznawcze, a także wyniki prognoz opracowanych z wykorzystaniem metodologii opracowanej w niniejszej rozprawie, zgodnie wskazują na potrzebę rozwijania technologii PVD nanoszenia powłok na podłoże ze stopu miedzi z cynkiem, co stanowi kolejny dowód na pozytywną weryfikację doświadczalną przyjętego założenia o przydatności zbioru metod opracowanych w niniejszej rozprawie.

S4 Wybrane technologie obróbki cieplno-chemicznej stali

Grupę technologii *S*4, obejmującą wybrane technologie obróbki cieplno-chemicznej stali, w celu wykonania badań eksperymentalno-porównawczych, podzielono, ze względu na rodzaj obróbki, na następujące homogeniczne grupy [93, 161]: azotowanie i jego odmiany (A_{S4}), nawęglanie i węgloazotowanie wysokotemperaturowe (B_{S4}) i borowanie dyfuzyjne (C_{S4}).

Wykonano badania warstw powierzchniowych wybranych stali maszynowych, narzędziowych stopowych do pracy na gorąco i szybkotnących poddanych azotowaniu, nawęglaniu lub borowaniu dyfuzyjnemu. Spośród wielu możliwości badawczych wytypowano wymienione materiały i technologie, głównie z uwagi na szeroki zakres temperatury obróbki cieplnej poprzedzającej obróbkę cieplno-chemiczną, począwszy od niemal najniższych możliwych wartości temperatury austenityzowania w odniesieniu do stali maszynowych do najwyższych stosowanych w przypadku stali szybkotnących, a także z uwagi na stosowanie obróbki cieplno-chemicznej po hartowaniu i odpuszczaniu, jak w przypadku azotowania oraz przed hartowaniem i odpuszczaniem, jak w przypadku nawęglania albo borowania.

Klasyczne azotowanie gazowe wykonano w temperaturze 540°C w atmosferze częściowo zdysocjowanego amoniaku. Na powierzchni badanych stali powstaje warstwa azotków o twardości do ok. 1500 HV 0,05, przechodząca w strefę dyfuzyjną aż do rdzenia, o twardości zależnej od składu chemicznego i warunków obróbki cieplnej stali. Największą grubość strefy ciągłej azotków oraz całej warstwy dyfuzyjnej stwierdzono w stali maszynowej do azotowania 38CrAlMo6-10 (rys. 79a), natomiast największą twardością przy powierzchni cechują się stale szybkotnące HS6-5-2 (rys. 79b) i HS12-0-2+C. Badania struktury warstwy powierzchniowej stali narzędziowej do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 po azotowaniu gazowym w atmosferze zdysocjowanego amoniaku w temperaturze 570°C wykazują, że składa się ona z ciągłej strefy azotków o twardości ok. 1340 HV 0,05 oraz leżącej pod nią strefy dyfuzyjnej, mającej strukturę martenzytu odpuszczonego z dyspersyjnymi wydzieleniami węglików i azotków. Stale po

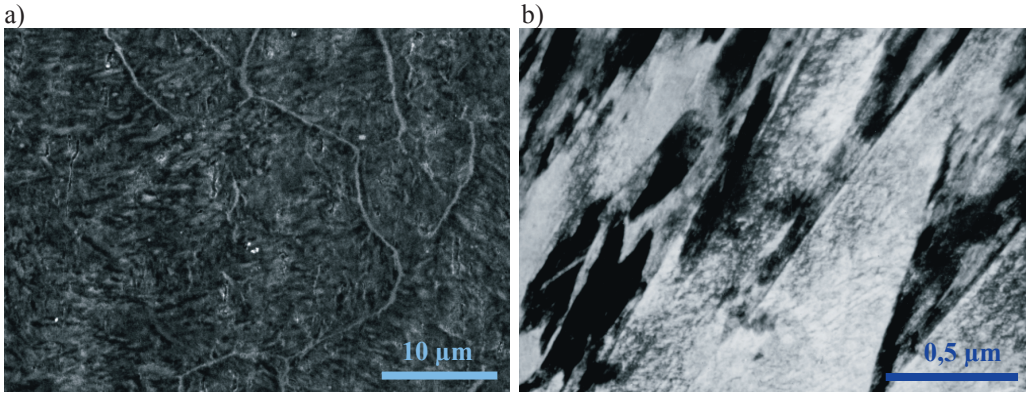


***Rysunek 79**. Struktury warstw powierzchniowych zahartowanych i odpuszczonych stali azotowanych gazowo w atmosferze amoniaku w temperaturze 570°C: a) stal 38CrAlMo6-10, czas azotowania 8 h; b) stal HS6-5-2, czas azotowania 4 h; mikroskop świetlny [93, 161]*

azotowaniu gazowym charakteryzuje mniejsza udarność, a w przypadku małej grubości warstwy w porównaniu z wymiarami elementu – większa wytrzymałość na zginanie statyczne.

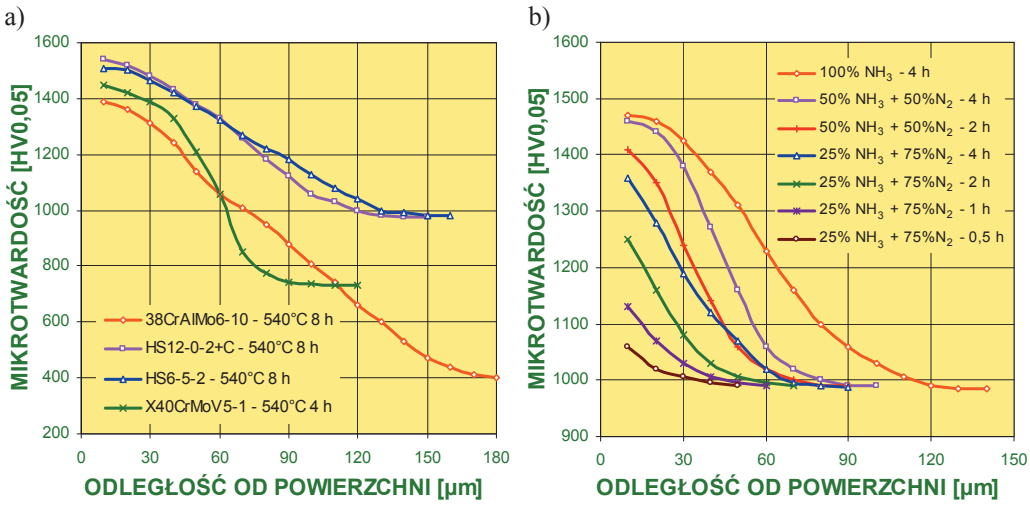
Polepszenie własności eksploatacyjnych narzędzi skrawających wykonanych ze stali szybkotnących uzyskiwane jest najczęściej w wyniku niskotemperaturowej obróbki, której są poddawane obrobione cieplnie narzędzia. Najkorzystniejsze własności eksploatacyjne narzędziom skrawającym naazotowanym zapewnia warstwa wierzchnia o strukturze martenzytu odpuszczonego z dyspersyjnymi wydzieleniami azotków rozmieszczonymi równomiernie w osnowie. Z wykonanych badań wynika, że obecność warstwy tlenków na powierzchni wierteł bardzo korzystnie wpływa na ich trwałość, co można zapewnić w procesach pasywowania, selektywnego azotowania i tlenoazotowania.

Azotowaniu plazmowemu, umożliwiającemu większą kontrolę struktury uzyskanej warstwy wierzchniej w porównaniu z azotowaniem gazowym, poddano stal X37CrMoV5-1 (rys. 80a), co zapewnia wysoką twardość jej warstwy wierzchniej (do 1480 HV 0,1), wzrost chropowatości do 0,08 μm i polepszenie własności trybologicznych, wyrażone zmniejszeniem współczynnika tarcia do 0,4 (w temperaturze 20°C) i 0,6 (w 500°C). Azotowanie i jego odmiany wpływają na zwiększenie trwałości wielu narzędzi, w tym narażonych na cykliczne zmiany temperatury. Największą odporność na zmęczenie cieplne wykazują stale X37CrMoV5-1, X40CrMoV5-1 i 40CrWMoVB17-11-16 po austenityzowaniu w temperaturze zapewniającej drobnoziarnistą strukturę austenitu pierwotnego oraz stosunkowo wysoką twardość – po hartowaniu i dwukrotnym odpuszczaniu w 600°C.

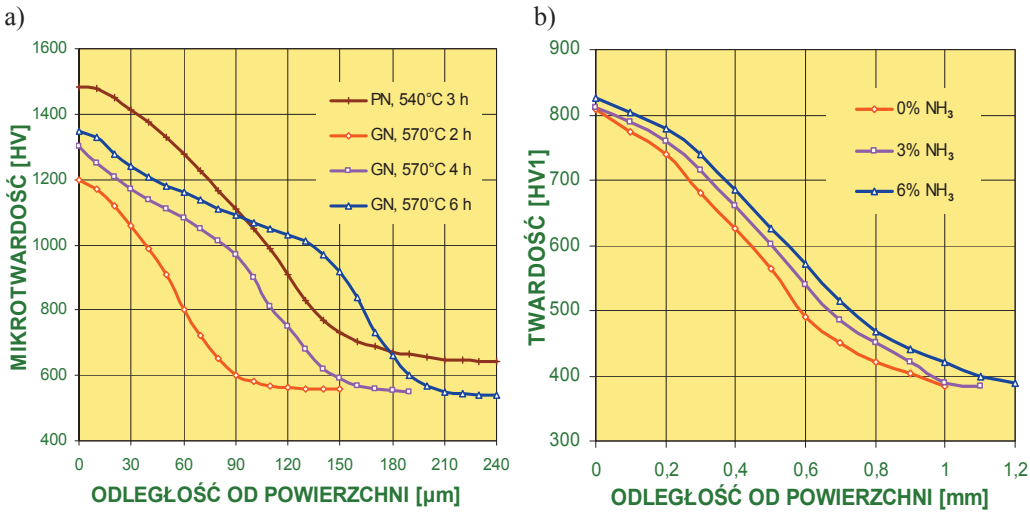


Rysunek 80. *Struktury warstw powierzchniowych: a) stali X37CrMoV5-1 azotowanej plazmowo; skaningowy mikroskop elektronowy; b) cienkiej folii ze stali 18CrMnTi4-4 po nawęglaniu w 880°C i hartowaniu z 840°C; transmisyjny mikroskop elektronowy [93, 161]*

Badania struktury i własności warstw powierzchniowych po nawęglaniu i węgloazotowaniu wykonano w odniesieniu do stali maszynowej 18CrMnTi4-4, której struktura w warstwie wierzchniej po nawęglaniu w temperaturze 880°C i hartowaniu składa się z martenzytu listwowego o dużej gęstości dyslokacji, częściowo zbliźniaczonego, oraz austenitu szczątkowego (rys. 80b). Azot wpływa na obniżenie temperatury początku i końca przemiany martenzytycznej, w związku z tym w stali po zastosowanym węgloazotowaniu wysokotemperaturowym zachodzą znaczące zmiany struktury w warstwie wierzchniej, polegające przede wszystkim na zwiększeniu udziału austenitu szczątkowego z 22 do ok. 39%. W warstwie nawęglonej i węgloazotowanej w niektórych obszarach martenzytu występują dyspersyjne wydzielenia cementytu, które tworzą się podczas samoodpuszczania martenzytu. Ostateczne własności stali nawęglonej lub węgloazotowanej nadaje hartowanie i niskie odpuszczanie, zapewniające w warstwie powierzchniowej strukturę martenzytu nisko odpuszczonego z dyspersyjnymi wydzieleniami cementytu i z austenitem szczątkowym. Wykazano, że warstwy powierzchniowe utworzone podczas nawęglania i węgloazotowania przyczyniają się do zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej Z_{gj} i trwałości kół zębatych. Reprezentatywne wyniki pomiarów mikrotwardości na przekroju warstwy wierzchniej wybranych stali poddanych azotowaniu i twardości stali po nawęglaniu lub węgloazotowaniu zaprezentowano na rysunkach 81 i 82.



Rysunek 81. *Rozkład mikrotwardości w warstwie powierzchniowej: a) wybranych stali zahartowanych, odpuszczonych i azotowanych gazowo w 540°C, b) stali HS6-5-2 zahartowanej z 1230°C, odpuszczonej w 550°C i azotowanej gazowo w 540°C w atmosferze amoniaku z dodatkiem azotu [93,161]*



Rysunek 82. *Rozkład mikrotwardości lub twardości w warstwie powierzchniowej: a) stali X40CrMoV5-1 azotowanej gazowo (GN) oraz X37CrMoV5-1 azotowanej plazmowo (PN); b) stali 18CrMnTi4-4 po nawęglaniu i węgloazotowaniu z dodatkiem 3 i 6% NH_3, w temperaturze 880°C przez 5 h i hartowaniu z 840°C [93, 161]*

W toku badań borowaniu dyfuzyjnemu poddano stal narzędziową X40CrMoV5-1 o dużej odporności na cykliczne zmiany temperatury oraz o wysokiej temperaturze austenityzowania. Na powierzchni badanej stali tworzy się dwustrefowa warstwa borków, tj. zewnętrzna strefa FeB o znacznym udziale porów, oraz graniczącą z podłożem strefa Fe_2B. Bezpośrednio pod warstwą borków znajdują się kolejno dwie strefy cechujące się niską twardością: ferrytu krzemowego z wydzieleniami Fe_2B i martenzytu z wydzieleniami $M_{23}X_6$, a pod nimi występuje twardszy rdzeń (760 HV 0,05 w stali borowanej w 1030°C i bezpośrednio zahartowanej). Borowanie powoduje zwiększenie twardości, wzrost odporności na ścieranie i poprawę własności antykorozyjnych, lecz przyczynia się do zmniejszenia odporności na zmęczenie cieplne stali.

Wykonane badania materiałoznawcze wskazują na celowość kontynuacji procesów wytwarzania z wykorzystaniem niektórych klasycznych technologii obróbki cieplno-chemicznej, np. azotowania plazmowego i węgloazotowania gazowego, lecz także na zanikające znaczenie innych technologii, np. borowania i konwencjonalnego azotowania gazowego, m.in. ze względu na aspekty ekologiczne i stosunkowo niewielką jakość elementów wytworzonych tymi metodami, w odniesieniu do metod bardziej nowoczesnych.

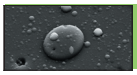
Ekspercka ocena wartości technologii wykazuje, że grupa technologii A_{S4}^{d} (5,9, 5,4) odpowiadająca azotowaniu i jego odmianom oraz grupa technologii B_{S4}^{d} (5,6, 5,1) oznaczająca nawęglanie i węgloazotowanie wysokotemperaturowe zostały zakwalifikowane do ćwiartki macierzy dendrologicznej zwanej ukorzenioną kosodrzewiną, charakteryzującej solidne sprawdzone technologie o dużym potencjale i ograniczonej atrakcyjności. Borowanie dyfuzyjne C_{S4}^{d} (2,0, 2,3) umieszczono natomiast w najsłabiej rokującej ćwiartce macierzy dendrologicznej, zwanej drżącą osiką, w której zawierają się technologie o zarówno ograniczonym potencjale, jak i niewielkiej atrakcyjności. Wyniki badań intensywności oddziaływania otoczenia zaprezentowane z użyciem macierzy meteorologicznej wykazują, że w przypadku wszystkich trzech badanych grup technologii otoczenie jest przewidywalne i stabilne o neutralnym charakterze, a co za tym idzie nie należy się spodziewać płynących z niego spektakularnych szans, ani nieprzewidywalnych trudności wybitnie niesprzyjających rozwojowi analizowanych grup technologii. Zbliżone wyniki uzyskuje grupa technologii A_{S4}^{m} (3,3, 5,3) oraz grupa technologii B_{S4}^{m} (3,1, 4,9), natomiast grupa technologii C_{S4}^{m} (4,7, 3,3) plasuje się na słabszej pozycji, co oznacza mniej sposobności i więcej trudności, które będą w przyszłości jej towarzyszyć. Analiza z użyciem macierzy strategii dla technologii, przedstawiającej graficznie miejsce poszczególnych grup technologii obróbki cieplno-chemicznej stali z uwzględnieniem ich wartości i intensywności oddziaływania otoczenia oraz wskazującej odpowiednią strategię postępowania, pozwala stwierdzić, że zgodnie z oceną ekspercką w odniesieniu do azotowania i jego odmian A_{S4}^{s} (6,7, 4,5) oraz nawęglania i węgloazotowania wysokotemperaturowego B_{S4}^{s} (6,6, 4,5) rekomendowane jest zastosowanie strategii kosodrzewiny jesienią, zalecającej czerpanie zysków z realizacji produkcji w stabilnym przewidywalnym otoczeniu z wykorzystaniem solidnej technologii, którą należy unowocześniać i intensywnie promować w celu wzmocnienia jej atrakcyjności. W odniesieniu do borowania dyfuzyjnego C_{S4}^{s} (1,6, 3,6) należy natomiast zastosować strategię osiki jesienią, zalecającą powolne wycofywanie z rynku technologii bez nowych możliwości i bez perspektyw rozwoju.

Metody obróbki cieplno-chemicznej, należące do jednych z najbardziej klasycznych metod kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich, w tym zwłaszcza różne odmiany azotowania i nawęglania, są obecnie powszechnie stosowane w przemyśle maszynowym, narzędziowym, motoryzacyjnym i precyzyjnym w celu polepszenia

własności użytkowych elementów maszyn i narzędzi. Dotyczy to zwłaszcza warstw powierzchniowych o grubości od kilku dziesiątych mm do ponad 1 mm, o łagodnym przejściu własności od powierzchni do rdzenia elementu. Prowadzone są nadal badania służące polepszeniu własności użytkowych elementów obrobionych cieplno-chemicznie, w wyniku modyfikacji warunków w czasie samego nasycania dyfuzyjnego (zmiany temperatury, składu ośrodka nasycającego, czynników aktywujących), oraz obróbki cieplnej poprzedzającej azotowanie lub następującej po nawęglaniu. Wykonane badania materiałoznawczo-heurystyczne wykazują stabilne i pewne perspektywy rozwojowe różnych odmian azotowania oraz nawęglania i węgloazotowania, cechujących się dużym potencjałem i znajdujących się w neutralnym otoczeniu zapewniającym im powolny, acz stały rozwój. Przyszłość azotowania jest zależna od tempa rozwoju najbardziej perspektywicznej jego odmiany, czyli azotowania plazmowego oraz technologii hybrydowych z udziałem azotowania, np. bardzo obiecującego połączenia z technologią fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD), przy rozwoju azotowania pod obniżonym ciśnieniem, utrzymującym się na dotychczasowym poziomie i malejącym znaczeniu konwencjonalnego azotowania gazowego. Optymistyczny wariant rozwoju nawęglania i węgloazotowania wymaga natomiast umacniania i wzrostu znaczenia technologii najbardziej obiecujących: węgloazotowania plazmowego, nawęglania w kontrolowanej atmosferze gazu ziemnego oraz odmian węgloazotowania, umożliwiających bezpośrednie hartowanie i niskie odpuszczanie obrabianych elementów. Rozwojowi azotowania oraz nawęglania i węgloazotowania musi także towarzyszyć dążenie do doskonalenia tych technologii pod kątem minimalizacji emisji szkodliwych substancji do środowiska. Najsłabszymi perspektywami rozwojowymi charakteryzuje się borowanie dyfuzyjne, którego znaczenie najprawdopodobniej w najbliższych 20 latach będzie spadać, co jest powiązane z ograniczoną efektywnością, wysokimi kosztami i niekorzystnym wpływem dotychczas stosowanych technologii borowania na środowisko. Inny wariant wydarzeń może mieć miejsce tylko w przypadku istotnego przełomu, polegającego na odnalezieniu nowego szerokiego zakresu zastosowań przemysłowych i spektakularnego ulepszenia stosowanych obecnie rozwiązań, zwłaszcza w zakresie ochrony środowiska. Oceniając znaczenie analizowanych wybranych grup technologii konwencjonalnej obróbki cieplno-chemicznej stali, należy wyraźnie podkreślić szeroką skalę ich współczesnych zastosowań przemysłowych, a w wielu przypadkach brak możliwości zastąpienia ich rozsądnymi, zbliżonymi kosztowo

alternatywami. Rachunek ekonomiczny w połączeniu z dostępnością i powszechnością tych metod decydują zatem o ich ważnym miejscu wśród innych technologii inżynierii powierzchni materiałów inżynierskich w perspektywie najbliższych 20 lat, co uzasadnia ich miejsce w Księdze Technologii Krytycznych.

Technologie obróbki cieplno-chemicznej charakteryzują się zróżnicowanymi perspektywami rozwojowymi, od optymistycznych po prognozowane wyparcie z rynku, co będzie mieć miejsce w odniesieniu do borowania należącego do technologii schyłkowych. Zarówno badania materiałoznawcze, jak i badania heurystyczne, wykonane z użyciem metodologii opracowanej w niniejszej rozprawie, prowadzą do tożsamych wniosków o prognozowanym rozwoju technologii obróbki cieplno-chemicznej, co stanowi kolejny przykład pozytywnej weryfikacji doświadczalnej autorskiej metodologii.



S5 Nakładanie powłok PVD/CVD na spiekane materiały narzędziowe

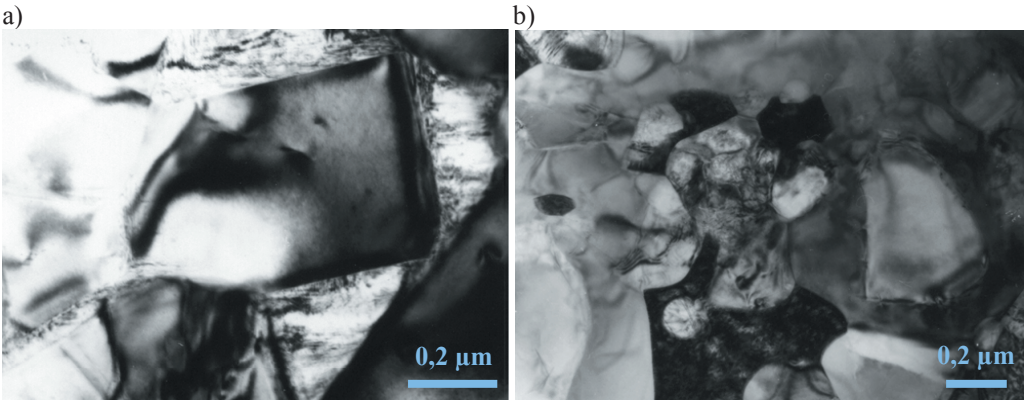
Kryterium podziału grupy technologii *S*5, obejmującej fizyczne lub chemiczne nakładanie powłok z fazy gazowej (PVD/CVD) na spiekane materiały narzędziowe na bazie węglików spiekanych[3)], cermetali[4)], ceramiki tlenkowej i azotkowej oraz sialonu, jest typ naniesionych powłok. Na potrzeby wykonanych badań [94, 161, 172, 173] wyróżniono osiem grup technologii szczegółowych: nanoszenie na spiekane materiały narzędziowe metodą katodowego odparowania łukowego (ang.: *Cathodic Arc Deposition* – CAD) następujących powłok: jednowarstwowych prostych (A_{S5}), jednowarstwowych złożonych klasycznych (B_{S5}), jednowarstwowych złożonych nanokrystalicznych (C_{S5}), wielowarstwowych o liczbie $n<10$ (D_{S5}), wielowarstwowych o liczbie $n\geq10$ (F_{S5}), gradientowych wielostopniowych (G_{S5}), gradientowych ciągłych (H_{S5}) oraz metodą klasycznego wysokotemperaturowego chemicznego osadzania z fazy gazowej (ang.: *Hot Filament Chemical Vapour Deposition* – HFCVD) powłok wielowarstwowych o liczbie $n<10$ (E_{S5}).

W wyniku obserwacji w mikroskopach elektronowych skaningowym i transmisyjnym stwierdzono, że badane spiekane materiały narzędziowe charakteryzują się dobrze zagęszczoną,

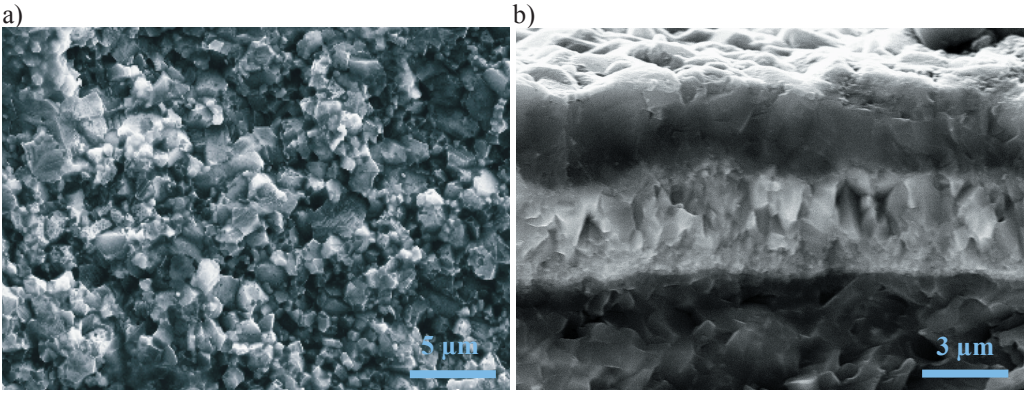
[3)] Badano węgliki spiekane typu *A* o składzie fazowym WC, Co i typu *B* o składzie fazowym WC, TiC, TaC, Co.

[4)] Badano cermetale typu *A* o składzie fazowym Ti(C,N), WC, TiC, TaC, Co, Ni i typu *B* o składzie fazowym Ti(C,N), TiC, TaC, WC, Co, Ni.

zwartą strukturą bez porów (rys. 83). Topografia powierzchni przełomu ceramiki tlenkowej i azotkowej (rys. 84 i 85) świadczy o dużej kruchości, charakterystycznej dla tlenkowych materiałów ceramicznych. Analiza składu chemicznego z użyciem spektrometru energii promieniowania rentgenowskiego (EDS) potwierdza obecność pierwiastków Al, Ti, O i C w strukturze podłoża badanych materiałów. Badania wykonane metodą rentgenowskiej jakościowej analizy fazowej potwierdzają skład fazowy badanego podłoża. Wykonane w skaningowym mikroskopie elektronowym badania fraktograficzne wykazują, że badane powłoki są naniesione równomiernie, nie mają porów, pęknięć i nieciągłości. Powłoki wielowarstwowe i gradientowe wielostopniowe mają wyraźne warstwy o równomiernej grubości szczelnie przylegające do siebie, jak również wielowarstwowe powłoki szczelnie

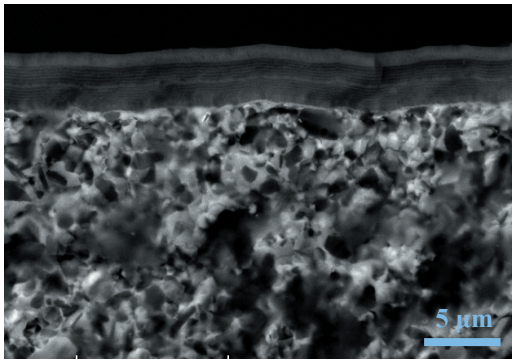


***Rysunek 83**. Struktury cienkiej folii z: a) węglika spiekanego typu A i b) cermetalu typu A; transmisyjny mikroskop elektronowy [94, 161]*

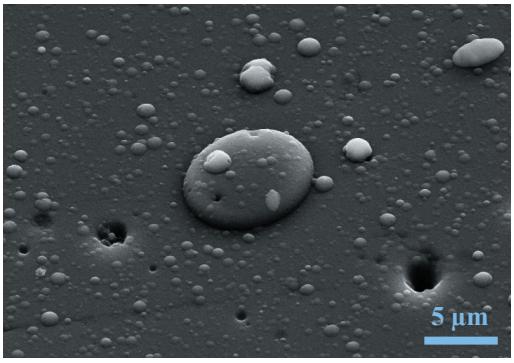


***Rysunek 84**. Przełom: a) podłoża z ceramiki tlenkowej Al_2O_3+TiC, b) wielowarstwowej powłoki CVD Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN naniesionej na ceramice sialonowej; skaningowy mikroskop elektronowy [94, 161]*

przylegają do podłoża. W powłokach naniesionych metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) na Si_3N_4 i SiAlON z warstwą TiN w strefie powierzchniowej stwierdzono liczne pory i sieci mikroszczelin, a w powłokach Ti(C,N)+TiN i TiC+TiN – pojedyncze niewielkie mikrocząstki w kształcie kulistym. Na powierzchni wszystkich powłok wytworzonych w procesie fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) występują liczne mikrocząstki w kształcie kropel (rys. 86), powstałe w wyniku rozpryskiwania się kropel tytanu wybitych z tarczy podczas procesu katodowego odparowania łukowego (CAD), co potwierdzają badania składu chemicznego mikroobszarów z użyciem spektrometru energii promieniowania rentgenowskiego (EDS). W wyniku wykonanych w transmisyjnym mikroskopie elektronowym badań cienkich folii określono skład fazowy badanych powłok. Rozróżnienie dyfrakcyjne faz TiN i Ti(C,N) oraz Ti(C,N), Ti(B,N) i TiN w powłokach nie jest możliwe z powodu izomorficzności tych faz. Struktura powłok gradientowych wielostopniowych cechuje się drobnoziarnistością. Powłoki (Ti,Al)N, Ti(C,N) charakteryzują się gradientową budową, co wykazuje wykonana z użyciem spektrometru EDS analiza liniowa zmian składu chemicznego między powłoką a podłożem. Oceny różnic jakościowych składu chemicznego w wybranych mikroobszarach badanych próbek dokonano także określając zmiany stężenia pierwiastków wchodzących w skład powłok i zawartych w materiale podłoża, z użyciem spektrometru optycznego wyładowania jarzeniowego GDOS (rys. 87). Rentgenowska jakościowa analiza fazowa potwierdza wytworzenie na powierzchni badanych materiałów powłok PVD zawierających odpowiednio fazy typu TiN, TiC oraz Ti(C,N) i powłok CVD zawierających fazy TiC, Ti(C,N), Al_2O_3 i TiN.

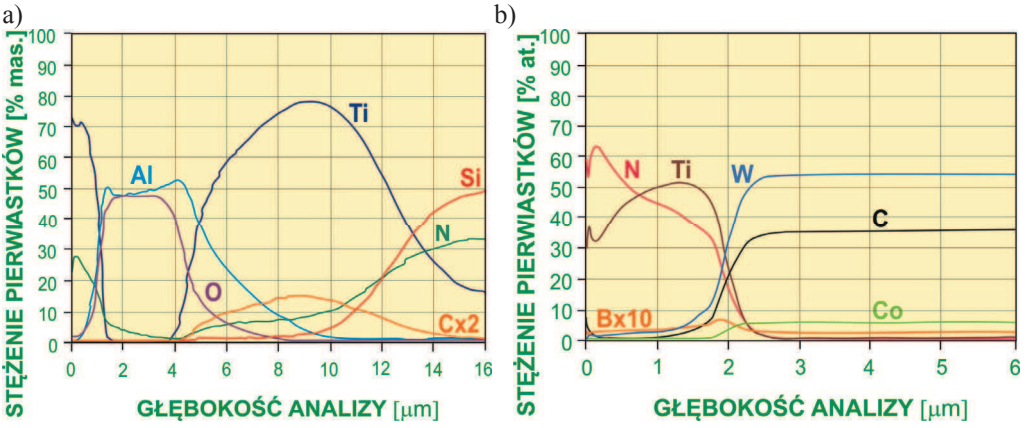


***Rysunek 85**. Powierzchnia przełomu powłoki wielowarstwowej TiN+multi(Ti,Al,Si)N+TiN naniesionej na podłoże z cermetalu; skaningowy mikroskop elektronowy [94, 161]*



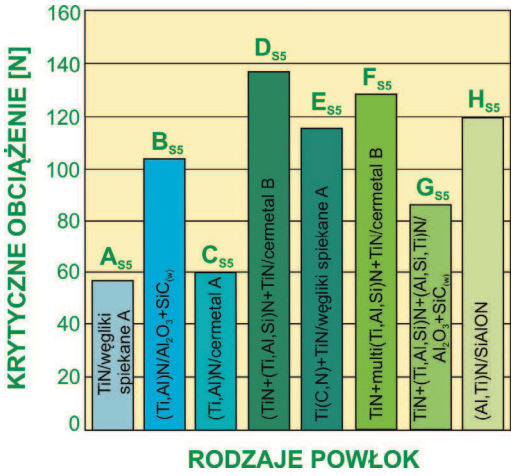
***Rysunek 86**. Topografia powierzchni powłoki gradientowej ciągłej Ti(C,N) naniesionej na podłoże z ceramiki sialonowej; skaningowy mikroskop elektronowy [94, 161]*

W ramach badania własności mechanicznych i użytkowych naniesionych powłok określono ich grubość, chropowatość, mikrotwardość, przyczepność i odporność na ścieranie. Wykonano także technologiczne próby skrawania i badania twardości podłoża. W wyniku pomiarów grubości powłok, wykonanych metodą *kalotestu*, stwierdzono największą grubość powłok, do 12,5 µm, naniesionych metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD). Grubość naniesionych metodą fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) powłok jednowarstwowych prostych wynosi zwykle poniżej 1 µm, a wielowarstwowych i gradientowych od 1,1 µm do 5,0 µm. Większość spośród badanych powłok charakteryzuje się grubością 2-3 µm, zapewniającą odporność na zużycie i dobrą przyczepność. Wykonane badania chropowatości wykazują, że średnio najniższe wartości parametru R_a cechują powłoki jednowarstwowe złożone nanokrystaliczne (od 0,12 do 0,27 µm). Niską chropowatością charakteryzują się również powłoki CVD (z wyjątkiem zawierających Al_2O_3) i powłoki gradientowe ciągłe typu Ti(C,N) na podłożu z węglików spiekanych typu *B* i cermetalu. Na chropowatość badanych powłok PVD istotnie wpływają niejednorodności ich powierzchni spowodowane obecnością kropel tytanu wybitych z tarczy podczas procesu CAD. Parametr R_a pozostaje jednak na poziomie umożliwiającym efektywną pracę narzędzia i nie wpływa istotnie na wzrost współczynnika tarcia, co potwierdzono podczas testów *pin-on-disc*. Badane powłoki charakteryzują się dużą mikrotwardością decydującą o zmniejszeniu intensywności zużycia ostrza narzędzi skrawających. Największą mikrotwardość mają powłoki wielowarstwowe (n>10) TiN+multi(Ti,Al,Si)N+TiN

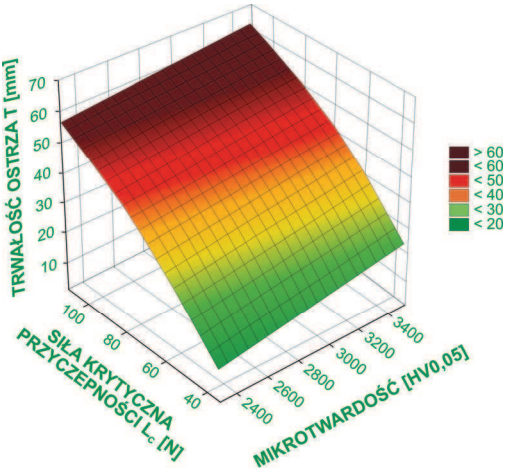


Rysunek 87. *Zmiany stężenia pierwiastków: a) powłoki wielowarstwowej CVD Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN oraz materiału podłoża z ceramiki azotkowej Si_3N_4 i b) powłoki gradientowej ciągłej Ti(B,N) oraz materiału podłoża z węglików spiekanych typu A; badania wykonano w spektrometrze optycznym wyładowania jarzeniowego GDOS [94, 161]*

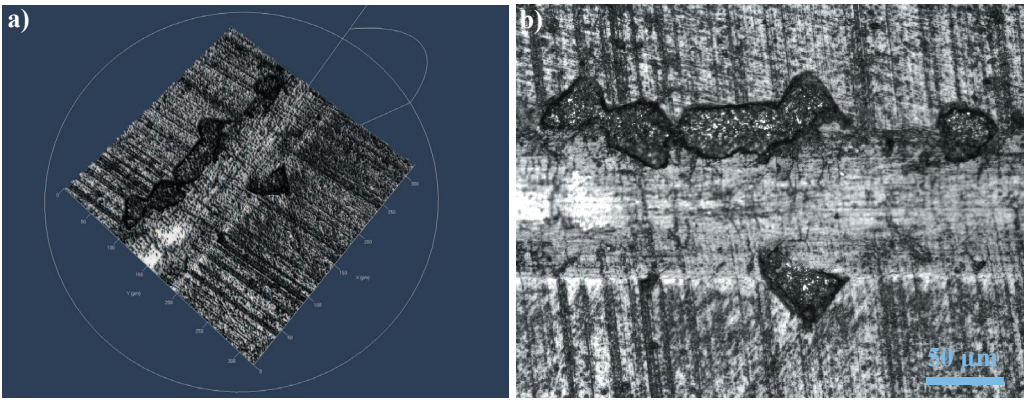
naniesione na Al_2O_3+ZrO_2 (4050 HV), Al_2O_3+TiC (3980 HV) i Al_2O_3+ $SiC_{(w)}$ (3970 HV). Wysoką mikrotwardością charakteryzują się także klasyczne powłoki jednowarstwowe złożone (Ti,Al)N naniesione na Al_2O_3+TiC (3580 HV) i Al_2O_3+$SiC_{(w)}$ (3340 HV) oraz powłoki gradientowe ciągle (Ti,Al)N na węglikach spiekanych typu *A* (3327 HV), (Ti,Al)N na Al_2O_3+TiC (3200 HV) i (Al,Ti)N na SiAlON (3600 HV). Niezależnie od typu powłoki twardość powłok (Ti,Al)N i (Ti,Al,Si)N, w których występują wiązania metaliczne TiN i kowalencyjne AlN, jest w każdym przypadku wyższa niż twardość powłok Ti(C,N), w których są tylko metaliczne fazy TiN i TiC. Badane powłoki mają dobrą przyczepność do podłoża, z wyjątkiem pojedynczych powłok CVD (rys. 88 i 89). Najwyższą wartość obciążenia krytycznego L_c osiągają powłoki wielowarstwowe (n>10) na ceramice tlenkowej (105-121 N). Bardzo dobre wartości obciążenia krytycznego cechują także powłoki gradientowe ciągłe (Ti,Al)N (82 N) i (Al,Ti)N (81 N) na węglikach spiekanych typu *A* i (Al,Ti)N na SiAlON (77 N) oraz jednowarstwowe powłoki złożone klasyczne (54-99 N) i nanokrystaliczne (35-59 N). Identyfikacji uszkodzeń powłok powstałych w wyniku badań przyczepności wykonanych metodą zarysowania (ang.: *scratch test*) dokonano na podstawie obserwacji w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) i mikroskopie konfokalnym (CLSM) (rys. 90).



***Rysunek 88**. Powłoki osiągające najwyższe wartości obciążenia krytycznego w każdej z analizowanych ośmiu grup technologii (A_{S5}-H_{S5}) [94, 161]*



***Rysunek 89**. Ocena, z użyciem sieci neuronowych, wpływu obciążenia krytycznego oraz mikrotwardości powłok na trwałość ostrza T narzędzi z węglików spiekanych pokrytych powłokami PVD i CVD przy grubości powłok 2,5 µm i wielkości ziarn 9,8 nm [94, 161]*



Rysunek 90. *Uszkodzenie powłoki jednowarstwowej złożonej nanokrystalicznej (Ti,Al)N naniesionej na podłoże z węglików spiekanych podczas przebiegu próby zarysowania (ang.: scratch test); a) obraz z mikroskopu konfokalnego, b) szczegół z rysunku a [94, 161]*

Zużycie ścierne powłok naniesionych metodą fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) przejawia się miejscowym złuszczeniem powłok, dużą liczbą jedno- lub obustronnych wykruszeń na brzegach rysy i delaminacją wewnątrz rysy. Zwiększające się obciążenie podczas testu zarysowania prowadzi do wzmagania wykruszeń na obrzeżach rysy i do częściowej delaminacji powłoki. Najczęściej występujące rodzaje uszkodzeń trybologicznych, zaobserwowane w skaningowym mikroskopie elektronowym, to uszkodzenia mechaniczno-ścierne powierzchni przyłożenia, powstanie krateru na powierzchni natarcia, pęknięcia na powierzchni przyłożenia, wykruszenia krawędzi skrawającej. Technologiczne próby skrawania wykazują największy średni wzrost trwałości ostrza (w stosunku do materiału bez powłoki) powłok gradientowych ciągłych (715%), a w grupie tej najwyższe wartości osiągają powłoki (Ti,Al)N (2900%), (Al,Ti)N (2650%) oraz Ti(C,N) (2550%) naniesione na podłoże z węglików spiekanych typu *A*. Bardzo duży średni wzrost trwałości ostrza powodują także powłoki wielowarstwowe PVD (n>10) (685%), a duży – złożone jednowarstwowe powłoki nanokrystaliczne (300%) i klasyczne (140%) naniesione na samo w sobie bardzo odporne na zużycie podłoże ceramiczne. Stwierdzono jakościową zależność między wzrostem mikrotwardości i przyczepności powłoki do podłoża a własnościami eksploatacyjnymi badanych materiałów. Zaobserwowano także, że wysokiej trwałości ostrza, połączonej z wysoką mikrotwardością i przyczepnością powłoki, towarzyszy względnie niska chropowatość materiału, co należy wiązać z lepszym odpływem wióra zapewnionym dzięki zastosowanej powłoce oraz z ograniczeniem tworzenia się narostu na pokrytej powłoką powierzchni ostrza.

Wyniki wykonanych badań materiałoznawczych różnych spiekanych materiałów narzędziowych pokrytych w procesie fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej (PVD i CVD) powłokami gradientowymi, wielowarstwowymi, wielo- i dwuskładnikowymi wskazują na ewidentną potrzebę rozwijania technologii ich nanoszenia i znaczące perspektywy rozwojowe, chociaż niektóre z nich, zwłaszcza jednowarstwowe klasyczne powłoki PVD i wielowarstwowe (n<10) nanoszone metodą CVD, cechują się wyraźnie gorszymi własnościami od pozostałych, co przesądza o ich małym przyszłym znaczeniu.

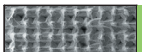
Wykonane badania heurystyczne wykazują, że najwyższą wartością charakteryzują się technologie nanoszenia w procesie PVD powłok wielowarstwowych o liczbie n≥10 F^d_{S5} (7,4, 8,4), gradientowych ciągłych H^d_{S5} (7,8, 7,8) i jednowarstwowych złożonych nanokrystalicznych C^d_{S5} (7,6, 7,2), jak również rozwojowi tych właśnie technologii najbardziej sprzyjają warunki otoczenia, czemu odpowiadają następujące, zbliżone do siebie wartości współrzędnych punktów naniesionych na macierz meteorologiczną: F^m_{S5} (3,7, 5,8), H^m_{S5} (3,4, 5,8) i C^m_{S5} (3,8, 5,6). Z użyciem macierzy strategii dla technologii określono ich pozycję strategiczną, wskazując odpowiednią długoterminową strategię postępowania. W odniesieniu do technologii F^s_{S5} (8,8, 8,2), H^s_{S5} (8,7, 8,3) i C^s_{S5} (8,4, 8,2), którym przyznano 9 punktów, rekomendowane jest zastosowanie strategii dębu wiosną, gwarantującej przyszły sukces. Powłoki PVD naniesione z użyciem tych technologii cechują się dużą mikrotwardością ograniczającą zużycie mechaniczne, dobrą przyczepnością i dużym względnym wzrostem trwałości ostrza. Bardzo dobre własności użytkowe i mechaniczne powłok osiągnięte w wyniku zastosowania technologii F_{S5} są związane z wytworzeniem systemów nanowarstw, pozwalających na korzystne zróżnicowanie własności w poszczególnych strefach powłoki, zapewniających bardzo dobrą wzajemną przyczepność poszczególnych nanowarstw i przyczepność całej powłoki do podłoża. Technologia H_{S5} zapewniająca ciągły gradient struktury i składu chemicznego również pozwala na uzyskanie dobrych własności mechanicznych i użytkowych. Jednowarstwowe złożone nanokrystaliczne powłoki naniesione w procesie PVD (C_{S5}) mają bardzo dobre własności mechaniczne, przekładające się na wysoki względny wzrost trwałości ostrza i relatywnie najniższą chropowatość. Strategia kosodrzewiny jesienią zalecana w odniesieniu do technologii wytwarzania powłok PVD jednowarstwowych złożonych klasycznych B^s_{S5} (7,1, 4,3) i wielowarstwowych (n<10) D^s_{S5} (6,5, 4,3) zakłada czerpanie zysków z realizacji produkcji w przewidywalnym otoczeniu z wykorzystaniem solidnej technologii, zalecając

wzmacnianie jej atrakcyjności. Technologia B_{S5} oceniona na 7 punktów zapewnia uzyskanie twardych powłok o bardzo dobrej przyczepności wynikającej z optymalnego doboru kombinacji rodzajów podłoża i powłoki skutkującego korzystnym rozkładem naprężenia w strefie między podłożem a powłoką, co przekłada się na najwyższy średni wzrost trwałości ostrza. Perspektywy rozwojowe technologii D_{S5} zapewniającej nieco gorsze własności pokrywanych materiałów określono jako umiarkowane (6 punktów), podobnie jak technologii G^s_{S5} (4,5, 4,3), odpowiadającej wytwarzaniu powłok gradientowych wielostopniowych, której zaleca się wzmocnienie potencjału poprzez eliminację problemu wzajemnej przyczepności poszczególnych warstw powłok. Najsłabiej rokują (4 punkty) technologie wytwarzania jednowarstwowych prostych powłok PVD A^s_{S5} (2,5, 4,2) i wielowarstwowych (n<10) powłok CVD E^s_{S5} (2,7, 4,0), które zostaną zapewne wyparte przez inne technologie dające możliwości uzyskania lepszych własności mechanicznych i użytkowych materiałów.

Mające najlepsze perspektywy rozwojowe technologie nanoszenia w procesie PVD powłok wielowarstwowych o liczbie n≥10, gradientowych ciągłych i jednowarstwowych złożonych nanokrystalicznych, w ciągu najbliższych 20 lat będą szeroko stosowane do wytwarzania twardych narzędzi, zwłaszcza skrawających, służących obróbce materiałów metalowych, nieżelaznych i trudno obrabialnych na potrzeby przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego, militarnego oraz inżynierii lądowej i wodnej. Nanoszenie powłok złożonych z wielu warstw (n≥10), jak również złożonych z monowarstw nanokrystalicznych pozwala na znaczne polepszenie trwałości ostrzy skrawających, ponieważ odpowiednio dobrane warstwy spełniają różne ściśle określone zadania. Bezpośrednio narażona na kontakt z obcym materiałem powierzchnia powłoki charakteryzuje się odpornością na utlenianie, stabilnością chemiczną, małym współczynnikiem tarcia wpływającym również na procesy dyfuzyjne, a także małą przewodnością cieplną, mającą duże znaczenie w przypadku odkształcania się powłoki. Od środkowej części przekroju powłoki wymagana jest duża twardość, zapobiegająca wykruszaniu się powłoki oraz dobra ciągliwość, zapewniająca możliwość relaksacji naprężeń własnych. Strefa kontaktu powłoki z materiałem podłoża powinna zapewniać przede wszystkim dobrą adhezję, którą można uzyskać przez minimalizację naprężeń cieplnych oraz dzięki identycznemu charakterowi wiązań między atomami w powłoce i podłożu. Uzyskanie w praktyce tak korzystnej kombinacji własności jest zwykle trudnym zadaniem, zwłaszcza że własności narzędzia zależą również istotnie od rodzaju materiału podłoża, a efektywność procesu wytwórczego od rodzaju

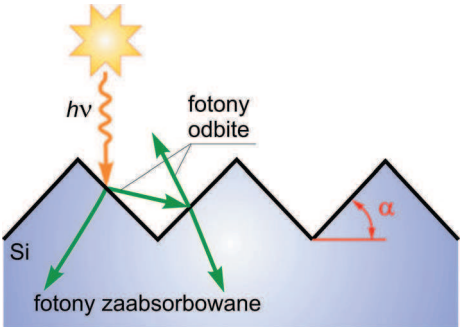
obróbki skrawaniem i rodzaju materiału obrabianego. Szeroki zakres obecnych i przyszłych zastosowań powłok gradientowych wynika natomiast z faktu, że zmiana składu chemicznego o charakterze ciągłym zapewnia bardzo dobrą relaksację naprężeń, eliminując jednocześnie zagadnienie zapewnienia wysokiej adhezji poszczególnych warstw. Przewidywany jest nieco wolniejszy, lecz systematyczny rozwój technologii nanoszenia w procesie PVD powłok jednowarstwowych złożonych klasycznych, wielowarstwowych (n<10) i gradientowych wielostopniowych, zależny od warunków otoczenia i indywidualnego, specjalistycznego zakresu zastosowania tych technologii. Najsłabiej rokują technologie nanoszenia w procesie PVD powłok jednowarstwowych prostych i w procesie CVD powłok wielowarstwowych (n<10), które w ciągu najbliższych 20 lat zostaną zapewne wyparte przez inne bardziej efektywne technologie.

Badania wykonane z wykorzystaniem nowo opracowanej zintegrowanej metodologii heurystycznej i klasyczne badania materiałoznawcze, dotyczące dużej grupy pokryć PVD i CVD na wielu grupach spiekanych materiałów narzędziowych, wskazują na analogiczne wnioski co do rozwoju poszczególnych technologii, a także na konieczność rezygnacji z niektórych mniej efektywnych spośród tych metod. Z pewnością potwierdza to możliwość prognozowania rozwoju technologii nowo opracowaną metodologią, bez konieczności klasycznych badań materiałoznawczych. Stanowi to kolejne studium przypadku, potwierdzające słuszność przyjętego założenia podanego w podrozdziale 5.1. Wskazuje ono na możliwość stosowania nowo opracowanej metodologii w innych sytuacjach, bez konieczności wykonywania badań klasycznych i bez obawy o popełnienie błędu w ocenie.

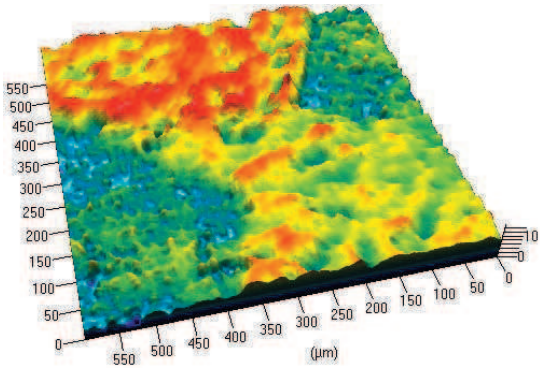


S6 Teksturowanie krzemu polikrystalicznego do celów fotowoltaiki

Grupa technologii *S*6 obejmuje różne metody teksturowania krzemu polikrystalicznego, polegającego na rozwinięciu jego powierzchni właściwej, dzięki czemu możliwe jest ponowne zaabsorbowanie fotonów odbitych już raz od powierzchni materiału (rys. 91). Na potrzeby wykonanych badań eksperymentalno-porównawczych [95, 161, 174] grupę tę podzielono, biorąc pod uwagę typ teksturowania, i wyznaczono tym samym następujące technologie szczegółowe poddane analizie: teksturowanie alkaliczne (A_{S6}), teksturowanie laserowe (B_{S6}) i teksturowanie laserowe z chemicznym trawieniem (C_{S6}).

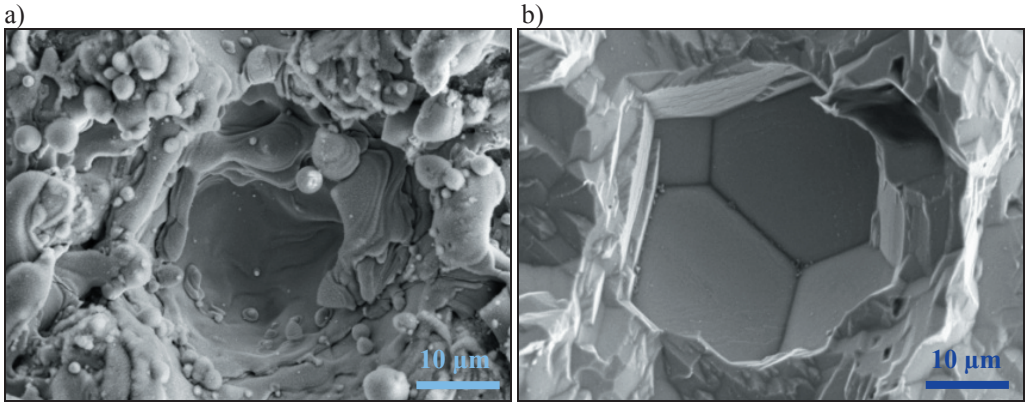


***Rysunek 91**. Odbicie i absorpcja fotonów padających na steksturowaną powierzchnię krzemu polikrystalicznego [95, 99, 161]*

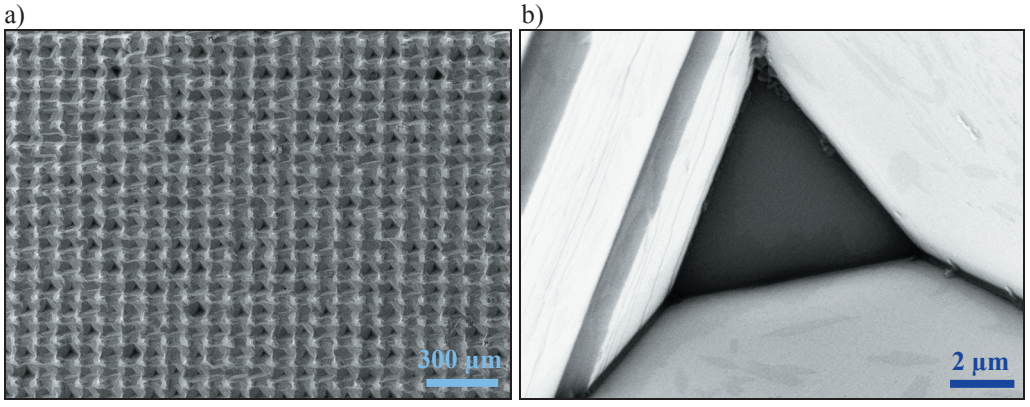


***Rysunek 92.** Trójwymiarowa topografia powierzchni płytki teksturowanej w roztworze 40%KOH:IPA:DIH$_2$O; mikroskop konfokalny [95, 161]*

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono ograniczone możliwości zastosowania konwencjonalnej metody anizotropowego trawienia na mokro w zasadowym roztworze 40% KOH : IPA : DIH$_2$O w temperaturze 80°C w odniesieniu do teksturowania powierzchni krzemu polikrystalicznego, mimo szerokiego zakresu zastosowań tego rodzaju metod do obróbki powierzchniowej krzemu monokrystalicznego. Trawienie krzemu polikrystalicznego w KOH sprawia bowiem, że jego powierzchnia staje się niejednorodna, z uskokami pomiędzy ziarnami (rys. 92), co powoduje przerwy w metalowych kontaktach nanoszonych metodą sitodruku. Alternatywą jest teksturowanie laserowe, polegające na utworzeniu na całej powierzchni materiału tekstury w postaci równoległych lub przecinających się rowków, którego zaletą jest bezkontaktowość i selektywność, a wadą powstanie uszkodzeń warstwy w miejscu oddziaływania wiązki laserowej i w obszarze z nim sąsiadującym. Na podstawie obserwacji w skaningowym mikroskopie elektronowym topografii powierzchni płytek teksturowanych laserowo stwierdzono, że kształt rowków jest nieregularny z wypływkami na brzegach (rys. 93a). Wytworzone zagłębienia są wtórnie zalane stopionym i nie w pełni odparowanym materiałem. Obszary między wypływkami sąsiednich rowków są pokryte zakrzepłym materiałem, który został wyrzucony z zagłębienia, oraz osadzonymi z fazy gazowej produktami wydobywającymi się podczas odparowania materiału na zewnątrz rowka. Na powierzchni poddanej teksturowaniu występują mikropęknięcia i mikroszczeliny zarówno w zagłębieniach, jak i w wypływkach. Trawienie chemiczne umożliwia ujawnienie właściwej tekstury (rys. 93b) w postaci równoległych rowków w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach (rys. 94).

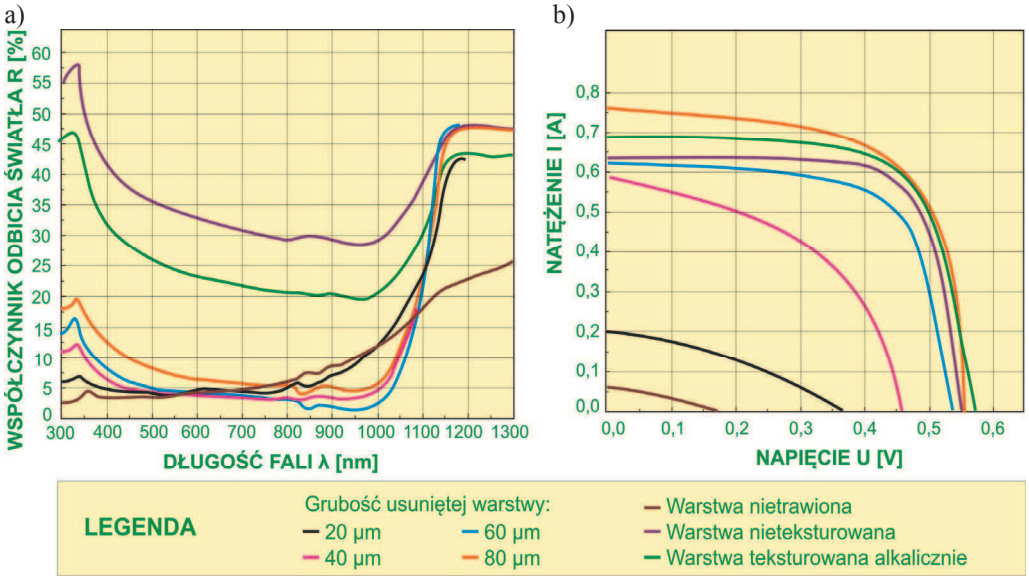


Rysunek 93. *Topografia powierzchni krzemu polikrystalicznego: a) po teksturowaniu laserowym i b) po teksturowaniu laserowym z chemicznym trawieniem; skaningowy mikroskop elektronowy [174]*



Rysunek 94*. Topografia powierzchni krzemu polikrystalicznego teksturowanego laserowo po strawieniu 80 µm warstwy uszkodzonej promieniem lasera; skaningowy mikroskop elektronowy [95, 161]*

W ramach wykonanych badań porównano własności optyczne i elektryczne nietekstu-rowanych płytek krzemowych oraz teksturowanych różnymi metodami: alkaliczną, laserową i laserową z chemicznym trawieniem, z uwzględnieniem grubości warstw usuniętych podczas trawienia (rys. 95). Zarówno alkaliczne, jak i laserowe teksturowanie powoduje zmniejszenie efektywnego współczynnika R_{eff} odbicia światła w funkcji długości fali padającego promie-niowania, w porównaniu z płytkami niepoddanymi żadnej obróbce powierzchniowej. W miarę postępu trawienia chemicznego płytek uprzednio teksturowanych laserowo wyraźne zwięk-szenie wartości współczynnika R_{eff} następuje dopiero po usunięciu uszkodzonej przez laser



Rysunek 95. *Wartości współczynnika odbicia światła (a) i charakterystyki prądowo-napięciowe (b) ogniw fotowoltaicznych, dotyczące płytek nieteksturowanych, teksturowanych alkalicznie, teksturowanych laserowo i teksturowanych laserowo z chemicznym trawieniem z uwzględnieniem grubości warstw usuniętych podczas tego procesu [95, 161]*

warstwy o grubości 80 µm. Wyniki pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych wskazują, że teksturowanie krzemu polikrystalicznego w wodnym roztworze KOH poprawia własności elektryczne wytworzonych ogniw fotowoltaicznych, lecz zwiększenie ich sprawności w porównaniu do płytek nieteksturowanych jest niewielkie, z uwagi na przypadkową orientację krystalograficzną poszczególnych ziarn. Laserowe teksturowanie powierzchni krzemu polikrystalicznego pogarsza własności elektryczne ogniw fotowoltaicznych wykonanych z przygotowanych w ten sposób płytek. Na całej laserowo teksturowanej powierzchni bezpośrednio po wykonaniu siatki rowków znajduje się warstwa uszkodzonego materiału powstała w wyniku kondensacji fazy ciekło-gazowej występującej w trakcie obróbki laserowej. Po usunięciu uszkodzonej warstwy materiału przez trawienie sprawność ogniw fotowoltaicznych wzrasta i jest największa, gdy wytrawiona jest warstwa o grubości 80 µm. Zastosowana metoda mokrego trawienia powierzchni umożliwia poprawę własności elektrycznych ogniw fotowoltaicznych wytworzonych z płytek krzemu polikrystalicznego uprzednio teksturowanych laserowo, w porównaniu z ogniwami wykonanymi z płytek nieteksturowanych i teksturowanych alkalicznie. W wyniku trawienia następuje wygładzenie powierzchni. Początkowo

następuje stopniowe zmniejszenie szerokości i wysokości wypływek, następnie pojawiają się w nich luki, po czym następuje ich całkowite usunięcie. Trawieniu ulegają również ściany boczne i dno zagłębienia. W czasie trawienia wypływki są całkowicie usuwane oraz powstają zagłębienia powtarzalne na całej teksturowanej powierzchni, o regularnym wielościennym kształcie, zależnym od orientacji krystalograficznej podłoża (rys. 93b i 94).

Badania materiałograficzne potwierdzają atrakcyjność i celowość rozwoju technologii laserowego teksturowania krzemu polikrystalicznego z chemicznym trawieniem, wskazując równocześnie na jego znaczącą przewagę nad innymi analizowanymi technologiami teksturowania.

Analiza przeprowadzona z użyciem macierzy dendrologicznej wykazuje, że najwyższą atrakcyjnością i potencjałem charakteryzuje się laserowe teksturowanie krzemu polikrystalicznego z chemicznym trawieniem C_{S6}^{d} (7,0, 8,0), które zakwalifikowano do ćwiartki macierzy zwanej rozłożystym dębem. Wytworzone tą technologią płytki krzemowe charakteryzuje najniższy (najkorzystniejszy) efektywny współczynnik odbicia R_{eff}, zwłaszcza po strawieniu chemicznym warstwy o grubości 40 i 60 μm (odpowiednio 11,71 i 11,79%), jak również sprawność wytworzonych z tych płytek ogniw fotowoltaicznych osiąga najwyższą (najkorzystniejszą) wartość 11,01%, co ma miejsce po strawieniu warstwy o grubości 80 μm. Alkaliczne teksturowanie krzemu polikrystalicznego A_{S6}^{d} (6,2, 4,9) umieszczono w ćwiartce zwanej ukorzenioną kosodrzewiną, odpowiadającej technologiom o dużym potencjale i małej atrakcyjności. W porównaniu do technologii C_{S6} płytki krzemowe wytworzone technologią A_{S6} mają znacznie gorsze własności optyczne (efektywny współczynnik odbicia R_{eff} 24,65%), a wykonane z nich ogniwa fotowoltaiczne mają gorsze własności elektryczne (sprawność 10,79%). Laserowe teksturowanie krzemu polikrystalicznego B_{S6}^{d} (4,7, 6,1) charakteryzuje się dużą atrakcyjnością ze względu na bardzo obiecujące własności optyczne wyrażone najniższą wartością R_{eff} (10,21%) wytworzonych tą technologią płytek krzemowych. Stosunkowo niski potencjał tej technologii wynika z faktu, że laserowe teksturowanie powierzchni krzemu diametralnie pogarsza własności ogniw fotowoltaicznych wykonanych z przygotowanych w ten sposób płytek (sprawność 0,14%). Przyczyną tego zjawiska jest warstwa uszkodzonego materiału powstała w wyniku kondensacji fazy ciekło-gazowej występującej w trakcie obróbki laserowej. Technologię tę zakwalifikowano zatem do ćwiartki macierzy zwanej strzelistym cyprysem, w której zawierają się technologie o dużej atrakcyjności i ograniczonym potencjale.

Wyniki oceny pozytywnego i negatywnego oddziaływania otoczenia na poszczególne technologie zwizualizowano z wykorzystaniem meteorologicznej macierzy oddziaływania otoczenia. Ankietowani eksperci ocenili, że otoczenie młodych technologii B^m_{S6} (7,9, 6,1) i C^m_{S6} (5,9, 8,3) należy do burzliwych, ze względu na bardzo atrakcyjny, perspektywiczny obszar przyszłych aplikacji przemysłowych (liczne sposobności) oraz towarzyszącą temu dużą konkurencję światową i szerokie alternatywne poszukiwania efektywnych technologii wytwarzania ogniw fotowoltaicznych (liczne trudności). W przypadku dojrzałej technologii A^m_{S6} (5,0, 5,2) stosowanej od lat na skalę przemysłową w odniesieniu do krzemu monokrystalicznego otoczenie jest przewidywalne i stabilne o neutralnym charakterze. Alkaliczne wytwarzanie krzemu polikrystalicznego, w porównaniu do jego monokrystalicznej postaci, daje możliwość wytworzenia tańszych, lecz mniej sprawnych ogniw fotowoltaicznych, co przy braku konkretnych znacząco lepszych alternatyw może być wystarczającym przyczynkiem do dalszego umiarkowanego rozwoju tej technologii.

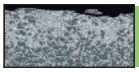
Wyrażone liczbowo strategiczne perspektywy rozwojowe analizowanych technologii teksturowania naniesiono na macierz strategii dla technologii. Najlepiej rokuje laserowe teksturowanie krzemu polikrystalicznego z chemicznym trawieniem C^s_{S6} (8,6, 7,1) ocenione na 7 punktów w dziesięciostopniowej skali, którego aplikacja zapewnia zarówno dobre własności optyczne wytwarzanych płytek krzemowych, jak i dobre własności wytworzonych z nich ogniw fotowoltaicznych. W odniesieniu do technologii C_{S6} rekomendowane jest zastosowanie strategii dębu latem, co wiąże się z efektywnym wykorzystywaniem jej atrakcyjności i potencjału w ryzykownym otoczeniu, szukaniem sposobności i unikaniem trudności oraz intensywną promocją poprzedzoną badaniami marketingowymi, w celu jak najlepszego dopasowania produktu do wymagań klienta. Największe nadzieje związane są ze skróceniem czasu działania impulsu laserowego do nano- (10^{-9}), piko- (10^{-12}) lub nawet femto- (10^{-15}) sekundy. Wykonane eksperymenty wykazują bowiem, że im krótszy czas działania impulsu, tym mniejsze uszkodzenia materiału podłoża. Na chwilę obecną wydaje się, że mimo bardzo krótkiego działania lasera uszkodzenia wierzchniej warstwy krzemu polikrystalicznego będą pogarszać własności elektryczne wytworzonych z niego ogniw fotowoltaicznych na tyle, że choćby krótkie trawienie chemiczne będzie niezbędne w celu ich polepszenia. Strategia kosodrzewiny jesienią, zalecana w odniesieniu do technologii A^s_{S6} (6,6, 3,8) ocenionej na 6 punktów, zakłada czerpanie zysków z realizacji produkcji w stabilnym, przewidywalnym

otoczeniu z wykorzystaniem solidnej technologii, którą należy unowocześniać i intensywnie promować w celu wzmocnienia jej atrakcyjności. Średnie perspektywy rozwojowe (5 punktów) charakteryzują laserowe teksturowanie krzemu polikrystalicznego B_{S6}^{s} (4,3, 6,1), w odniesieniu do którego zaleca się zastosowanie strategii cyprysa latem, polegającej na wzmacnianiu potencjału atrakcyjnej technologii w ryzykownych warunkach otoczenia i ocenie ryzyka. W zależności od wyniku tej oceny należy podjąć agresywną walkę o klienta lub powoli wycofywać technologię z rynku.

Zainteresowanie technologiami teksturowania krzemu polikrystalicznego wynika z przesłanek ekonomicznych. Powszechność występowania krzemu w skorupie ziemskiej, głównie w postaci krzemionki, decyduje o celowości poszukiwań jego przemysłowego wykorzystania na szeroką skalę. Możliwość wykorzystania krzemu w procesach przetwarzania energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną w dobie coraz większego zapotrzebowania na energię, wyczerpywania się tradycyjnych źródeł energii, kontrowersji wokół bezpieczeństwa wykorzystania paliwa nuklearnego i wzrostu świadomości proekologicznej społeczeństw otwiera drogę do jego masowego wykorzystania w przyszłości. Wytwarzanie ogniw fotowoltaicznych z krzemu poprzedza proces jego krystalizacji, w wyniku którego otrzymywane są jego dwie postacie: mono- lub polikrystaliczna. Wytwarzanie krzemu monokrystalicznego charakteryzującego się jednakową orientacją krystalograficzną ziarn jest droższe, lecz powstałe z niego ogniwa fotowoltaiczne cechuje wysoka sprawność. Proces krystalizacji krzemu polikrystalicznego o przypadkowej orientacji krystalograficznej ziarn jest szybszy i tańszy, lecz obecność defektów strukturalnych powoduje, że wytworzone z niego ogniwa fotowoltaiczne mają niższą sprawność niż ogniwa wytworzone z jego monokrystalicznej postaci. Zasadne jest zatem poszukiwanie nowych technologii wytwarzania ogniw fotowoltaicznych z krzemu polikrystalicznego, które zapewniłyby uzyskanie większej sprawności tych ogniw przy zachowaniu stosunkowo niskich kosztów. Efektem tych poszukiwań jest opisana technologia laserowego teksturowania krzemu polikrystalicznego z chemicznym trawieniem, zdaniem ekspertów o najlepszych, spośród analizowanych trzech metod teksturowania, perspektywach rozwojowych. Istotnym zagadnieniem, z punktu widzenia rozwoju strategicznego tej technologii, jest towarzyszące jej burzliwe otoczenie, które niesie zarówno wiele sposobności, wynikających z bardzo atrakcyjnego perspektywicznego obszaru przyszłych aplikacji przemysłowych, jak i liczne trudności związane z dużą konkurencją światową

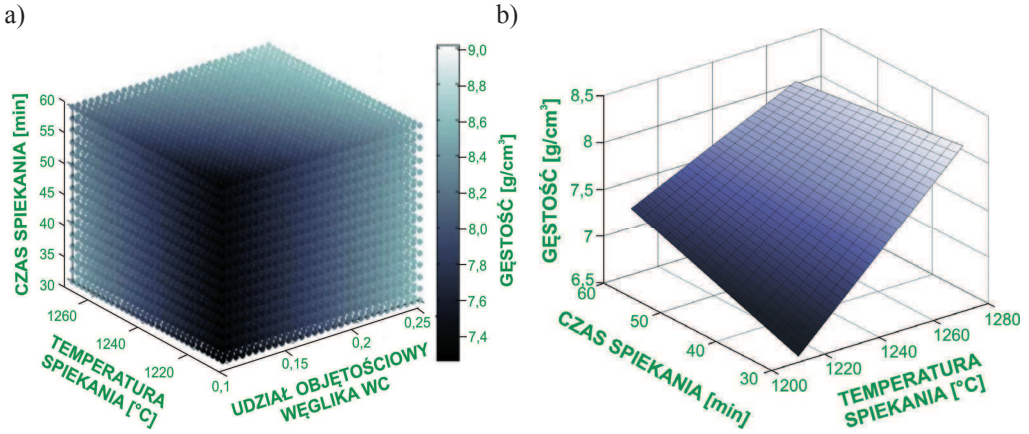
i szerokimi alternatywnymi poszukiwaniami efektywnych technologii wytwarzania ogniw fotowoltaicznych, takich jak: trawienie w roztworach kwasowych, reaktywne trawienie jonowe i teksturowanie mechaniczne z wykorzystaniem ostrza diamentowego.

Nowo opracowana metodologia jest w pełni przydatna do oceny rozwoju technologii teksturyzacji powierzchni krzemu polikrystalicznego stosowanych do wytwarzania ogniw fotowoltaicznych. Badania materiałograficzne są wprawdzie istotnym uzupełnieniem opracowanych prognoz, lecz nie są niezbędne do sporządzenia prognozy przez ekspertów. Prezentowane studium przypadku potwierdza zatem prawdziwość założenia podanego w podrozdziale 5.1 pracy.



S7 Wytwarzanie spiekanych materiałów gradientowych klasyczną metodą metalurgii proszków

Na potrzeby wykonanych badań [96, 161] w grupie technologii *S*7 obejmującej wytwarzanie spiekanych materiałów narzędziowych o strukturze gradientowej konwencjonalną metodą metalurgii proszków, przyjmując za kryterium podziału materiał osnowy i procentowy udział proszków w mieszaninie, wyróżniono trzy technologie szczegółowe: wytwarzanie materiałów gradientowych MG-90HSS/10WC na osnowie stali szybkotnących wzmacnianych węglikiem wolframu o 10% (A_{S7}) i 25% (B_{S7}) udziale objętościowym węglika wolframu w warstwie wierzchniej oraz materiałów narzędziowych MG-3Co/97WC na osnowie kobaltowej

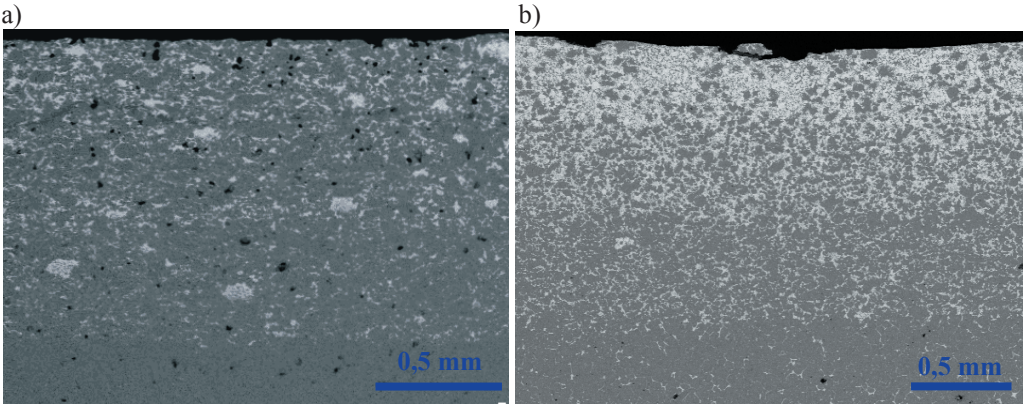


Rysunek 96. *Wykresy funkcji regresji opisujące: a) zależność gęstości od udziału objętościowego fazy wzmacniającej oraz temperatury i czasu spiekania w próżni gradientowych materiałów narzędziowych na osnowie stali szybkotnącej HS6-5-2 zawierających wzmacniającą fazę węglika wolframu, b) zależność gęstości materiału MG-75HSS/25WC od temperatury i czasu spiekania w atmosferze (N_2 + 5% H_2) [96, 161]*

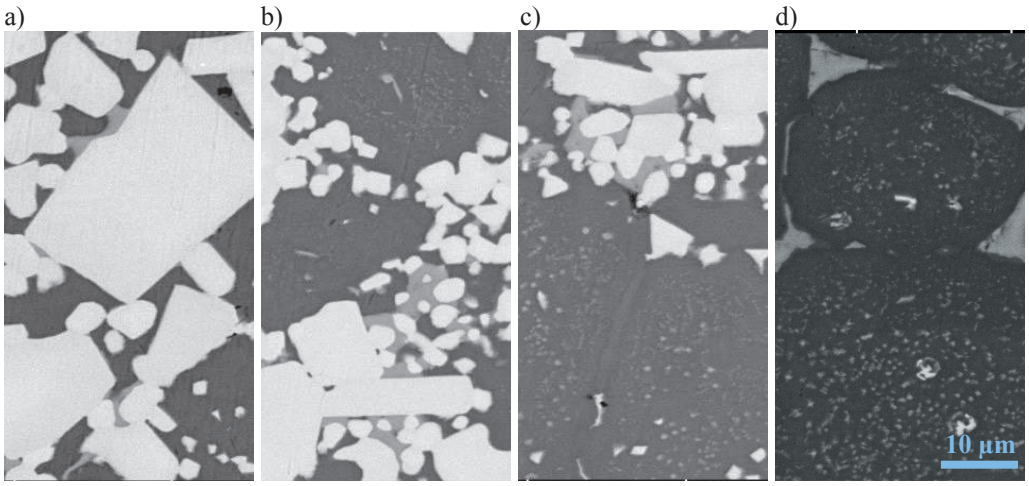
zawierających cząstki węglika wolframu o 97% udziale objętościowym w warstwie wierzchniej (C_{S7}).

Wyniki pomiarów gęstości spiekanych węglikostali gradientowych wskazują, że znaczący wpływ na jej wartość mają temperatura i atmosfera spiekania, natomiast czas procesu nie odgrywa istotnej roli (rys. 96). Gęstość węglikostali gradientowych MG-90HSS/10WC wynosi od 6,4 do 8,3 g/cm^3, a MG-75HSS/25WC od 7,5 do 8,6 g/cm^3. Na twardość badanych materiałów gradientowych spiekanych w piecu próżniowym i w piecu z atmosferą przepływającego azotu z dodatkiem wodoru wpływają warunki spiekania oraz udział zastosowanej fazy wzmacniającej, natomiast nie stwierdzono znaczącego wpływu rodzaju atmosfery, w której przeprowadzano procesy spiekania.

Twardość warstw wierzchnich materiału MG-90HSS/10WC mieści się w zakresie 55,7-80,8 HRA, a materiału MG 75HSS/25WC w zakresie 64,7-84,2 HRA. Wraz ze wzrostem temperatury i udziału objętościowego węglika wolframu wzrasta twardość warstw wierzchnich tych materiałów. Maksymalną twardość warstwy wierzchniej, wynoszącą ok. 84,2 HRA, wykazuje materiał MG-75HSS/25WC, spiekany w piecu próżniowym, w temperaturze 1230°C przez 30 minut. Wyniki pomiarów twardości wskazują na gradientową zmianę własności badanych materiałów w ich objętości, czemu towarzyszy zmiana ich struktury (rys. 97 i 98). Wartość twardości wszystkich badanych materiałów, niezależnie od warunków spiekania, zmienia się wraz ze zmianą odległości punktu pomiarowego od powierzchni zewnętrznej warstwy wierzchniej. Twardość materiału MG-90HSS/10WC spiekanego w próżni, w zależności

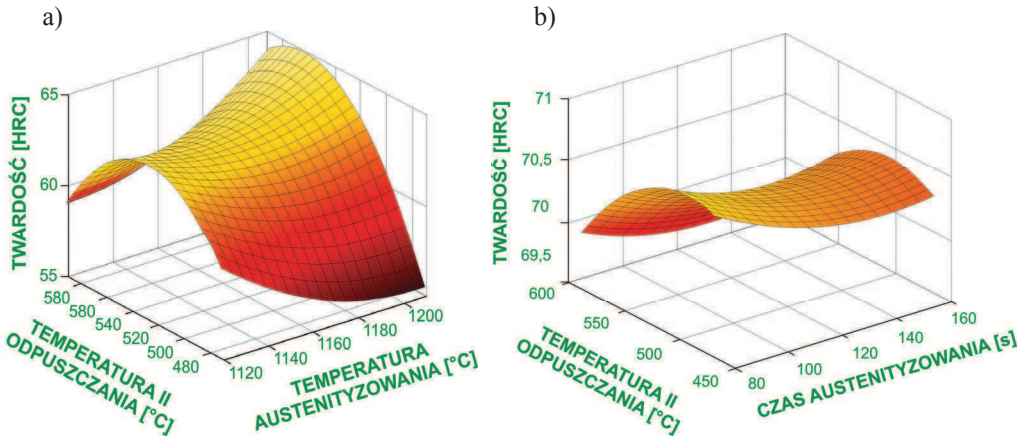


Rysunek 97. *Struktury gradientowych materiałów narzędziowych: a) MG-90HSS/10WC i b) MG-75HSS/25WC spiekanych w piecu próżniowym w temperaturze 1230°C przez 30 min; skaningowy mikroskop elektronowy [96, 161]*



Rysunek 98. *Struktura warstw materiału MG-75HSS/25WC spiekanego w piecu próżniowym w temperaturze 1230°C, przez 60 min: a) warstwa wierzchnia, b),c) warstwy pośrednie, d) warstwa podłoża; skaningowy mikroskop elektronowy [96, 161]*

od temperatury spiekania, mieści się w zakresie 500-800 HV w warstwie wierzchniej i maleje, wraz ze wzrostem odległości punktu pomiarowego od powierzchni zewnętrznej warstwy wierzchniej, do 270-510 HV w warstwie podłoża. Twardość materiału MG-90HSS/10WC spiekanego w atmosferze przepływającej mieszanki gazów N_2+5% H_2, mieści się w zakresie 580-680 HV w warstwie wierzchniej i także maleje wraz ze wzrostem odległości punktu pomiarowego od powierzchni zewnętrznej aż do 350-540 HV. W materiale MG-75HSS/25WC, w którym udział fazy wzmacniającej WC w poszczególnych warstwach jest większy (25% WC w warstwie wierzchniej), zmiana twardości jest jeszcze większa, o około 100 HV, w warstwie wierzchniej. Twardość materiałów MG-75HSS/25WC, spiekanych w próżni mieści się w zakresie 600-900 HV i spada do wartości 250-470 HV, natomiast materiałów MG-75HSS/25WC, spiekanych w atmosferze przepływającej mieszanki gazów, wynosi 300-860 HV w warstwie wierzchniej i maleje wraz ze wzrostem odległości punktu pomiarowego od powierzchni zewnętrznej warstwy wierzchniej, do 240-510 HV w warstwie podłoża. Na twardość badanych narzędziowych materiałów gradientowych w stanie zahartowanym i odpuszczonym w warstwach podłoża, składających się wyłącznie ze stali szybkotnącej bez fazy wzmacniającej, wpływają warunki obróbki cieplnej (rys. 99), a zwłaszcza stwierdzono wyraźny wpływ temperatury odpuszczania na twardość HRC, która w warstwie wierzchniej materiałów gradientowych mieści się w zakresie 69,2-71,6 HRC. Maksymalny

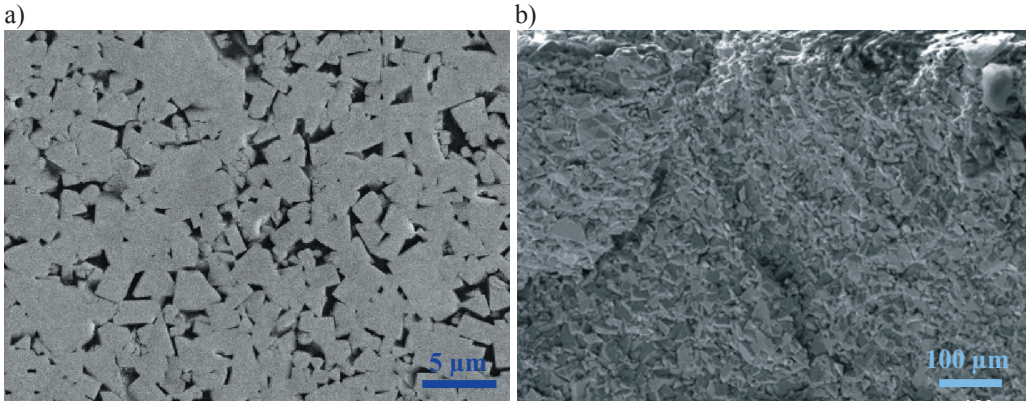


Rysunek 99. *Wykresy funkcji regresji opisujące zależność twardości: a) podłoża gradientowego materiału narzędziowego MG-75HSS/25WC od temperatury austenityzowania przez 120 s oraz od temperatury II odpuszczania, b) warstwy wierzchniej tego materiału od czasu austenityzowania w temperaturze 1150°C oraz od temperatury II odpuszczania [96, 161]*

efekt twardości wtórnej, wynoszący ok. 66,7 HRC, uzyskano w materiałach austenityzowanych w temperaturze 1210°C przez 80 s, zahartowanych i odpuszczonych w temperaturze 560°C. Obróbka cieplna powoduje znaczące zwiększenie twardości w warstwie wierzchniej materiałów o 5,8-8,2 HRC. Maksymalną twardością warstwy wierzchniej, wynoszącą 71,6 HRC, charakteryzuje się materiał austenityzowany w temperaturze 1120°C przez 120 s, zahartowany, a następnie dwukrotnie odpuszczony w temperaturze 530°C.

Gęstość materiałów MG-3Co/97WC o osnowie kobaltowej uzyskanych po spiekaniu z zastosowaniem izostatycznego dogęszczania na gorąco w temperaturze 1460 + 1425°C wynosi 14,6 g/cm^3, a gęstość materiałów poddanych spiekaniu swobodnemu w temperaturze 1460°C, których strukturę warstwy wierzchniej zaprezentowano na rysunku 100a, wynosi 12,96 g/cm^3.

Twardość HV wytworzonych materiałów narzędziowych o rosnącym udziale węglika WC w stosunku do osnowy kobaltowej w kierunku powierzchni narzędzia stopniowo zwiększa się. Twardość warstwy wierzchniej materiału spiekanego w temperaturze 1460°C w próżni mieści się w zakresie 1410-1295 HV, a spiekanego w temperaturze 1460°C i dogęszczanego izostatycznie w temperaturze 1425°C w zakresie 1430-1326 HV i wartości te maleją w kierunku podłoża. Wyniki badań odporności na kruche pękanie K_{Ic} spiekanych gradientowych materiałów narzędziowych o różnym udziale objętościowym faz WC i Co w każdej z czterech warstw materiału

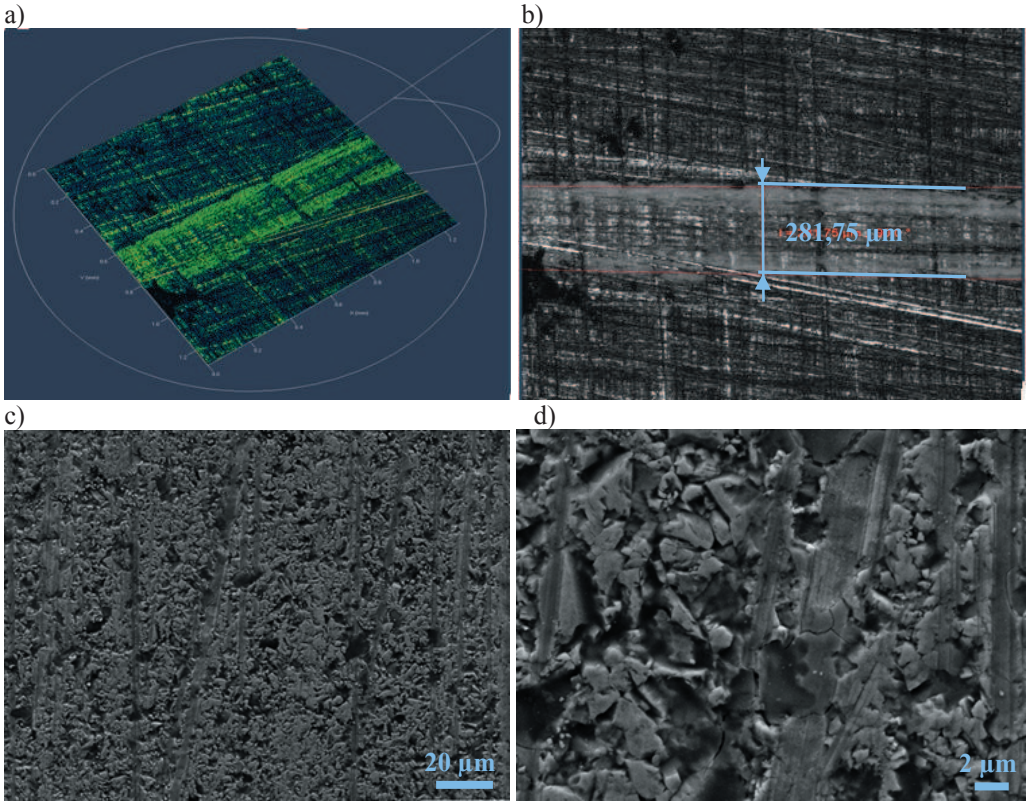


Rysunek 100. *Struktura warstwy wierzchniej (a)i przełom warstwy wierzchniej (b) materiału MG-3Co/97WC spiekanego w piecu próżniowym w temperaturze 1460°C; skaningowy mikroskop elektronowy [96, 161]*

wskazują na istotną zależność między parametrami spiekania a odpornością na pękanie poszczególnych materiałów narzędziowych. Materiał MG-3Co/97WC spiekany w temperaturze 1460°C charakteryzuje się wysoką odpornością na kruche pękanie, osiągając średnią wartość współczynnika K_{Ic} w warstwie wierzchniej 21 $MNm^{-3/2}$ i 16 $MNm^{-3/2}$ na podłożu. Wykonane obserwacje mikroskopowe wskazują, że przełomy próbek (rys. 100b) charakteryzują się układami wgłębień i wypukłościami, nadając łuskowaty charakter złomu, typowy dla materiałów kruchych. Gradientowe materiały narzędziowe o różnym udziale objętościowym faz WC i Co w każdej warstwie materiału, spiekane z dogęszczaniem izostatycznym, charakteryzują się dużo mniejszym zużyciem ściernym niż materiały otrzymane w wyniku spiekania swobodnego. Wyniki pomiaru zużycia ściernego (rys. 101b), na które ma wpływ udział fazy wiążącej, wartość obciążenia przeciwpróbki i droga tarcia, wskazują na gradientową zmianę własności badanych materiałów w zależności od udziału fazy wiążącej.

Wykonane badania materiałoznawcze wskazują na możliwość rozwoju omawianych technologii w razie ich dopracowania, wobec czego warto kontynuować prace naukowo-badawcze z tego zakresu.

W celu określenia wartości analizowanych technologii wyniki oceny eksperckiej, poddanej następnie analizie wielokryterialnej, naniesiono na dendrologiczną macierz wartości technologii. Wyniki wykonanych badań wykazują, że wszystkie analizowane technologie znajdujące się w embrionalnej (10) fazie rozwoju charakteryzują się dużą atrakcyjnością



***Rysunek 101**. Ślad wytarcia materiału MG-3Co/97WC, spiekanego w próżni temperaturze 1460˚C i dogęszczanego izostatycznie w temperaturze 1425˚C, po 1000 cykli z obciążeniem 2,5 N w podłożu; a) i b) obrazy z mikroskopu konfokalnego, c) i d) obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego [96, 161]*

i ograniczonym potencjałem, co powoduje, że umieszczono je w ćwiartce macierzy dendrologicznej zwanej strzelistym cyprysem. Bardzo zbliżone oceny eksperckie otrzymują technologie wytwarzania materiałów MG-75HSS/25WC B^d_{S7} (4,8, 8,1) i MG-3Co/97WC C^d_{S7} (4,5, 8,5). Technologia B_{S7} zapewnia otrzymanie oczekiwanych własności materiału obejmujących jego gęstość, porowatość i twardość warstwy wierzchniej zarówno po spiekaniu, jak i po obróbce cieplnej przy zachowaniu ciągliwości podłoża ze stali szybkotnącej. Technologia C_{S7} umożliwia natomiast wytworzenie materiału o zmieniającym się gradiencie składu chemicznego w poszczególnych jego warstwach, co wiąże się ze stopniowym różnicowaniem twardości w kolejnych warstwach materiału, przy zapewnieniu oczekiwanej odporności na zużycie ścierne, odporności na kruche pękanie i wartości

naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej, wpływających na odporność na tworzenie się i propagację pęknięć. Technologia A_{S7}^{d} (3,7, 6,2) wytwarzania materiału MG-90HSS/10WC pozwala na osiągnięcie mniejszej twardości warstwy wierzchniej mierzonej metodami Rockwella i Vickersa w porównaniu do technologii C_{S7}. Ponadto, ze względu na mniejsze stężenie węgla w mieszaninie proszków, proces spiekania wymaga dłuższego czasu i wyższej temperatury w odniesieniu do technologii C_{S7}, a tym samym jest mniej ekologiczny, stąd technologia ta została oceniona przez ekspertów relatywnie najniżej.

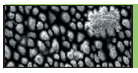
Wyniki oceny pozytywnego i negatywnego oddziaływania otoczenia na poszczególne technologie zwizualizowano z wykorzystaniem meteorologicznej macierzy oddziaływania otoczenia. Ankietowani eksperci ocenili, że otoczenie wszystkich analizowanych embrionalnych technologii wytwarzania spiekanych gradientowych materiałów narzędziowych należy do burzliwych, stąd umieszczono je w ćwiartce macierzy meteorologicznej zwanej upalnym latem. Otoczenie analizowanych technologii niesie liczne sposobności związane z atrakcyjnym perspektywicznym obszarem przyszłych aplikacji w przemyśle narzędziowym, którym jednakże towarzyszą liczne trudności związane z dużą konkurencją światową i alternatywnymi poszukiwaniami efektywnych technologii wytwarzania gradientowych materiałów narzędziowych. Zbliżone wyniki uzyskują technologie B_{S7}^{m} (6,0, 8,8) i C_{S7}^{m} (6,2, 8,3), natomiast technologia A_{S7}^{m} (7,1, 7,8) plasuje się na słabszej pozycji, co oznacza więcej trudności i mniej sposobności , które będą w przyszłości jej towarzyszyć.

Konkretne wartości liczbowe zawarte w czteropolowych macierzach dendrologicznej i meteorologicznej przetransformowano z użyciem programu komputerowego i naniesiono na szesnastopolową macierz strategii dla technologii. W odniesieniu do wszystkich analizowanych technologii rekomendowane jest zastosowanie strategii cyprysa latem. Zgodnie z oceną ekspercką perspektywy rozwojowe technologii B_{S7}^{s} (4,8, 7,2) i C_{S7}^{s} (4,8, 7,0) są umiarkowane (6 punktów), a technologii A_{S7}^{s} (4,1, 6,6) średnie (5 punktów). Rekomendowana strategia cyprysa latem zakłada konieczność wzmacniania potencjału atrakcyjnych technologii, co wiąże się z wykonywaniem dalszych prac naukowo-badawczych zmierzających do opracowania optymalnych parametrów i warunków procesu technologicznego w ryzykownych warunkach otoczenia, a także przeprowadzeniem oceny ryzyka, od wyniku której zależy dalsze postępowanie polegające na agresywnej walce o klienta, bądź powolnym wycofywaniu technologii z rynku. Strategia cyprysa latem zalecana w odniesieniu do

analizowanych embrionalnych technologii wytwarzania spiekanych gradientowych materiałów narzędziowych należy do strategii niepewnych. Na stosunkowo surową ocenę tych obiecujących innowacyjnych technologii, łatwych do szerokiego zastosowania w przemyśle, w tym w małych i średnich przedsiębiorstwach (MSP), ze względu na stosunkowo niewielkie koszty i możliwość wykorzystania w produkcji tradycyjnych pras, wpływa wysoki poziom niepewności kształtowany przez specyficzne i systematyczne [351] czynniki ryzyka płynące z otoczenia. Do specyficznych czynników ryzyka należy zaliczyć aktualnie nieznane wyniki dalszych prac naukowo-badawczych koniecznych do wykonania, w celu wzmocnienia potencjału embrionalnych technologii o dużej atrakcyjności oraz dostępność środków finansowych na ich realizację. Niekorzystnym zjawiskiem towarzyszącym wytwarzaniu materiałów MG-75HSS/25WC jest duży skurcz próbki spowodowany wysokim udziałem proszku WC w poszczególnych warstwach próbki poddanej spiekaniu, co związane jest z jej deformacją przestrzenną. Zmniejszenie udziału węglika wolframu w mieszaninie proszków powinno spowodować wyeliminowanie tej wady, konieczne są jednak dalsze badania w tym obszarze. Optymalizacji procesu wytwarzania materiału MG-3Co/97WC powinny natomiast służyć dalsze badania w tym zakresie dotyczące ustalenia najkorzystniejszych proporcji mieszaniny proszków kobaltu i węglika wolframu oraz warunków procesu technologicznego, obejmującego mielenie mieszaniny proszków, formowanie wyprasek i spiekanie, decydujących o twardości, odporności na ścieranie, odporności na kruche pękanie oraz wartości naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej materiału, wpływających na jego odporność oraz na tworzenie się i propagację pęknięć. Wykonując w przyszłości eksperymenty, należy zwrócić także uwagę na fakt, że w materiale MG-3Co/97WC zbyt długo wygrzewanym (90 min) w wysokiej temperaturze spiekania 1460°C, a następnie dogęszczanym izostatycznie w temperaturze 1425°C następuje lokalne wyrównanie składu fazowego w strefach połączeń i zanik struktury gradientowej w całej objętości spieku. Systematyczne czynniki ryzyka obejmują natomiast bezpośrednią konkurencję w postaci intensywnie rozwijających się alternatywnych technologii wytwarzania gradientowych materiałów narzędziowych w procesach wtapiania i stopowania laserowego, fizycznego osadzania powłok z fazy gazowej (PVD) i powierzchniowej obróbki hybrydowej (np. nanoszenia powłok PVD poprzedzonego plazmową obróbką cieplno-chemiczną).

Zastosowanie konwencjonalnej metody metalurgii proszków do wytwarzania gradientowych materiałów narzędziowych stwarza możliwość zapewnienia warstwie wierzchniej wysokiej odporności na zużycie ścierne, przy równoczesnym zachowaniu dużej ciągliwości rdzenia, po relatywnie niskich kosztach. Taka budowa materiału pozwala na swobodne kształtowanie własności zależnie od warunków pracy narzędzia, umożliwiając np. zastosowanie w miejscach narażonych na ścieranie twardych warstw wierzchnich, a w innych narażonych na uderzenia – pozostawienie ciągliwego rdzenia. Metoda metalurgii proszków umożliwia relatywnie łatwą w realizacji kontrolę rozmieszczenia cząstek faz wzmacniających w osnowie, pełne wykorzystanie surowca oraz bardzo wysoką powtarzalność otrzymywanych wyników, a także wyjątkowo proste łączenie różnych składników w celu uzyskania wymaganych własności materiału, niemożliwych do osiągnięcia innymi metodami po ekonomicznie uzasadnionych kosztach. Liczne badania dotyczące spiekanych materiałów narzędziowych wskazują, że dzięki zastosowaniu metalurgii proszków można otrzymywać materiały o ściśle określonym składzie chemicznym i wysokim stopniu czystości. Najpopularniejsze formowanie materiałów poprzez zasypywanie i prasowanie proszków w matrycy charakteryzuje się prostotą aplikacji w warunkach przemysłowych z użyciem tradycyjnych pras, co może mieć kluczowe znaczenie dla potencjalnego zastosowania spiekanych gradientowych materiałów narzędziowych w małych i średnich przedsiębiorstwach (MSP). Do zalet wytwarzania omawianych materiałów w warunkach przemysłowych należy zaliczyć ekologiczną bezodpadową produkcję i krótki cykl produkcyjny, natomiast ograniczeniem jest możliwość wytwarzania produktów o niewielkich wymiarach i kształcie zdeterminowanym możliwościami konstrukcyjnymi matryc. Specyficzne własności spiekanych gradientowych materiałów narzędziowych predestynują je w szczególności do zastosowania na wysokowydajne narzędzia do skrawania z bardzo dużymi prędkościami, narzędzia skrawające kształtowe, narzędzia wykrojnikowe i do obróbki plastycznej na gorąco oraz na ostrza narzędzi górniczych i wiertniczych.

Analogicznie jak w poprzednich studiach przypadku, również w odniesieniu do gradientowych materiałów narzędziowych wytwarzanych konwencjonalnymi metodami metalurgii proszków, wyniki badań materiałoznawczych prowadzą do wniosków tożsamych z wnioskami wynikającymi z oceny dokonanej nowo opracowaną autorską zintegrowaną metodologią, zatem możliwe jest po raz kolejny potwierdzenie prawdziwości przyjętego założenia dotyczącego weryfikacji doświadczalnej, podanego w podrozdziale 5.1 rozprawy.

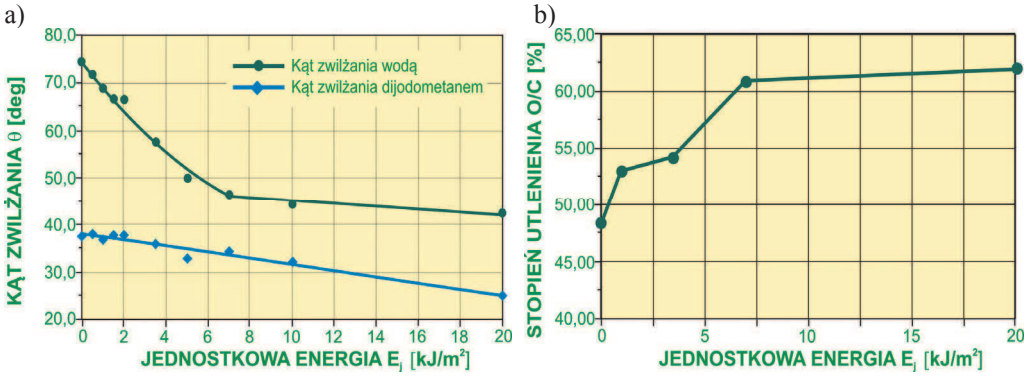


S8 Wybrane technologie modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich

Grupę technologii *S*8 obejmującą wybrane technologie modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich, na potrzeby wykonanych badań eksperymentalno-porównawczych [98, 161] – stosując jako kryterium podziału procesy fizyczne, w wyniku których ma miejsce modyfikacja warstwy wierzchniej materiału polimerowego – podzielono na następujące technologie szczegółowe: wyładowania koronowe (A_{S8}), obróbkę plazmą niskotemperaturową generowaną w powietrzu przez generator znajdujący się poza strefą modyfikowania materiału (ang.: *Remote Plasma Treatment* – RPT) (B_{S8}), obróbkę plazmą niskotemperaturową w warunkach obniżonego ciśnienia (ang.: *Low Pressure Plasma Treatment* – LPPT) (C_{S8}), obróbkę laserową (D_{S8}) i obróbkę wysokoenergetycznym promieniowaniem elektronowym (ang.: *Electron-Beam Irradiation* – EBI) (E_{S8}).

Wykonano badania materiałoznawcze, mające na celu określenie wpływu wybranych metod obróbki powierzchniowej na własności badanych materiałów polimerowych, obejmujące zwilżalność, swobodną energię powierzchniową (SEP), stopień utlenienia warstwy wierzchniej i wytrzymałość połączeń adhezyjnych. Wykonano także, z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego, badania topografii powierzchni, badania fraktograficzne, pomiar grubości zmodyfikowanej warstwy wierzchniej oraz mikroanalizę rentgenowską ilościową.

Działaniu wyładowań koronowych (WK) w temperaturze otoczenia (ok. 23ºC) pod ciśnieniem atmosferycznym w powietrzu poddano próbki poliaktydu (PLA). Badania wpływu wartości jednostkowej energii modyfikowania na kąt zwilżania wodą i dijodometanem modyfikowanych próbek wykazują, że wraz ze wzrostem wartości energii następuje spadek wartości obu kątów zwilżania, zwłaszcza wodą, ponieważ w tym przypadku siły polarne mają większy udział w oddziaływaniach międzycząsteczkowych przy niewielkim znaczeniu oddziaływań dyspersyjnych (rys. 102a). Swobodna energia powierzchniowa (SEP) badanych próbek poliaktydu (PLA), obliczona metodą Owena-Wendta, a zwłaszcza jej składowa polarna, rośnie wraz ze wzrostem wartości jednostkowej energii. Badania stopnia utlenienia (O/C) warstwy wierzchniej PLA (rys. 102b) – zdefiniowanego jako wyrażony w procentach iloraz liczby atomów tlenu i węgla występujących w badanej warstwie wierzchniej – wykazują, że rośnie on wraz ze wzrostem wartości jednostkowej energii.

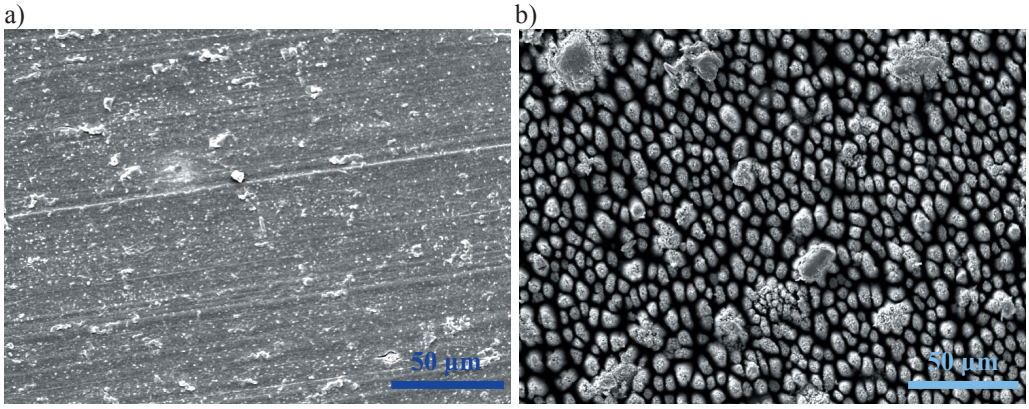


Rysunek 102. *Wpływ wartości jednostkowej energii modyfikowania na: a) kąt zwilżania wodą i dijodometanem próbek modyfikowanych w powietrzu i b) na stopień utleniania warstwy wierzchniej próbek poliaktydu modyfikowanych w powietrzu [98, 161]*

Poddanie próbek poliaktydu wyładowaniom koronowym powoduje ponadto zwiększenie wytrzymałości adhezyjnej, której poziom odpowiada wymaganiom stawianym w technice drukarskiej.

Obróbce powierzchniowej z użyciem różnej liczby impulsów lasera ekscymerowego ArF poddano próbki wykonane z poliwęglanu (PC), poli(tereftalanu etylenu) (PET) i polistyrenu (PS). Badania wykazują, że stopień utlenienia warstwy wierzchniej badanych materiałów rośnie wraz ze wzrostem liczby impulsów lasera, przy czym charakter tych zmian jest eksponencjalny w przypadku PC i PET, osiągającego najwyższe wartości, i liniowy w przypadku PS. Obróbka laserowa z energią większą od progu ablacji daje możliwość indukowania bardzo intensywnych zmian struktury chemicznej i geometrycznej napromieniowanych materiałów polimerowych, a także inicjowania reakcji chemicznych składników dodatkowych występujących w tych materiałach. Taki sposób modyfikacji laserowej wykorzystywany jest do metalizacji bezprądowej materiałów polimerowych i umożliwia tworzenie ścieżek przewodzących o różnych kształtach. W wyniku działania promieniowania laserowego na powierzchnię i warstwę wierzchnią materiału polimerowego, zawierającego odpowiedni prekursor, następuje jego termiczna degradacja i powstają klastry metalu (których źródłem jest ten prekursor), inicjujące i katalizujące autokatalityczny proces metalizowania tego materiału.

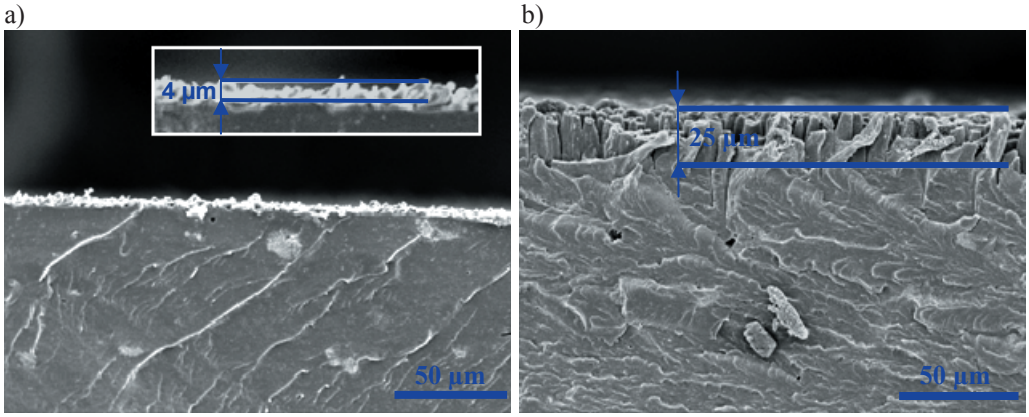
Poszukując nowych materiałów polimerowych do autokatalitycznego metalizowania, wprowadzono inne niż dotychczas stosowane prekursory metalizowania na etapie przetwórstwa tworzyw polimerowych, co doprowadziło do opracowania nowego kompozytu polimerowego



Rysunek 103. *Powierzchnia badanego kompozytu: a) niemodyfikowana, b) modyfikowana laserem ekscymerowym ArF; skaningowy mikroskop elektronowy [98, 161]*

o osnowie poliamidu 6 zawierającego dwa prekursory metalizowania: acetyloacetonian miedzi (II) $Cu(acac)_2$ oraz tlenek miedzi (II) CuO, który to kompozyt poddano następnie obróbce powierzchniowej różną liczbą impulsów (5, 10, 50, 100 i 500) lasera ekscymerowego ArF. Badania w skaningowym mikroskopie elektronowym wykazują, że w wyniku laserowego modyfikowania powierzchnia nowo opracowanego kompozytu ulega istotnym zmianom. Niemodyfikowana powierzchnia próbki charakteryzuje się małą chropowatością z widocznymi nierównościami, będącymi repliką ścian formy wtryskowej (rys. 103a), natomiast po obróbce laserem nierówności zanikają, a na powierzchni pojawia się *las* wydzieleń w postaci stożkowej, inicjujących wzrost kolumnowy (rys. 103b). Zwiększenie liczby impulsów lasera wpływa w decydujący sposób na zwiększenie grubości warstwy modyfikowanej i chropowatości powierzchni (rys. 104). Laserowe napromieniowywanie nowo opracowanego kompozytu prowadzi do rozpadu prekursorów metalizowania z wytworzeniem klastrów metalicznej miedzi, co potwierdzają wyniki analizy rozkładu miedzi w warstwie wierzchniej kompozytu (rys. 105), wykonanej z użyciem spektrometru energii promieniowania rentgenowskiego (EDS). Znajdujące się w warstwie wierzchniej materiału atomy miedzi inicjują i katalizują proces jego metalizowania, co umożliwia osadzenie na powierzchni tego kompozytu warstwy miedzi metalicznej już po 5 impulsach lasera.

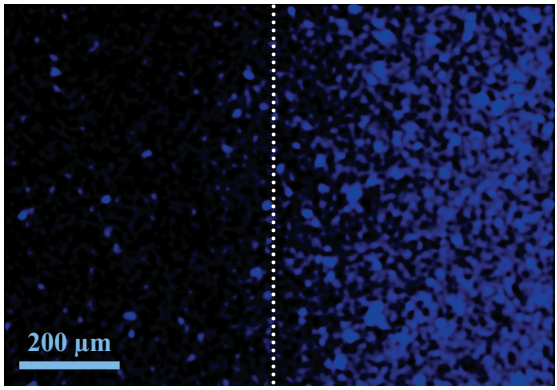
W toku badań wysokoenergetycznemu promieniowaniu elektronowemu (EBI), w celu określenia wpływu tej obróbki na utlenianie warstwy wierzchniej, a tym samym na zwiększenie zwilżalności i swobodnej energii powierzchniowej, przyczyniających się do poprawy



Rysunek 104. *Przełomy badanego kompozytu modyfikowanego: a) 50 i b) 500 impulsami lasera o energii 120 mJ/cm^2; skaningowy mikroskop elektronowy [98, 161]*

własności adhezyjnych materiału, poddano kompozyty różniące się składem polimerów użytych do ich wytworzenia i zawierające kompatybilizator TMPTA. Próbki wytworzonych mieszanin umieszczano na przenośniku, który porusza się z dokładnie regulowaną prędkością, od której zależy dawka promieniowania elektronowego pochłoniętego przez próbki (25, 50, 100 i 300 kGy). Wykonane badania wykazują, że kąt zwilżania maleje monotonicznie wraz ze wzrostem dawek napromieniowywania badanych kompozytów. Zmiany swobodnej energii powierzchniowej (SEP) dotyczące wszystkich kompozytów, zachodzące pod wpływem promieniowania elektronowego, są podobne. Energia ta rośnie monotonicznie w całym zakresie stosowanych dawek, przy czym najszybszy wzrost obserwuje się w zakresie dawek do 50 kGy, wolniejszy w przedziale od 50 do 100 kGy, a znacznie wolniejszy powyżej 100 kGy. Wzrost zwilżalności i swobodnej energii powierzchniowej, zachodzące wskutek napromienienia elektronowego, jest spowodowany głównie implementacją polarnych grup tlenowych w warstwie wierzchniej napromienianych kompozytów. Ponadto, kompatybilizator TMPTA znacząco wpływa na wzrost stopnia utlenienia warstwy wierzchniej napromienionych kompozytów, co wynika z jego struktury chemicznej zawierającej wiązania podwójne, ulegające pękaniu pod wpływem napromienienia elektronowego, a powstające wskutek tego rodniki reagują z tlenem występującym w warstwie wierzchniej i powodują wzrost jej stopnia utlenienia.

Badania materiałograficzne pozwalają na sformułowanie wniosków, dotyczących spodziewanego intensywnego rozwoju nowoczesnych technologii obróbki powierzchni wybranych materiałów polimerowych.



Rysunek 105. *Rozkład powierzchniowy Cu na przekroju poprzecznym warstwy wierzchniej badanego kompozytu napromienionej 500 impulsami lasera o energii 120 mJ/cm^2 (linią kropkowaną zaznaczono granicę oddziaływań impulsów lasera); skaningowy mikroskop elektronowy [98, 161]*

Poszczególne technologie eksperci ocenili pod kątem atrakcyjności i potencjału, a otrzymane wyniki naniesiono na dendrologiczną macierz wartości technologii. Bazowa technologia wyładowań koronowych A_{S8}^{d} (7,2, 5,5) oraz dojrzała technologia modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów polimerowych za pomocą plazmy niskotemperaturowej w warunkach obniżonego ciśnienia C_{S8}^{d} (6,7, 5,1) znajdują się w polu ukorzenionej kosodrzewiny, o wysokim potencjale i ograniczonej atrakcyjności. Prototypowa technologia laserowego modyfikowania polimerowych warstw wierzchnich D_{S8}^{d} (3,6, 8,7) o bardzo obiecujących perspektywach rozwojowych, zwłaszcza w przemyśle elektronicznym i komputerowym, wzrostowa technologia modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów polimerowych za pomocą plazmy generowanej poza strefą modyfikowania B_{S8}^{d} (4,1, 6,7) oraz prototypowa technologia modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów polimerowych za pomocą wiązki elektronów o dużej energii E_{S8}^{d} (5,0, 6,6) znajdują się w polu strzelistego cyprysa, odpowiadającym technologiom atrakcyjnym o ograniczonym potencjale, z czym wiąże się konieczność wykonania dodatkowych badań, umacniających te technologie i będących bazą do przyszłych szerokich aplikacji przemysłowych.

Pozytywne i negatywne oddziaływanie otoczenia na poszczególne technologie zaprezentowano graficznie z użyciem meteorologicznej macierzy oddziaływania otoczenia. Otoczenie większości technologii: A_{S8}^{m} (1,7, 7,5), B_{S8}^{m} (2,9, 6,8), C_{S8}^{m} (2,1, 6,8) i D_{S8}^{m} (3,1, 8,2) jest niezwykle sprzyjające, charakteryzujące się dużą liczbą sposobności i niewielką liczbą trudności,

stąd umieszczono je w polu słonecznej wiosny. Technologia E^m_{S8} (6,4, 7,0) polegająca na modyfikacji warstwy wierzchniej polimerów wiązką elektronów o dużej energii znajduje się natomiast w otoczeniu burzliwym, ponieważ towarzyszą jej zarówno liczne sposobności w postaci nowych zastosowań i możliwości wejścia na nowe rynki, jak i trudności związane z wysokimi kosztami inwestycyjnymi, koniecznością zatrudnienia wysoko wykwalifikowanej kadry, silną pozycją nabywców i dostawców w łańcuchu dostaw, a także wysokim stopniem specjalizacji i aplikowalnością w odniesieniu do wąskiej grupy produktów.

Macierz strategii dla technologii przedstawia graficznie miejsce badanych technologii modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich z uwzględnieniem ich wartości i intensywności oddziaływania otoczenia, wskazując odpowiednią strategię postępowania. Perspektywy rozwojowe technologii A^s_{S8} (7,0, 9,1) wyładowań koronowych i C^s_{S8} (6,8, 8,8) modyfikacji warstwy wierzchniej polimerów plazmą niskotemperaturową w warunkach obniżonego ciśnienia oceniono na 9 punktów, w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, i znalazły się one w polu kosodrzewiny wiosną. W odniesieniu do tych technologii zaleca się wykorzystywanie dobrej koniunktury na rynku przy równoczesnym wzmacnianiu atrakcyjności technologii o dużym potencjale dotyczącym zwłaszcza jej unowocześniania, automatyzowania, komputeryzowania i intensywnej promocji w celu utrzymania przewagi konkurencyjnej. Równie wysoko (9 punktów) oceniono technologię D^s_{S8} (4,7, 8,8) laserowego modyfikowania polimerowych warstw wierzchnich, a 8 punktów przyznano technologii B^s_{S8} (4,3, 8,6) odpowiadającej modyfikacji warstwy wierzchniej polimerów plazmą generowaną poza strefą modyfikowania. Obie te technologie znalazły się w polu cyprysa wiosną, w odniesieniu do którego zalecana strategia rozwojowa obejmuje badanie, udoskonalanie i doinwestowywanie atrakcyjnej technologii z wykorzystaniem dobrej koniunktury na rynku. Perspektywy rozwojowe technologii E^s_{S8} (4,5, 6,6) – modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów polimerowych za pomocą wiązki elektronów o dużej energii, zostały ocenione jako umiarkowane (6 punktów) ze względu na burzliwe otoczenie niosące zarówno wiele sposobności, jak i wiele trudności. Strategia cyprysa latem, właściwa dla technologii E_{S8}, polega na wzmacnianiu potencjału atrakcyjnej technologii w niepewnych warunkach otoczenia, indywidualnej ocenie ryzyka i w zależności od jej wyniku podjęciu agresywnej walki o klienta lub powolnym wycofywaniu technologii z rynku, w przypadku gdyby trudności przeważyły korzyści płynące z otoczenia.

Przeprowadzona analiza wykazuje bardzo szerokie perspektywy rozwojowe technologii bazowej modyfikowania warstwy wierzchniej polimerów za pomocą wyładowań koronowych (barierowych) w powietrzu lub w innych gazach (A_{S8}), która jest obecnie stosowana powszechnie w przemyśle, zwłaszcza opakowaniowym, spożywczym, motoryzacyjnym, farmaceutycznym oraz w produkcji sprzętu sportowego i AGD. W wyniku modyfikowania materiałów z użyciem wyładowań koronowych w warstwie wierzchniej polimerów zostają zaimplementowane grupy tlenowe i następuje wzrost jej chropowatości, co powoduje wzrost zwilżalności materiału i wzrost swobodnej energii powierzchniowej umożliwiając lub ułatwiając klejenie, drukowanie i zdobienie zmodyfikowanych polimerów. Przewidywany rozwój i niezagrożona pozycja strategiczna wyładowań koronowych w najbliższych 20 latach wynika z faktu, że jest to technologia stosunkowo prosta, wysokowydajna, niepochłaniająca dużych nakładów na etapie zarówno inwestycji, jak i późniejszej eksploatacji, a także niewymagająca zaangażowania wysoko wykwalifikowanego personelu. Do wad metody należy zaliczyć możliwość uszkodzeń bardzo cienkich folii o grubości mniejszej niż 15 μm, kurczenie się materiału w trakcie procesu oraz konieczność neutralizowania lub odprowadzania ozonu. Dalszy rozwój wyładowań koronowych będzie dotyczył zapewne ulepszonych konstrukcji aktywatorów i aparatury pomiarowej oraz układów automatycznego sterowania tym procesem. Nowy obszar przyszłych zastosowań to funkcja sterylizacyjna w odniesieniu do różnych mikroorganizmów, co może znaleźć zastosowanie w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym i medycznym.

Pozycję strategiczną technologii (C_{S8}) odpowiadającej modyfikowaniu warstwy wierzchniej materiałów polimerowych za pomocą plazmy niskotemperaturowej w warunkach obniżonego ciśnienia (0,05-5 hPa) również oceniono bardzo wysoko. Ta stosunkowo prosta technologia umożliwia bardzo równomierne i łagodne modyfikowanie cienkich folii polimerowych, a także elementów o złożonych kształtach (3D). Odrębną grupą produktów wytwarzanych tym sposobem są nośniki elementów lub obwodów elektronicznych instalowanych w układach sterowania lub regulacji różnych urządzeń. Technologia modyfikacji polimerów plazmą niskotemperaturową w warunkach obniżonego ciśnienia aktualnie jest najczęściej stosowana do produkcji opakowań, sprzętu elektronicznego, sportowego i AGD oraz w przemyśle motoryzacyjnym. Przewidywane kierunki doskonalenia tej technologii dotyczyć będą skrócenia czasu modyfikowania, który aktualnie wynosi kilkadziesiąt minut i determinuje ograniczoną

wydajność procesu, doskonalenia konstrukcji komór wyładowczych o wymaganej wysokiej szczelności oraz przebiegu samego procesu w celu wyeliminowania jego cykliczności na rzecz zapewnienia modyfikacji w sposób ciągły.

Na poziomie bardzo wysokim oceniono także perspektywy rozwojowe modyfikacji warstw wierzchnich polimerów z użyciem różnego rodzaju laserów, w tym laserów ekscymerowych (D_{S8}). Technologia ta znajdująca się aktualnie w prototypowej fazie cyklu życia umożliwia precyzyjne modyfikowanie wybranych fragmentów warstwy wierzchniej danego materiału, w tym wcześniej zaprojektowanych ścieżek przewodzących o małej szerokości, a także innych obszarów o złożonych kształtach. W związku z tym w przyszłości powinna znaleźć zastosowanie w elektronice, zwłaszcza w produkcji komputerów, oraz w przemyśle maszynowym i opakowaniowym. Potencjał modyfikowania laserem polimerowych warstw wierzchnich w najbliższych latach zapewne ulegnie wzmocnieniu poprzez doskonalenie konstrukcji laserów, aparatury pomiarowej i układów automatycznego sterowania tym procesem. W chwili obecnej ograniczeniem tej technologii jest brak możliwości modyfikowania obszarów o dużych polach powierzchni oraz stosunkowo duże zużycie energii elektrycznej dostarczanej do lasera w przeliczeniu na jednostkę pola powierzchni modyfikowanej, a zagadnienia te z pewnością staną się przedmiotem dalszych badań służących udoskonalaniu tej technologii w ciągu najbliższych 20 lat.

Perspektywy rozwojowe znajdującej się aktualnie w fazie wzrostu technologii modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów polimerowych za pomocą plazmy generowanej poza strefą modyfikowania przez wyładowania niezupełne w powietrzu lub w innych gazach (B_{S8}) oceniono na poziomie wysokim. Pomimo ograniczeń tej technologii polegających na stosunkowo niewielkiej wydajności procesu modyfikowania i na obecnym etapie rozwoju częstej konieczności prowadzenia tego procesu ręcznie, ma ona zasadniczą przewagę w odniesieniu do klasycznej metody wyładowań koronowych (A_{S8}), polegającą na możliwości modyfikowania elementów o złożonych, nieregularnych kształtach przestrzennych (3D) oraz otworów i części przelotowych elementów konstrukcyjnych. Technologia ta umożliwia generowanie plazmy o różnych własnościach, w różnych gazach, także z użyciem niewielkich urządzeń przenośnych lub montowanych w uchwytach robotów, co aktualnie znajduje zastosowanie głównie w produkcji złożonych mechanizmów różnych urządzeń wykonanych z materiałów polimerowych oraz w produkcji samochodów i sprzętu AGD. Przyszłe trendy rozwojowe będą zapewne dotyczyć zwiększenia wydajności generatorów plazmy i automatyzacji procesu.

Spośród technologii modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym najbardziej niepewne perspektywy rozwojowe, określone jako umiarkowane, charakteryzują znajdującą się w otoczeniu burzliwym technologię modyfikacji powierzchni z użyciem wysokoenergetycznego promieniowania elektronowego (E_{S8}). Otoczenie tej technologii niesie zarówno liczne sposobności w postaci nowych zastosowań na atrakcyjnych rynkach potencjalnie dysponujących wysokim kapitałem inwestycyjnym (energetyka, budownictwo), jak i trudności związane z wysokimi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi (energochłonność procesu), koniecznością zatrudnienia wysoko wykwalifikowanej kadry, silną pozycją nabywców i dostawców w łańcuchu dostaw, a także wysokim stopniem specjalizacji i aplikowalnością w odniesieniu do wąskiej grupy produktów. Niewłaściwa obsługa lub awaria systemu zabezpieczeń może także spowodować zagrożenie radiacyjne, co jest wadą z punktu widzenia proekologiczności procesu. Wysokoenergetyczne promieniowanie elektronowe ma zastosowanie głównie do modyfikacji głębszych warstw materiału, mającego grubość do 40 mm, którym są zwykle powłoki izolacyjne kabli energetycznych oraz polietylenowe rury i płyty lub materiały konstrukcyjne zawierające w swoim składzie różne polimery. Celem modyfikacji powodującej usieciowanie warstwy wierzchniej materiału jest wzrost wytrzymałości mechanicznej, większa odporność na procesy degradacji i większa hydrofilowość umożliwiająca w następnej kolejności jego klejenie, drukowanie i/lub zdobienie. Przewidywany rozwój technologii E_{S8} będzie zmierzał do doskonalenia urządzeń modyfikujących i optymalizacji parametrów procesu, a niespodziankowy scenariusz rozwoju tej technologii, zarówno optymistyczny, jak i pesymistyczny, nie jest wykluczony.

5.4. Wnioski pośrednie dotyczące weryfikacji doświadczalnej nowo opracowanej metodologii na podstawie wybranych studiów przypadku

W niniejszym rozdziale pracy zaprezentowano wyniki obszernych badań materiałoznawczo-heurystycznych, dotyczących ośmiu studiów przypadku obejmujących różne rodzaje obróbki powierzchniowej materiałów inżynierskich. Dokonując wyboru technologii do analizy, dla zapewnienia jak najszerszego zakresu weryfikacji nowo opracowanej metodologii, celowo zadbano o zapewnienie ich zróżnicowania pod kątem fazy cyklu życia, aktualnego zakresu zastosowań przemysłowych, jak i materiału do badań. W związku z tym w grupie analizowanych technologii są zarówno technologie młode (embrionalne, eksperymentalne, prototypowe, wzrostowe), jak i znajdujące się na różnych etapach dojrzałości lub nawet schyłkowe,

które aktualnie szeroko stosuje się w przemyśle lub przeciwnie – na razie jedynie w skali laboratoryjnej lub półtechnicznej w odniesieniu do materiałów metalowych o zróżnicowanych własnościach, tj. różnych gatunków stali, stopów metali lekkich, miękkich stopów metali nieżelaznych, a także spiekanych materiałów narzędziowych i materiałów niemetalowych, tj. krzemu i materiałów polimerowych. W szczególności analizie poddano następujące grupy technologii:

(*S*1) Obróbka laserowa stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco.

(*S*2) Laserowe przetapianie i wtapianie cząstek węglików w warstwę powierzchniową odlewniczych stopów magnezu.

(*S*3) Fizyczne osadzanie z fazy gazowej (PVD) powłok na stop miedzi z cynkiem.

(*S*4) Wybrane technologie obróbki cieplno-chemicznej stali.

(*S*5) Nakładanie powłok PVD/CVD na spiekane materiały narzędziowe.

(*S*6) Teksturowanie krzemu polikrystalicznego do celów fotowoltaiki.

(*S*7) Wytwarzanie spiekanych materiałów gradientowych klasyczną metodą metalurgii proszków.

(*S*8) Wybrane technologie modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich.

Omówione studia przypadku dotyczyły łącznie 35 technologii szczegółowych lub ich grup. Wyniki wykonanych badań heurystycznych dotyczących wszystkich studiów przypadku, opisanych szczegółowo w podrozdziale 5.2 (*S*1) lub w sposób syntetyczny w podrozdziale 5.3 (*S*2-*S*8), naniesiono na czteropolowe zbiorcze macierze: dendrologiczną wartości technologii (plansza 1) i meteorologiczną oddziaływania otoczenia (plansza 2) oraz na szesnastopolową zbiorczą macierz strategii dla technologii, będącą wypadkową macierzy dendrologicznej i meteorologicznej (plansza 3). W celu ułatwienia odczytu wyników badań każdej grupie technologii szczegółowych ze zbioru *S*1-*S*8 przypisano indywidualne kolory. Każdy z punktów naniesionych na poszczególne macierze, którego współrzędne stanowią wynik oceny eksperckiej, ma przy oznaczającym go symbolu górny i dolny indeks. Indeks dolny określa grupę technologii ze zbioru *S*1-*S*8, do której należy dana technologia bądź grupa technologii, natomiast indeks górny oznacza rodzaj macierzy, na którą punkty zostały naniesione. Indeks górny *s* wskazuje, że dany punkt został naniesiony na macierz strategii dla technologii, w odróżnieniu od pozostałych możliwych indeksów: *d* – odpowiadającego punktom naniesionym na macierz dendrologiczną i *m* – punktom naniesionym na macierz meteorologiczną, które to oznaczenia zastosowano na planszach i w tekście.

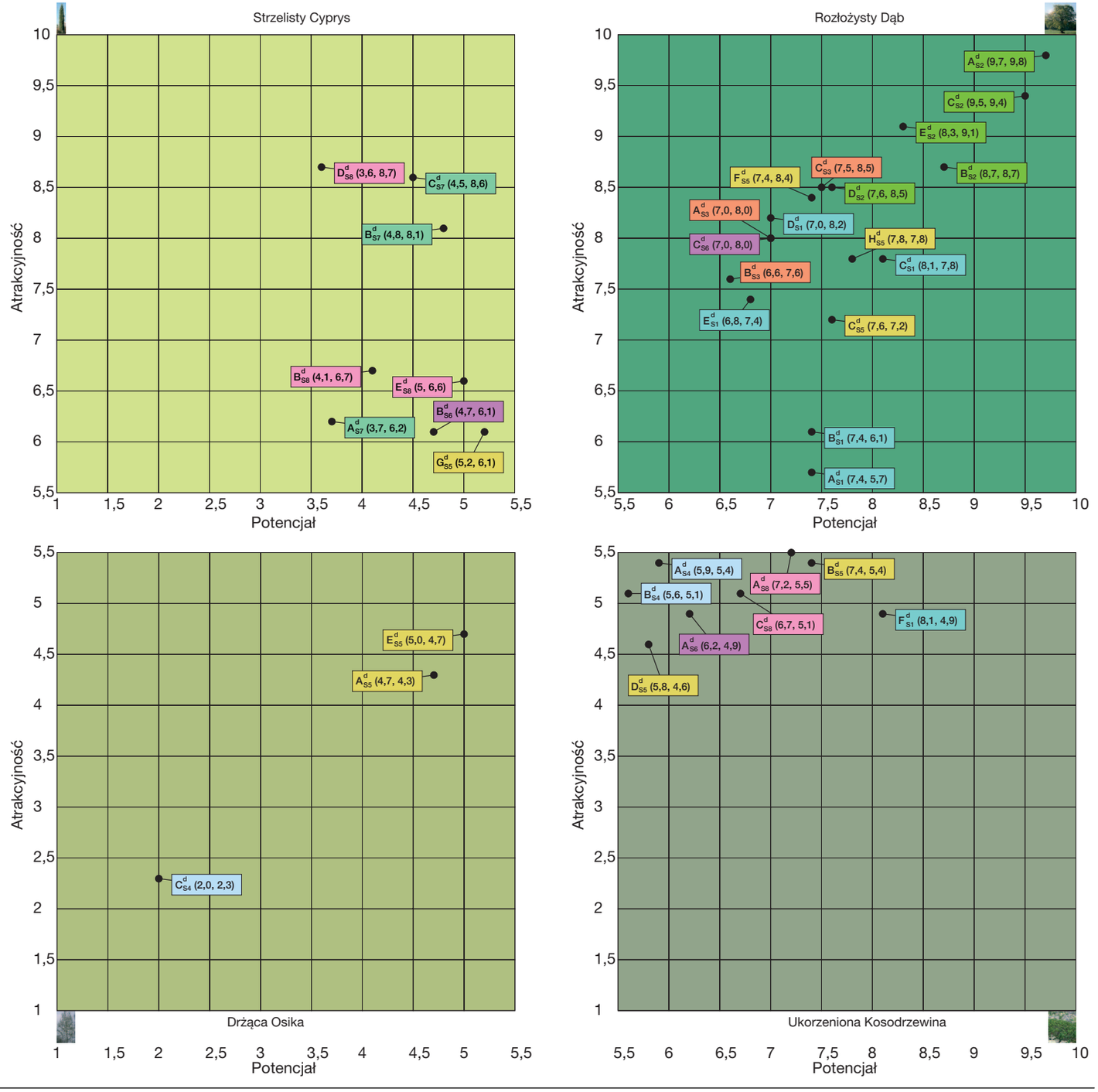
Wyniki wykonanych badań materiałoznawczych każdorazowo określają merytoryczne przesłanki związane z rozwojem, a niekiedy wręcz przeciwnie z zanikiem danej technologii. Szczegółowo zbadana struktura tych materiałów, jak i ich różne własności, w każdym przypadku istotnie decydujące o własnościach użytkowych i w efekcie tego o możliwych funkcjach aplikacyjnych tak obrobionych materiałów inżynierskich, wskazują na potrzebę i kierunek przewidywanego i pożądanego rozwoju zarówno danej grupy materiałów, jak i stosowanych do nich technologii obróbki powierzchniowej, z wyłączeniem nielicznych technologii szczegółowych, których przyszły rozwój jest ograniczony lub niemożliwy. W odniesieniu do wszystkich wybranych technologii obróbki powierzchniowej zawartych w grupach *S*1-*S*8 zastosowano także metody heurystyczne, w celu ustalenia ich perspektyw rozwojowych w najbliższym 20-leciu. Całkowicie odmienne podejście, opierające się na wiedzy, jaką dysponują eksperci, każdorazowo doprowadziło do identycznych wniosków strategicznych, pozwalając dodatkowo wskazać pozycję rankingową danej technologii wśród innych, które poddano szczegółowej analizie. Podane fakty wskazują, że nowo opracowaną metodologię opisaną w niniejszej pracy zweryfikowano pozytywnie, stosując jako punkt odniesienia wyniki szczegółowych eksperymentalnych badań struktury i własności materiałów inżynierskich.

Słuszność założenia przyjętego na początku podrozdziału 5.1. pracy została zatem potwierdzona, ponieważ wyniki analiz dotyczących perspektyw rozwojowych rozpatrywanych technologii zastosowanych w odniesieniu do wybranych grup materiałów inżynierskich prowadzą do identycznych wniosków, zarówno przy klasycznym podejściu materiałoznawczym, jak i przy zastosowaniu nowo opracowanej autorskiej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów. Pozytywna weryfikacja doświadczalna metodologii uprawnia do sformułowania następujących **wniosków pośrednich**:

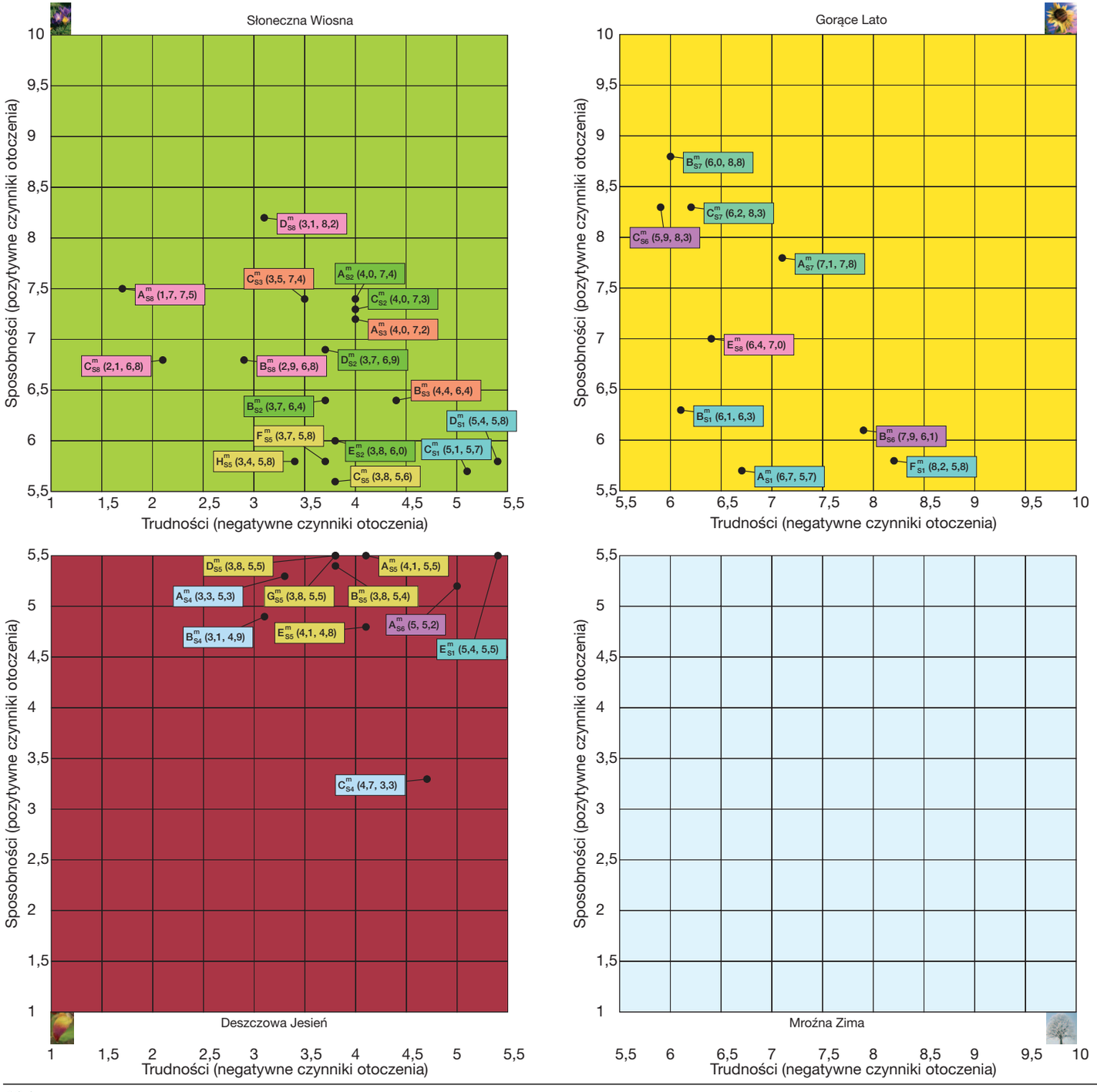
1. Nowo opracowana metodologia jest przydatnym i efektywnym narzędziem prognozowania rozwoju, nadającym się do zastosowania w obszarze inżynierii powierzchni materiałów.
2. Zasadne jest wykonywanie dalszych badań w obszarze inżynierii powierzchni materiałów z użyciem nowo opracowanej metodologii.
3. Badania heurystyczne pozwalają na otrzymanie wiarygodnych wyników umożliwiających wytyczenie prognozowanych trendów rozwojowych analizowanych grup technologii i określenie ich pozycji strategicznej na tle innych grup technologii i inżynierii powierzchni

materiałów ogółem, bez konieczności wspierania ich klasycznymi badaniami materiałoznawczymi.

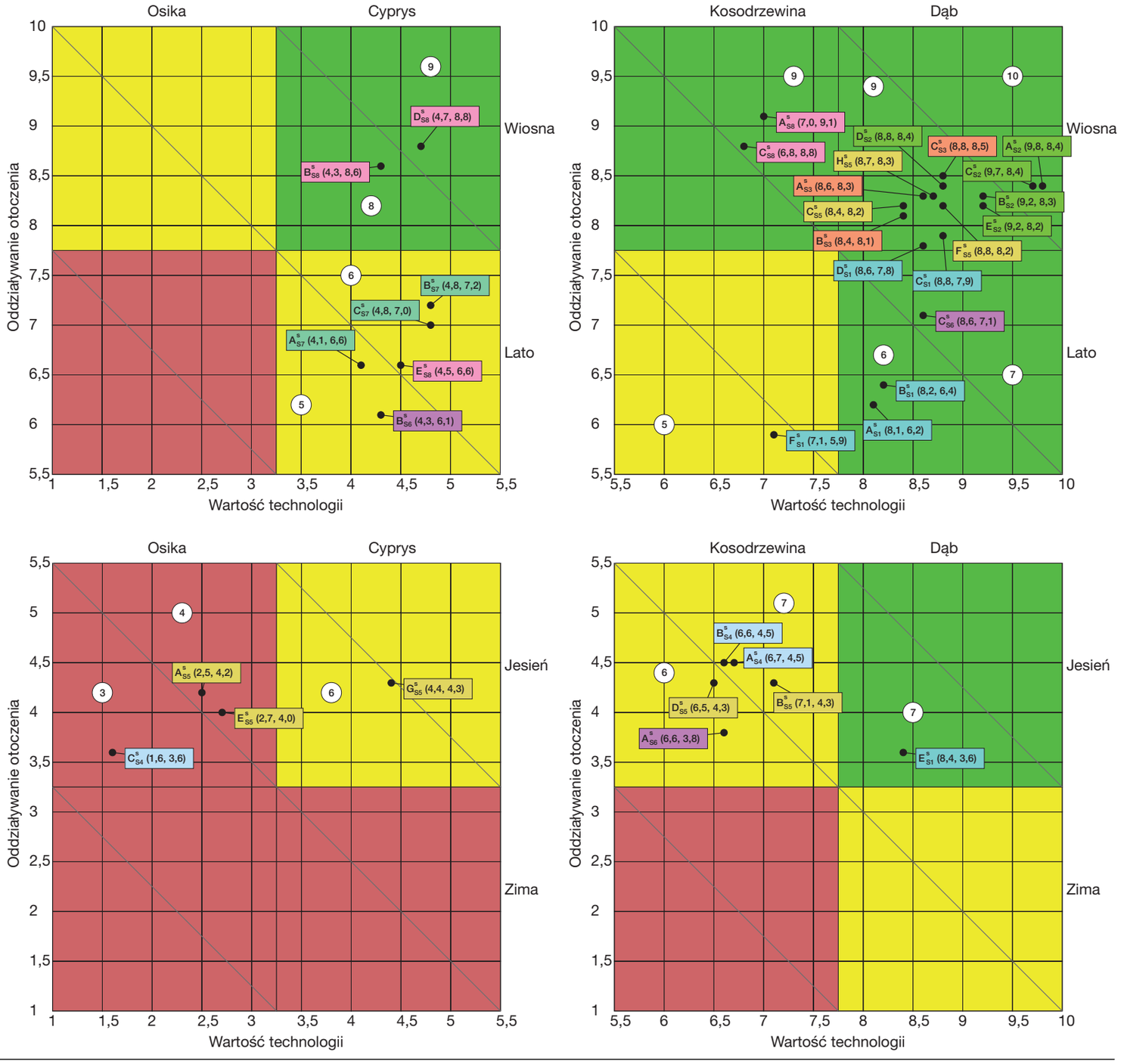
Opierając się na wnioskach pośrednich wykonano szerokie, trójetapowe badania heurystyczne, z użyciem autorskiej metody elektronicznego ankietowania ekspertów e-Delphix, w odniesieniu do 140 grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów, wyłonionych na podstawie wyników analizy stanu zagadnienia przeprowadzonej na wcześniejszym etapie prac własnych [76]. Syntetyczne wyniki wykonanych badań przedstawiono w kolejnym rozdziale rozprawy.



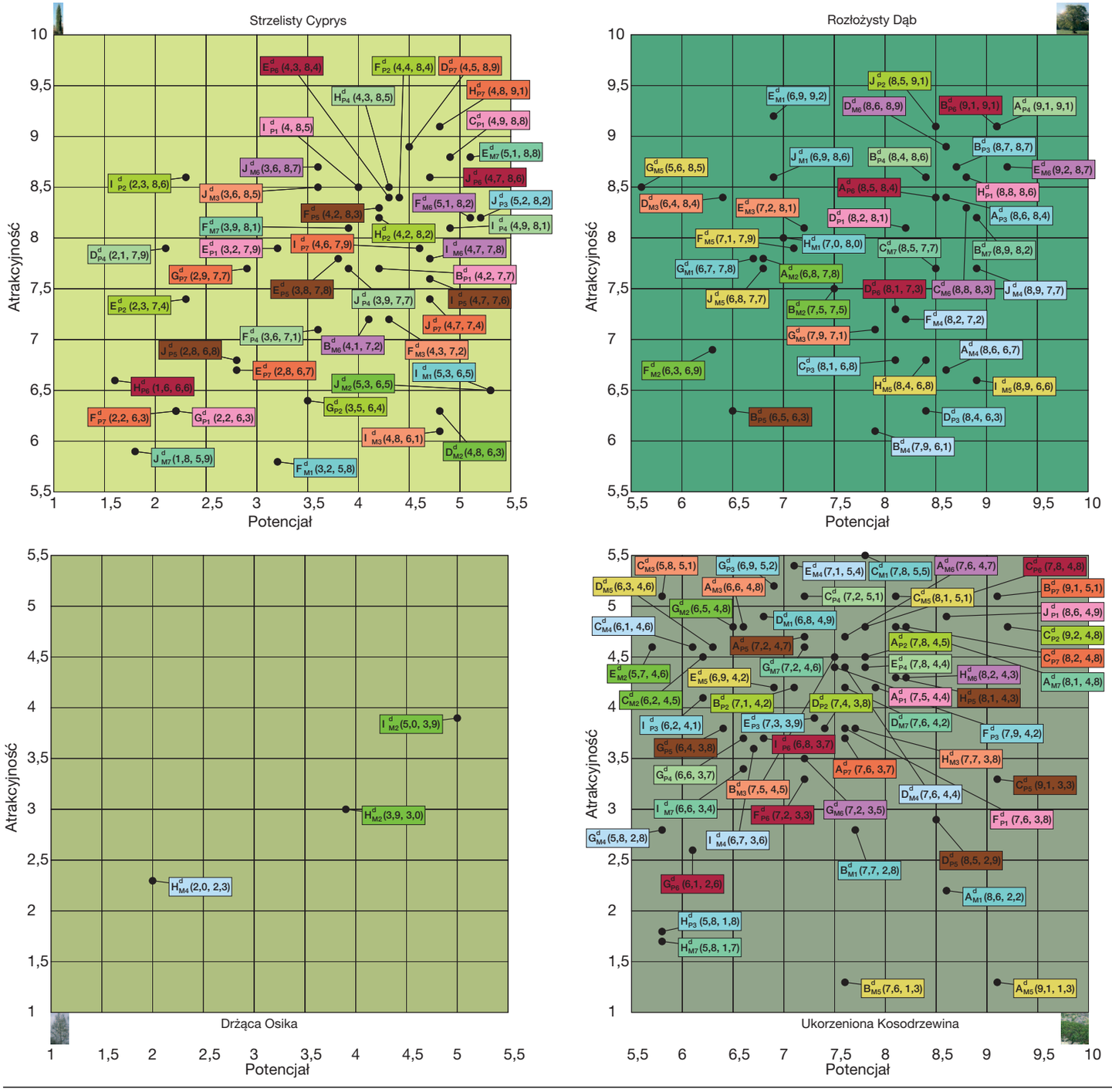
Plansza 1. *Dendrologiczna macierz wartości technologii, dotycząca grup technologii szczegółowych S1-S8*



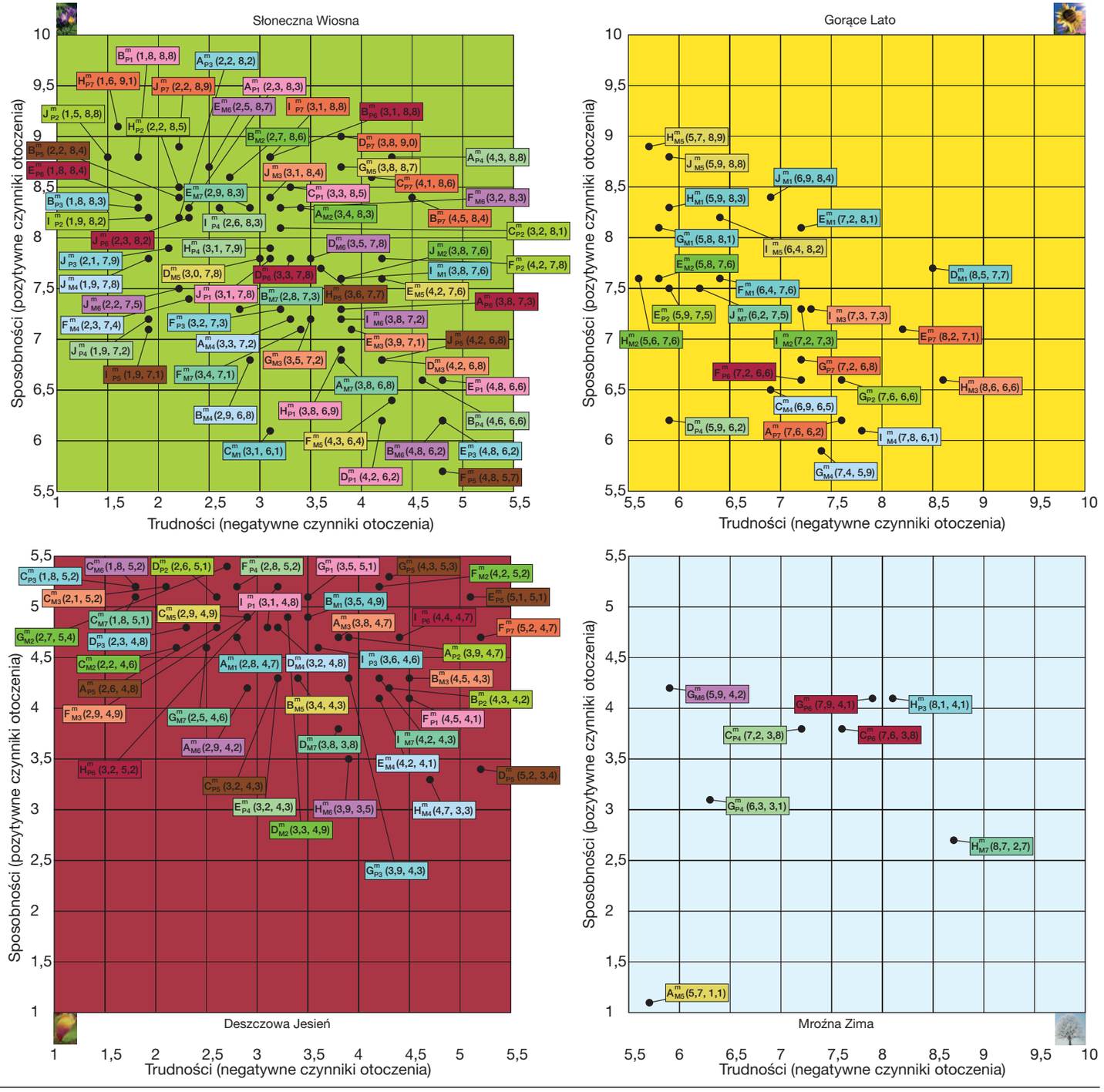
Plansza 2. *Meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia, dotycząca grup technologii szczegółowych S1-S8*



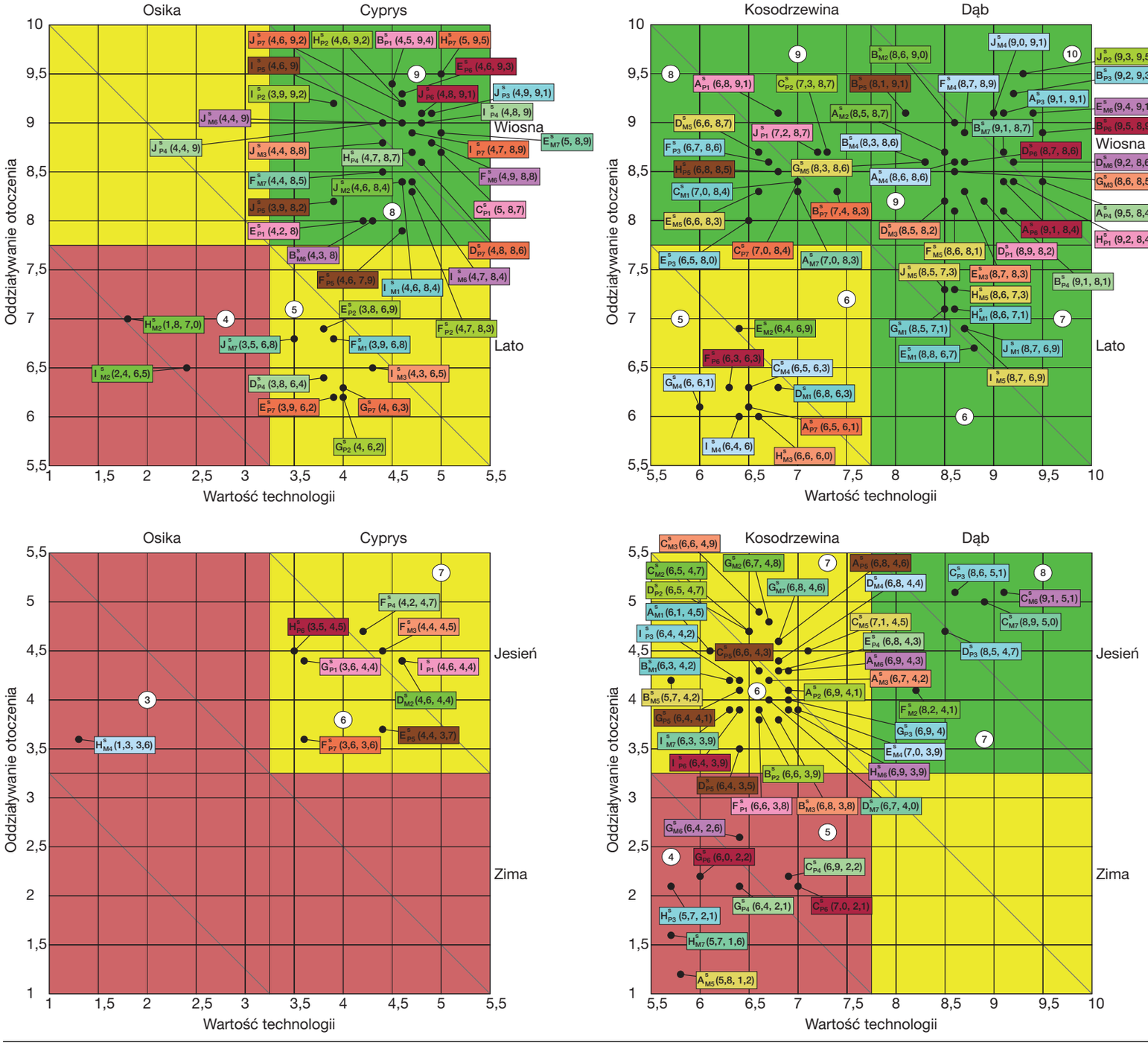
Plansza 3. *Macierz strategii dla technologii, dotycząca grup technologii szczegółowych S1-S8*



Plansza 4. *Zbiorcza dendrologiczna macierz wartości technologii, dotycząca obszarów tematycznych M1-M7 i P1-P7*



Plansza ***5.*** *Zbiorcza meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia, dotycząca obszarów tematycznych M1-M7 i P1-P7*



Plansza 6. *Zbiorcza macierz strategii dla technologii, dotycząca obszarów tematycznych M1-M7 i P1-P7*

6. Perspektywy rozwojowe krytycznych technologii inżynierii powierzchni materiałów

Technologie krytyczne inżynierii powierzchni materiałów są to priorytetowe technologie o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w analizowanym horyzoncie czasowym 20 lat. Wszystkie technologie krytyczne sklasyfikowano w ramach dwóch pól badawczych: *M* (ang.: *Manufacturing*) i *P* (ang.: *Product*) i opisano odpowiednio w podrozdziałach 6.1 i 6.2 niniejszej pracy. Pola badawcze odpowiadają alternatywnemu spojrzeniu na zagadnienie: producenta – zainteresowanego sposobem wytwarzania produktów i urządzeniami, w które należy wyposażyć park maszynowy, aby możliwa była realizacja procesów produkcyjnych, reprezentującego podejście procesowe (*M)* i klienta mającego podejście konsumenckie (*P*), zgodnie z którym najistotniejsze jest zapewnienie pożądanych własności użytkowych produktów i materiałów inżynierskich, z których są one wytwarzane. W ramach każdego pola badawczego wyróżniono po 7 obszarów tematycznych, odpowiednio *M*1-*M*7 i *P*1-*P*7, z których każdy zawiera po 10 grup technologii, co daje łącznie zbiór 140 grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów (tabl. 18). Zbiór ten wygenerowano opierając się na wynikach analizy stanu zagadnienia obejmującej ocenę jego stanu na podstawie przeglądu krajowego i światowego piśmiennictwa, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi (STEEP, SWOT), co ogólnie opisano w rozdziale 3.3 niniejszej pracy, a szczegółowo przedstawiono w publikacji [76]. Wyjaśnienia wymaga fakt, że istnieją przypadki, w których dana grupa technologii pojawia się więcej niż jednokrotnie w zbiorze technologii krytycznych, co nie jest przeoczeniem ani błędem, tylko działaniem celowym. Możliwe jest bowiem, że dana grupa technologii ma istotne znaczenie w kilku obszarach tematycznych równocześnie, natomiast znaczenie to na tle innych technologii różnych obszarów może być zarówno zbliżone lub tożsame, jak również całkiem odmienne.

W celu określenia pozycji strategicznej poszczególnych grup technologii krytycznych i wytyczenia strategii postępowania, rekomendowanych do aplikacji w odniesieniu do tych technologii, zastosowano nowo opracowaną metodologię komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, której poprawność uprzednio zweryfikowano pozytywnie, stosując jako punkt odniesienia wyniki klasycznych badań materiałoznawczych (rozdział 5.).

Tablica 18. *Grupy technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów poddane badaniom heurystycznym zgodnie z nowo opracowaną metodologią komputerowo wspomaganego prognozowania rozwoju; WW – warstwa wierzchnia*

Podejście procesowe: pole badawcze *M*	**Podejście konsumenckie: pole badawcze *P***
Technologie laserowe w inżynierii powierzchni *M*1	Inżynieria powierzchni biomateriałów *P*1
A_{M1} Laserowa obróbka cieplna B_{M1} Przetapianie laserowe C_{M1} Stopowanie/wtapianie laserowe D_{M1} Napawanie laserowe E_{M1} Laserowe wytwarzanie przyrostowe F_{M1} Chemiczne osadzanie z fazy gazowej aktywowane laserowo (LCVD) G_{M1} Fizyczne osadzanie z fazy gazowej wspomagane laserowo (LAPVD) H_{M1} Obróbka laserowa materiałów funkcjonalnych I_{M1} Ablacja laserowa (PLD) J_{M1} Obróbka laserowa biomateriałów	A_{P1} Immobilizacja B_{P1} Nanoszenie monowarstw samoorganizujących się C_{P1} Wzornikowanie D_{P1} Metoda zol-żel E_{P1} Infiltracja F_{P1} Osadzanie elektroforetyczne i sedymentacyjne G_{P1} Konsolidacja H_{P1} Fizyczne i chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD/CVD) I_{P1} Ablacja laserowa (PLD) J_{P1} Nanoszenie warstw diamentowych i diamentopodobnych powłok węglowych (DLC)
Technologie fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) *M*2	Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych *P*2
A_{M2} Katodowe odparowanie łukowe (CAD) B_{M2} Reaktywne rozpylanie magnetronowe (RMS) C_{M2} Odparowanie metalu impulsowo-plazmowo (PPM) D_{M2} Osadzanie warstw z wykorzystaniem wiązki jonowej (IBAD) E_{M2} Odparowanie metalu niskonapięciowym działem elektronowym (HHCD) F_{M2} Osadzanie warstw z odparowaniem wiązką elektronową z jonizacją par (EB-PVD) G_{M2} Aktywowane reaktywnie naparowanie przy użyciu działa elektronowego (BARE) H_{M2} Reaktywne nanoszenie ze zjonizowanych klastrów (ICB) I_{M2} Odparowanie reaktywne łukiem elektrycznym (TAE) J_{M2} Ablacja laserowa (PLD)	A_{P2} Malowanie B_{P2} Technologie galwaniczne C_{P2} Technologie cieplne i cieplno-chemiczne D_{P2} Natryskiwanie cieplne E_{P2} Utwardzanie detonacyjne laserowe/elektronowe/wybuchowe F_{P2} Natapianie/stopowanie laserowe G_{P2} Natapianie/stopowanie elektronowe H_{P2} Implantacja jonów I_{P2} Pokrywanie ceramiką/cermetalami J_{P2} Fizyczne i chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD/CVD)
Technologie chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) *M*3	Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych *P*3
A_{M3} Wysokotemperaturowe chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (HFCVD) B_{M3} Osadzanie powłok z fazy gazowej pod ciśnieniem atmosferycznym (APCVD) C_{M3} Osadzanie powłok z fazy gazowej pod obniżonym ciśnieniem (LPCVD) D_{M3} Plazmo-chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PACVD/PECVD) E_{M3} Osadzanie powłok z fazy gazowej aktywowane laserowo (LCVD) F_{M3} Osadzanie powłok aktywowane wiązką promieni UV (Photo CVD) G_{M3} Osadzanie powłok z użyciem prekursorów metaloorganicznych (MOCVD) H_{M3} Osadzanie powłok realizowane w złożu fluidalnym (Fluidized-Bed CVD) I_{M3} Chemiczna infiltracja z fazy gazowej (CVI) J_{M3} Osadzanie pojedynczych warstw atomowych (ALD)	A_{P3} Fizyczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD) B_{P3} Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (CVD) C_{P3} Technologie galwaniczne D_{P3} Metalizacja próżniowa E_{P3} Implantacja jonów F_{P3} Metoda zol-żel G_{P3} Natryskiwanie cieplne H_{P3} Malowanie I_{P3} Osadzanie elektroforetyczne J_{P3} Osadzanie laserem impulsowym lub przez promieniowanie laserowo-plazmowych źródeł EUV
Technologie cieplno-chemiczne *M*4	Inżynieria powierzchni materiałów narzędziowych *P*4
A_{M4} Azotowanie plazmowe B_{M4} Azotowanie pod obniżonym ciśnieniem	A_{P4} Fizyczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD) B_{P4} Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (CVD)

Podejście procesowe: pole badawcze *M*	Podejście konsumenckie: pole badawcze *P*
C_{M4} Azotowanie gazowe	C_{P4} Natryskiwanie
D_{M4} Kompleksowe obróbki z udziałem azotowania	D_{P4} Metalurgia proszków (zmiana składu chemicznego i/lub fazowego w WW)
E_{M4} Nawęglanie gazowe i węgloazotowanie wysokotemperaturowe	E_{P4} Azotowanie i kompleksowe obróbki z udziałem azotowania
F_{M4} Nawęglanie plazmowe i pod obniżonym ciśnieniem	F_{P4} Stopowanie/wtapianie laserowe
G_{M4} Aluminiowanie	G_{P4} Napawanie
H_{M4} Borowanie	H_{P4} Nanoszenie powłok gradientowych
I_{M4} Pasywowanie	I_{P4} Technologie hybrydowe
J_{M4} Technologie hybrydowe	J_{P4} Ablacja laserowa (PLD)
Technologie polimerowych warstw wierzchnich *M*5	Inżynieria powierzchni stali dla przemysłu motoryzacyjnego *P*5
A_{M5} Tradycyjne techniki malarskie i nanoszenie zanurzeniowe	A_{P5} Cynkowanie ogniowe (w czystym Zn i stopach Zn-Al)
B_{M5} Natrysk hydrodynamiczny	B_{P5} Cynkowanie ogniowe z dodatkowym wyżarzaniem (powłoka Zn-Fe)
C_{M5} Malowanie proszkowe	C_{P5} Aluminiowanie ogniowe (w czystym Al i stopach Al-Si)
D_{M5} Osadzanie elektroforetyczne	D_{P5} Technologie galwaniczne
E_{M5} Nanoszenie fluidyzacyjno-elektrostatyczne	E_{P5} Metalizacja natryskowa
F_{M5} Nanoszenie powłok gradientowych	F_{P5} Natryskiwanie cieplne
G_{M5} Nanoszenie powłok z nanonapełniaczami	G_{P5} Nanoszenie powłok podkładowych polimerowych
H_{M5} Nanoszenie powłok z pamięcią kształtu	H_{P5} Malowanie i lakierowanie ciekłymi materiałami polimerowymi
I_{M5} Nanoszenie powłok samowykształcalnych na powierzchni polimerów	I_{P5} Nanoszenie powłok polimerowych proszkowych
J_{M5} Nanoszenie powłok biokompatybilnych	J_{P5} Nakładanie powłok z folii polimerowych
Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich *M*6	Inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych *P*6
A_{M6} Reaktywne trawienie jonowe (RIE)	A_{P6} Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (CVD)
B_{M6} Elektronolitografia (EBL)	B_{P6} Fizyczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD)
C_{M6} Chemiczne osadzanie nanometrycznych WW z fazy gazowej (CVD)	C_{P6} Pyroliza i jej odmiany
D_{M6} Fizyczne osadzanie nanometrycznych WW z wykorzystaniem wiązki jonowej (IBAD)	D_{P6} Metoda zol-żel
E_{M6} Fizyczne osadzanie nanometrycznych WW z odparowaniem wiązką elektronową z jonizacją par (EB-PVD)	E_{P6} Wytwarzanie powłok hybrydowych – organiczno-nieorganicznych
F_{M6} Osadzanie pojedynczych warstw atomowych (ALD)	F_{P6} Odparowanie
G_{M6} Elektroosadzanie nanometrycznych WW	G_{P6} Metody chemiczne/wyługowanie alkaliów z WW i zagęszczenie pozostałego SiO_2
H_{M6} Metoda zol-żel otrzymywania nanometrycznych WW	H_{P6} Reaktywne trawienie jonowe (RIE)
I_{M6} Nakładanie na WW powłok zawierających nanomateriały	I_{P6} Teksturowanie mechaniczne z wykorzystaniem ostrza diamentowego
J_{M6} Obróbka powierzchniowa nanomateriałów	J_{P6} Teksturowanie laserowe
Inne technologie inżynierii powierzchni M*7*	Inżynieria powierzchni materiałów polimerowych *P*7
A_{M7} Pokrywanie powłokami galwanicznymi	A_{P7} Metalizacja
B_{M7} Pokrywanie powłokami natryskiwanymi cieplnie	B_{P7} Elektrokoronowanie
C_{M7} Pokrywanie powłokami formowanymi niskociśnieniowo z proszków i spiekanie	C_{P7} Obróbka plazmą powierzchni polimerów
D_{M7} Pokrywanie powłokami metalizowanymi zanurzeniowo	D_{P7} Obróbka laserem powierzchni polimerów
E_{M7} Pokrywanie ceramiką/cermetalami	E_{P7} Obróbka powierzchni polimerów z użyciem promieni UV
F_{M7} Wytwarzanie powierzchniowych warstw odlewniczych i infiltracyjnych	F_{P7} Obróbka powierzchni polimerów z użyciem promieni gamma
G_{M7} Napawanie powłok	G_{P7} Obróbka powierzchni polimerów z użyciem promieniowania elektronowego
H_{M7} Nagniatanie, kulkowanie	H_{P7} Utworzenie na powierzchni polimerów powłok gradientowych
I_{M7} Platerowanie	I_{P7} Utworzenie na powierzchni polimerów powłok samowykształcalnych
J_{M7} Utwardzanie detonacyjne	J_{P7} Polimeryzacja *in situ*

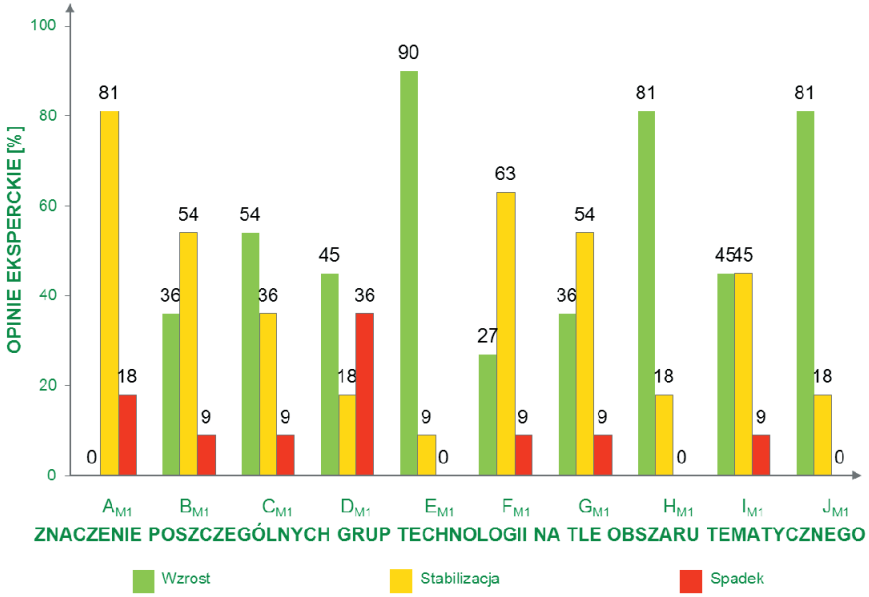
Wyniki elektronicznej ankietyzacji ekspertów, specjalistów reprezentujących poszczególne obszary tematyczne, wykonanej zgodnie z koncepcją e-foresightu technologicznego z użyciem metody e-Delphix i towarzyszącej jej technologii informacyjnej, umożliwiającej realizację badań w rzeczywistości wirtualnej, stanowiły pierwotne dane źródłowe, wyrażone ilościowo z wykorzystaniem dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych (1 – minimum; 10 – maksimum), które wykorzystano do sporządzenia zbiorczych macierzy kontekstowych, dotyczących wszystkich analizowanych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów. W szczególności dokonano oceny wartości poszczególnych grup technologii, z uwzględnieniem ich potencjału i atrakcyjności, a wyniki tych ocen naniesiono na zbiorczą dendrologiczną macierz wartości technologii (plansza 4). Wyniki oceny pozytywnego i negatywnego oddziaływania czynników otoczenia naniesiono natomiast na zbiorczą meteorologiczną macierz oddziaływania otoczenia (plansza 5). W następnej kolejności, stosując dedykowany temu zagadnieniu program komputerowy, wygenerowano zbiorczą macierz strategii dla technologii, którą zaprezentowano na planszy 6. Kółkami naniesionymi na tę macierz oznaczono, wyrażone liczbowo w uniwersalnej skali stanów względnych, strategiczne perspektywy rozwojowe poszczególnych technologii, co pozwala na przeprowadzenie ilościowej analizy porównawczej poszczególnych grup technologii krytycznych poddanych badaniom heurystycznym.

Interpretując wyniki badań heurystycznych, w głównej mierze bazowano na zbiorczych macierzach kontekstowych (plansze 4-6), a zwłaszcza zbiorczej macierzy strategii dla technologii (plansza 6), wspierając się również zestawionymi w postaci wykresów (rys. 106-119) wynikami uzupełniających badań statystycznych, w ramach których eksperci określili prognozowane trendy rozwojowe danych grup technologii na tle analizowanego obszaru tematycznego, typując, czy znaczenie poszczególnych grup technologii w ciągu najbliższych 20 lat będzie rosnąć, utrzymywać się na dotychczasowym poziomie, czy też maleć. Na wszystkich wykresach słupki zielone odpowiadają, wyrażonemu procentowo, przewidywanemu wzrostowi znaczenia danej grupy technologii, żółte – stabilizacji na dotychczasowym poziomie, a czerwone – spadkowi znaczenia grupy technologii na tle pozostałych grup technologii danego obszaru tematycznego. W niniejszym rozdziale pracy, zawierającym m.in. interpretację zestawień statystycznych, wielokrotnie pojawia się konieczność przywołania wartości procentowych, które – każdorazowo podane w nawiasach – oznaczają procent ekspertów, którzy potwierdzili prawdziwość postawionej tezy.

6.1. Pozycja strategiczna i trendy rozwojowe technologii krytycznych sklasyfikowanych zgodnie z podejściem procesowym

M1 Technologie laserowe w inżynierii powierzchni

Najlepsze perspektywy rozwojowe, spośród technologii krytycznych należących do obszaru tematycznego *M*1: Technologie laserowe w inżynierii powierzchni, posiadają stopowanie/wtapianie laserowe C^s_{M1} (7,0, 8,4) oraz ablacja laserowa I^s_{M1} (4,6, 8,4), które zostały ocenione wysoko (8 punktów). Grupa technologii C_{M1} znalazła się w polu kosodrzewiny wiosną, co oznacza jej wysoki potencjał i ograniczoną atrakcyjność, zatem zalecane w stosunku do niej działania obejmują: uatrakcyjnianie, unowocześnianie, automatyzowanie, komputeryzowanie i promocję z wykorzystaniem dobrej koniunktury na rynku. Ablacja laserowa I_{M1} znalazła się w polu cyprysa wiosną, co oznacza jej wysoką atrakcyjność przy ograniczonym potencjale, który zaleca się wzmocnić poprzez dalsze prace naukowo-badawcze, udoskonalanie i doinwestowywanie w warunkach dobrej koniunktury na rynku. W odniesieniu do ocenionych na 7 punktów, eksperymentalnych lub prototypowych, niezwykle obiecujących technologii obróbki laserowej materiałów funkcjonalnych H^s_{M1} (8,6, 7,1) i biomateriałów J^s_{M1} (8,7, 6,9) oraz laserowego wytwarzania przyrostowego E^s_{M1} (8,8, 6,7), a także będącego we wczesnodojrzałej fazie cyklu życia fizycznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego laserowo G^s_{M1} (8,5, 7,1) rekomendowane jest zastosowanie strategii dębu latem. Zgodnie z nią należy wykorzystywać atrakcyjność i potencjał technologii znajdujących się w ryzykownym otoczeniu odpowiadającym silnej konkurencji światowej, szukać sposobności i unikać trudności oraz mocno promować technologię, poprzedzając te działania badaniami marketingowymi, w celu jak najlepszego dopasowania produktu do wymagań klienta. Perspektywy rozwojowe bazowych grup technologii: A^s_{M1} (6,1, 4,5) laserowej obróbki cieplnej oraz B^s_{M1} (6,2, 4,3) przetapiania laserowego określono na umiarkowanym poziomie (6 punktów), zalecając czerpanie zysków z realizacji produkcji w stabilnym przewidywalnym otoczeniu z wykorzystaniem solidnej technologii, którą należy unowocześniać i intensywnie promować dla wzmocnienia jej atrakcyjności. Grupa technologii bazowych D^s_{M1} (6,8, 6,3), którym to symbolem oznaczono napawanie laserowe, znalazła się w polu kosodrzewiny latem, a postępowanie zalecane wobec niej to uatrakcyjnianie i unowocześnianie technologii o dużym potencjale oraz dopasowanie produktu do wymagań klienta na podstawie wyników badań



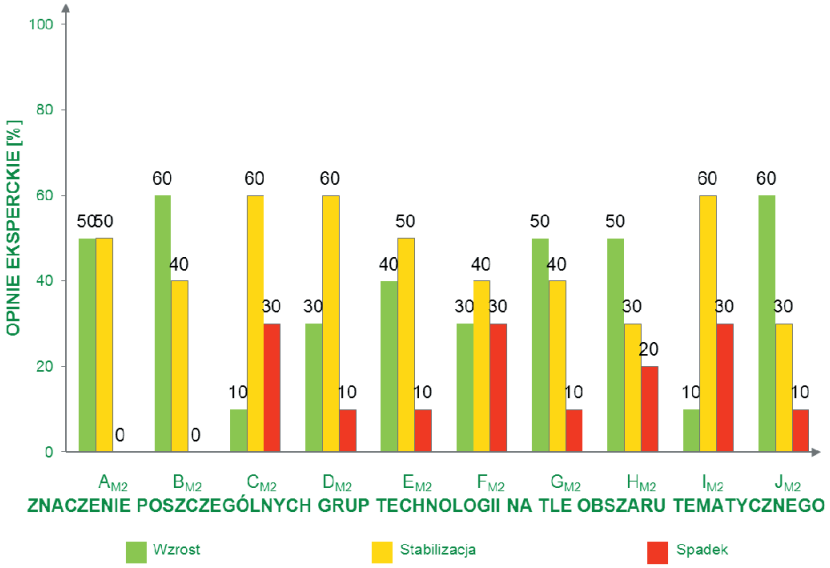
Rysunek 106. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M1: Technologie laserowe w inżynierii powierzchni*

marketingowych. Chemiczne osadzanie z fazy gazowej aktywowane laserowo F^{S}_{M1} (3,9, 6,8) umieszczono w polu cyprysa latem, co oznacza, że należy wzmacniać potencjał tej atrakcyjnej grupy technologii znajdującej się w niepewnym otoczeniu, ocenić ryzyko i, w zależności od wyniku, agresywnie zawalczyć o klienta lub powoli wycofywać technologię z rynku. Otoczenie zarówno bazowej grupy technologii D_{M1}, jak i wczesnodojrzałej grupy technologii F_{M1} należy do burzliwych, zatem zarówno pozytywne, jak i negatywne scenariusze niespodziankowe ich rozwoju nie są wykluczone.

Analiza przyszłych trendów rozwojowych poszczególnych grup laserowej obróbki powierzchniowej (rys. 106) wskazuje, że do technologii, których znaczenie będzie wzrastać w ramach badanego obszaru tematycznego, należą: laserowe wytwarzanie przyrostowe E_{M1} (90%), obróbka laserowa materiałów funkcjonalnych H_{M1} (81%) i obróbka laserowa biomateriałów J_{M1} (81%). Spośród badanych grup technologii największą niepewnością obciążona jest przyszłość napawania laserowego D_{M1}, której znacznie na tle innych grup technologii może zarówno wzrastać (45%), maleć (36%), jak i utrzymywać się na dotychczasowym poziomie (18%).

M2 Technologie PVD

Wyniki badań heurystycznych wskazują, że najlepsze perspektywy rozwoju strategicznego spośród technologii fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD), określone jako bardzo wysokie (9 punktów), posiadają reaktywne rozpylanie magnetronowe (RMS) B^s_{M2} (8,6, 9,0) oraz katodowe odparowanie łukowe (CAD) A^s_{M2} (8,5, 8,7), które należy rozwijać, umacniać i implementować w praktyce przemysłowej w celu odniesienia spektakularnego sukcesu. Atrakcyjną grupę technologii o ograniczonym potencjale J^s_{M2} (4,6, 8,4), którą jest ablacja laserowa (PLD), należy badać, udoskonalać i doinwestowywać wykorzystując dobrą koniunkturę na rynku. W odniesieniu do znajdującej się w przewidywalnym otoczeniu atrakcyjnej, stabilnej technologii, polegającej na osadzaniu warstw z odparowaniem wiązką elektronową z jonizacją par (EB-PVD) F^s_{M2} (8,2, 4,1), przewiduje się przyszły sukces, równocześnie zalecając szukanie nowych rynków, grup klientów i możliwych do wytwarzania produktów. Producenci stosujący solidne, dobrze poznane grupy technologii odparowywania metalu impulsowo-plazmowo (PPM) C^s_{M2} (6,5, 4,7) i aktywnego reaktywnego naparowania przy użyciu działa elektronowego (BARE) G^s_{M2} (6,7, 4,8), powinni czerpać zyski z realizacji produkcji w stabilnym przewidywalnym otoczeniu oraz unowocześniać i promować stosowane technologie dla wzmocnienia ich atrakcyjności na rynku. Maksymalne wykorzystanie sprzyjających warunków zewnętrznych do realizacji produkcji z użyciem atrakcyjnej technologii, połączone ze wzmacnianiem jej potencjału, to strategia rekomendowana dla osadzania warstw z wykorzystaniem wiązki jonowej (IBAD) D^s_{M2} (4,6, 4,4), a wzmacnianie atrakcyjności i dopasowanie produktu do wymagań klienta to postępowanie zalecane dla odparowania metalu niskonapięciowym działem elektronowym (HHCD) E^s_{M2} (6,4, 6,9). W odniesieniu do najniżej ocenionych i stosunkowo najmniej poznanych, spośród metod fizycznego osadzania z fazy gazowej, grup technologii: eksperymentalnego reaktywnego nanoszenia ze zjonizowanych klastrów (ICB) H^s_{M2} (1,8, 7,0) i wzrostowego odparowania reaktywnego łukiem elektrycznym (TAE) I^s_{M2} (2,4, 6,5) rekomendowane jest przeprowadzenie analizy ryzyka i indywidualna ocena szans na sukces. W obu tych przypadkach należy brać pod uwagę scenariusze niespodziankowe, a spektakularny przełom nie jest wykluczony, zważywszy, że są to technologie młode, znajdujące się w burzliwym otoczeniu.



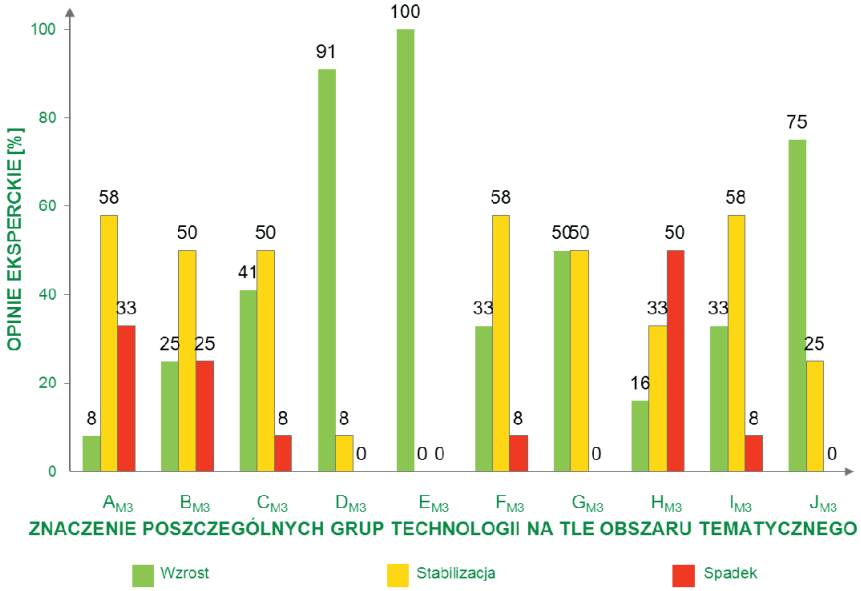
Rysunek 107. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M2: Technologie PVD*

W grupie technologii fizycznego osadzania z fazy gazowej najbardziej optymistyczne ścieżki rozwoju strategicznego, wskazujące na przyszły wzrost znaczenia tych technologii, charakteryzują reaktywne rozpylanie magnetronowe (RMS) B_{M2} (60%) oraz ablację laserową J_{M2} (60%). Z 50% prawdopodobieństwem wzrastać będzie znaczenie sprawdzonych i stosunkowo dobrze poznanych metod katodowego odparowania łukowego (CAD) A_{M2} i aktywnego reaktywnego naparowania przy użyciu działa elektronowego (BARE) G_{M2}, jak również znajdującego się na razie w fazie eksperymentalnej, lecz wysoce obiecującego reaktywnego nanoszenia ze zjonizowanych klastrów (ICB) H_{M2} (rys. 107). Znaczenie pozostałych analizowanych technologii fizycznego osadzania z fazy gazowej na tle obszaru tematycznego najprawdopodobniej pozostanie na dotychczasowym poziomie. Najbardziej zróżnicowane oceny eksperci przyznali metodzie osadzania warstw z odparowaniem wiązką elektronową z jonizacją par (EB-PVD) F_{M2}, co odzwierciedla rzeczywisty podział środowiska naukowego na jej zdeklarowanych zwolenników i przeciwników. Do zalet tej metody należy możliwość odparowywania materiałów trudno topliwych, związków i mieszanin oraz dielektryków i wynikająca z tego możliwość konfigurowania powłok wielowarstwowych i warstw hybrydowych o zróżnicowanych charakterystykach fizykochemicznych i trybologicznych, natomiast za wady należy uznać bardzo kosztowną aparaturę i wysoki poziom skomplikowania

tej grupy technologii, wymagający zatrudnienia wysoko wykwalifikowanej kadry, ponadto większą energię jonów i atomów oraz większy stopień jonizacji plazmy można uzyskać stosując inne metody, np. katodowe odparowanie łukowe (CAD).

M3 Technologie CVD

W grupie technologii polegających na chemicznym osadzaniu powłok z fazy gazowej najlepsze pozycje strategiczne, ocenione każdorazowo na 9 punktów w dziesięciostopniowej skali, zajmują następujące metody: osadzanie powłok z użyciem prekursorów metaloorganicznych (MOCVD) G^s_{M3} (8,6, 8,5), osadzanie powłok z fazy gazowej aktywowane laserowo (LCVD) E^s_{M3} (8,7, 8,3) i plazmochemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PACVD/ PECVD) D^s_{M3} (8,5, 8,2), które znalazły się w najlepszej szesnastce macierzy strategii dla technologii, dla której zalecana jest strategia dębu wiosną, zatem ich przyszły sukces jest pewny. Bardzo obiecująca (8 punktów) jest również prototypowa technologia osadzania pojedynczych warstw atomowych (ALD) J^s_{M3} (4,4, 8,8), w odniesieniu do której zaleca się zastosowanie strategii cyprysa wiosną, polegającej na dalszych pracach naukowo-badawczych służących jej doskonaleniu i wzmacnianiu. Wskazane jest również doinwestowywanie tej atrakcyjnej technologii połączone z wykorzystywaniem licznych sposobności płynących z mikro- i makrootoczenia. Dość wysokimi perspektywami rozwojowymi (7 punktów) charakteryzują się również technologie osadzania powłok z fazy gazowej aktywowanego wiązką promieni UV (Photo CVD) F^s_{M3} (4,4, 4,5) i pod obniżonym ciśnieniem (LPCVD) C^s_{M3} (6,6, 4,9). W odniesieniu do wzrostowej technologii F_{M3} zaleca się zastosowanie strategii cyprysa jesienią, zgodnie z którą należy maksymalnie wykorzystywać stabilne, przewidywalne otoczenie w celu realizacji produkcji z użyciem atrakcyjnej technologii, wzmacniając równocześnie jej potencjał. Technologia C_{M3}, podobnie jak inne technologie bazowe o umiarkowanych perspektywach rozwoju (6 punktów), obejmujące klasyczne wysokotemperaturowe chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (HFCVD) A^s_{M3} (6,7, 4,2) i osadzanie ich pod ciśnieniem atmosferycznym (APCVD) B^s_{M3} (6,8, 3,8), znalazła się w polu kosodrzewiny jesienią. W odniesieniu do technologii C_{M3}, A_{M3} i B_{M3} zalecane jest zatem postępowanie polegające na czerpaniu zysków z realizacji produkcji w stabilnym przewidywalnym otoczeniu, z wykorzystaniem solidnych, dobrze poznanych technologii o dużym potencjale, które należy unowocześniać i intensywnie promować w celu wzmocnienia ich atrakcyjności.



Rysunek 108. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M3: Technologie CVD*

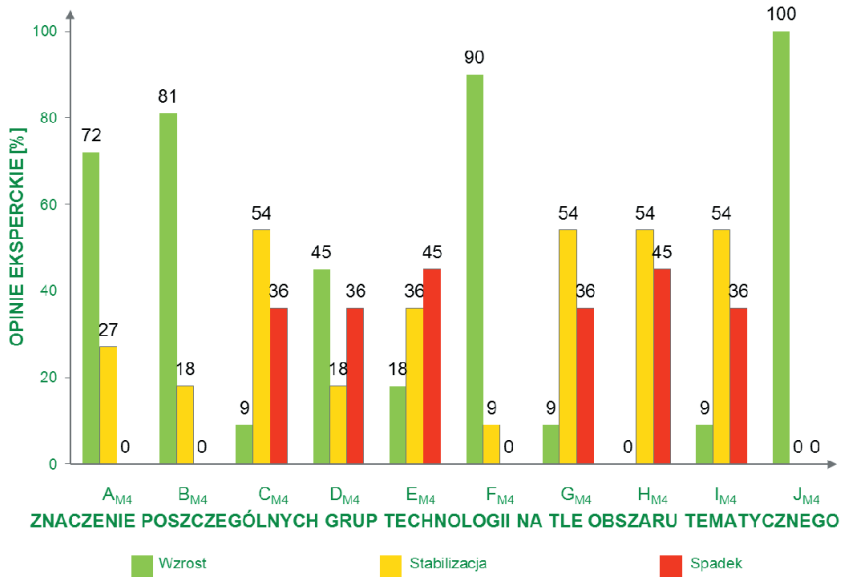
Średnią (5 punktów) pozycję strategiczną ma, znajdująca się na eksperymentalnym etapie rozwoju, charakteryzująca się dużą atrakcyjnością, chemiczna infiltracja z fazy gazowej (CVI) I^{s}_{M3} (4,3, 4,5), dla której zaleca się prowadzenie dalszych badań w celu umocnienia jej potencjału oraz ocenę specyficznych i systematycznych czynników ryzyka płynących z otoczenia i, w zależności od ich wyników, podjęcie walki o klienta lub wycofanie technologii z rynku, na którym przeważają niemożliwe do przezwyciężenia trudności. Podobnie na średnim poziomie (5 punktów) oceniono perspektywy rozwojowe późnodojrzałej technologii osadzania powłok realizowanego w złożu fluidalnym (Fluidized-Bed CVD) H^{s}_{M3} (6,6, 6,0), która znalazła się w polu kosodrzewiny latem. Postępowanie zalecane w odniesieniu do tej grupy technologii, mającej duży potencjał, obejmuje działania służące jej uatrakcyjnieniu i unowocześnieniu, przeprowadzenie badań marketingowych i dopasowanie produktu do wymagań klienta.

Przeprowadzona, na podstawie zestawienia statystycznego (rys. 108), analiza przyszłych ścieżek rozwoju strategicznego technologii polegających na chemicznym osadzaniu powłok z fazy gazowej wskazuje jednoznaczne tendencje wzrostowe charakteryzujące chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej aktywowane laserowo (LCVD) E_{M3} (100%), plazmochemicznie

(PACVD/PECVD) D_{M3} (91%) i poprzez nanoszenie pojedynczych warstw atomowych (ALD) J_{M3} (75%). Dobre perspektywy ma także osadzanie powłok z użyciem prekursorów metaloorganicznych (MOCVD) G_{M3}, którego znaczenie wzrośnie (50%) lub utrzyma się na dotychczasowym poziomie (50%). Przewiduje się coraz mniejsze znaczenie, wśród metod chemicznego osadzania z fazy gazowej, najwyraźniej ulegającego degradacji, osadzania powłok realizowanego w złożu fluidalnym (Fluidized-Bed CVD) H_{M3} (50%). Znaczenie pozostałych technologii na tle analizowanego obszaru tematycznego powinno się utrzymać na dotychczasowym poziomie.

M4 Technologie cieplno-chemiczne

Analiza wyników badań heurystycznych, zwizualizowanych z użyciem macierzy kontekstowych, wskazuje, że wśród technologii cieplno-chemicznych najlepszą pozycję strategiczną mają technologie hybrydowe J^s_{M4} (9,0, 9,1), łączące w sobie przynajmniej dwie metody obróbki powierzchniowej, np. azotowanie i nanoszenie powłok PVD bądź nawęglanie wraz z nanoszeniem powłok CVD. Bardzo wysoko (9 punktów) zostały także ocenione technologie będące aktualnie w fazie wzrostowej: nawęglanie plazmowe i pod obniżonym ciśnieniem F^s_{M4} (8,7, 8,9) oraz azotowanie pod obniżonym ciśnieniem B^s_{M4} (8,3, 8,6). Eksperci przyznali także 9 punktów, znajdującemu się w fazie wczesnodojrzałej, azotowaniu plazmowemu A^s_{M4} (8,6, 8,6). Wszystkie te technologie J_{M4}, B_{M4}, F_{M4} i A_{M4} znalazły się w najkorzystniejszej szesnastce macierzy i zaleca się w odniesieniu do nich zastosowanie strategii dębu wiosną, która sprowadza się do rozwijania, umacniania i implementowania atrakcyjnych technologii o dużym potencjale w praktyce przemysłowej, a ich przyszły sukces jest zagwarantowany. Dość dobrą (7 punktów) pozycję strategiczną mają kompleksowe obróbki z udziałem azotowania D^s_{M4} (6,8, 4,4), np. siarko- i tlenoazotowanie, a umiarkowaną (6 punktów) nawęglanie gazowe i węgloazotowanie wysokotemperaturowe E^s_{M4} (7,0, 3,9), w odniesieniu do których należy zastosować strategię kosodrzewiny jesienią, polegającą na czerpaniu zysków z realizacji produkcji w przewidywalnym otoczeniu, z zastosowaniem stabilnej sprawdzonej technologii, którą należy unowocześniać i intensywnie promować w celu wzmocnienia jej atrakcyjności. W polu kosodrzewiny latem zostały umieszczone następujące mało atrakcyjne (ocenione średnio – 5 punktów) technologie cieplno-chemiczne: azotowanie gazowe C^s_{M4} (6,5, 6,3), aluminiowanie G^s_{M4} (6,0, 6,1) i pasywowanie I^s_{M4} (6,4, 6,0), w odniesieniu do których należy



Rysunek 109. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M4: Technologie cieplno-chemiczne*

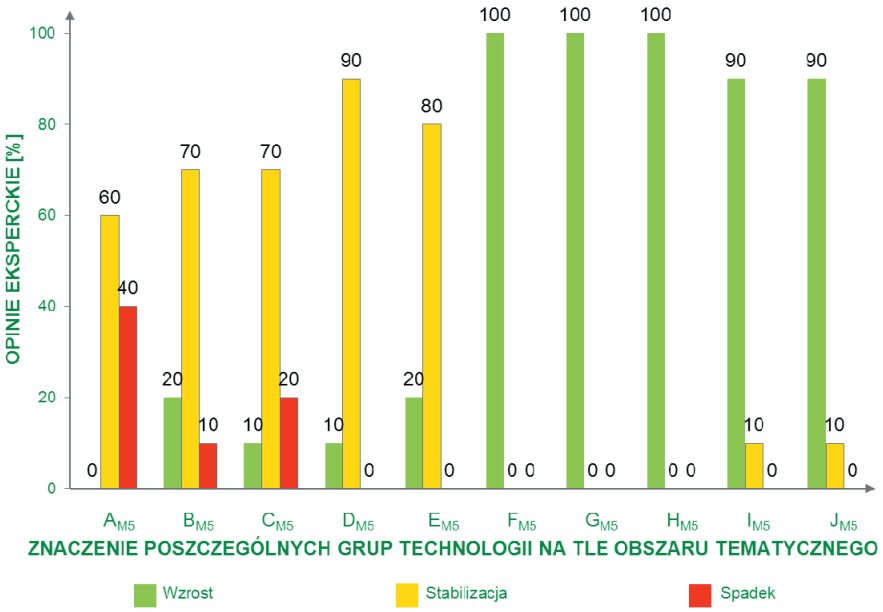
podjąć działania zmierzające do uatrakcyjnienia i unowocześnienia tradycyjnych rozwiązań technologicznych, a także, bazując na wynikach badań marketingowych, dążyć do uatrakryjnienia oferty produktowej. Najsłabszą pozycję strategiczną (3 punkty), wśród technologii cieplno-chemicznych poddanych badaniom heurystycznym, ma borowanie H^{s}_{M4} (1,3, 3,6), które znalazło się w polu osiki jesienią, a strategia odpowiednia dla technologii tam zakwalifikowanych należy do grupy źle rokujących. Przestarzałe, nieekologiczne borowanie H_{M4} skazane jest prawdopodobnie na postępującą degradację, wejście w fazę schyłkową i eliminację z rynku lub też utrzymanie się jedynie w odniesieniu do bardzo wąskich specjalistycznych zastosowań, na co wskazuje jego ścieżka rozwoju strategicznego.

Na podstawie zestawień statystycznych (rys. 109), opracowanych na bazie odpowiedzi ankietowanych ekspertów, określono trendy, którym będą podlegać w przyszłości poszczególne grupy technologii cieplno-chemicznych. Wyraźną tendencję wzrostową można zaobserwować w odniesieniu do technologii hybrydowych J_{M4} (100%), nawęglania plazmowego i węgloazotowania wysokotemperaturowego F_{M4} (90%), azotowania pod obniżonym ciśnieniem B_{M4} (81%) oraz azotowania plazmowego A_{M4} (72%). Przewidywany jest także wzrost znaczenia, na tle innych technologii cieplno-chemicznych, kompleksowych obróbek z udziałem azotowania D_{M4} (45%). Zgodnie w prezentowanymi wynikami badań spadnie (45%) znaczenie

nawęglania gazowego i węgloazotowania wysokotemperaturowego E_{M4}, a znaczenie pozostałych grup technologii w ciągu najbliższych 20 lat utrzyma się na dotychczasowym poziomie.

M5 Technologie polimerowych warstw wierzchnich

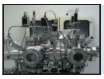
Analiza wyników badań heurystycznych, przeprowadzonych drogą elektronicznej ankietyzacji ekspertów, wykazała, że najlepszą pozycję strategiczną, ocenioną na 9 punktów, w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, posiadają następujące technologie polimerowych warstw wierzchnich: nanoszenie powłok z nanonapełniaczami G^s_{M5} (8,3, 8,6) i powłok gradientowych F^s_{M5} (8,6, 8,1), w odniesieniu do których zalecane jest zastosowanie strategii dębu wiosną, polegającej na dążeniu do sukcesu poprzez rozwijanie i umacnianie bardzo dobrze rokujących technologii znajdujących się w przyjaznym otoczeniu, niosącym wiele sposobności. Wysoką (8 punktów) pozycją w rankingu charakteryzują się również osadzanie elektroforetyczne D^s_{M5} (6,6, 8,7) i nanoszenie fluidyzacyjno-elektrostatyczne E^s_{M5} (6,6, 8,3), które umieszczono w polu kosodrzewiny wiosną, a zalecana dla nich strategia zakłada konieczność uatrakcyjniania, unowocześniania, komputeryzowania i automatyzowania tych dojrzałych technologii, a także ich intensywnego promowania w sprzyjającym otoczeniu. Strategię dębu latem, polegającą na wykorzystywaniu atrakcyjności i potencjału technologii w trudnych warunkach otoczenia, niosącego zarówno liczne trudności, jak i sposobności, a także dopasowaniu produktu do oczekiwań klienta, zaleca się stosować w przypadku bardzo obiecujących młodych technologii: nanoszenia powłok biokompatybilnych J^s_{M5} (8,5, 7,3) (faza embrionalna), a także nanoszenia powłok z pamięcią kształtu H^s_{M5} (8,6, 7,3) i samowykształcalnych na powierzchni polimerów I^s_{M5} (8,7, 6,9), które znajdują się aktualnie w prototypowej fazie cyklu życia. Aktualną pozycję strategiczną tych technologii, które będą zapewne intensywnie rozwijane w przyszłości, oceniono na 7 punktów, ze względu na towarzyszące im burzliwe otoczenie. Siedem punktów przyznano także metodzie malowania proszkowego C^s_{M5} (7,1, 4,5) usytuowanej w polu kosodrzewiny jesienią, w którym znalazł się również oceniony na 6 punktów natrysk hydrodynamiczny B^s_{M5} (5,7, 4,2). Strategia kosodrzewiny jesienią zaleca czerpanie zysków z realizacji produkcji w stabilnym przewidywalnym otoczeniu, z wykorzystaniem sprawdzonych, dobrze poznanych technologii, które należy unowocześniać i intensywnie promować w celu wzmocnienia ich ograniczonej



Rysunek 110. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M5: Technologie polimerowych warstw wierzchnich*

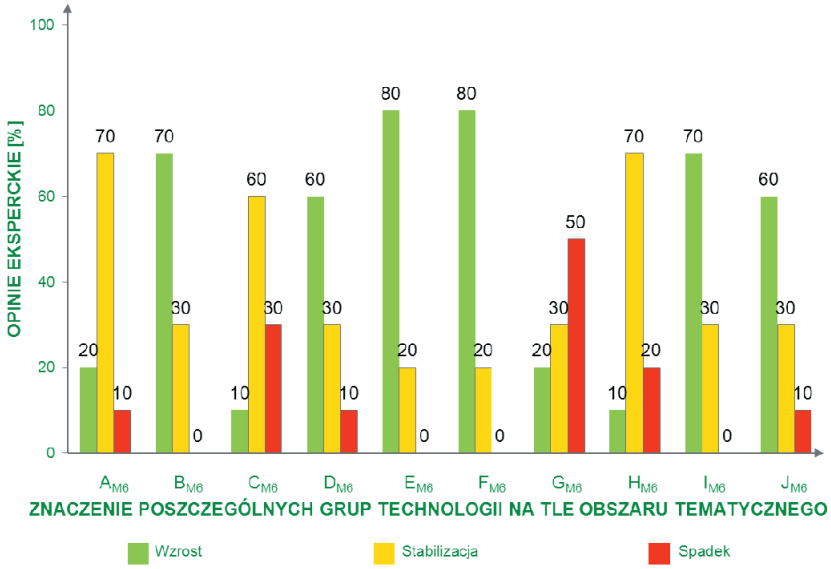
atrakcyjności. Najsłabsze perspektywy rozwojowe (4 punkty), spośród wszystkich poddanych badaniom technologii polimerowych warstw wierzchnich, mają tradycyjne techniki malarskie i nanoszenie zanurzeniowe A^{s}_{M5} (5,8, 1,2), w odniesieniu do którego należy zastosować strategię kosodrzewiny zimą, zasadzającą się na podjęciu walki z piętrzącymi się trudnościami płynącymi z otoczenia, w której orężem jest duży potencjał tradycyjnych, tanich technologii o prostym sposobie aplikacji.

Zestawienia statystyczne (rys. 110), sporządzone na podstawie wyników badań eksperckich, posłużyły do określenia ścieżek rozwoju strategicznego technologii polimerowych warstw wierzchnich. Tendencję wzrostową wykazują technologie nanoszenia następujących powłok: gradientowych F_{M5} (100%), z nanonapełniaczami G_{M5} (100%), z pamięcią kształtu H_{M5} (100%), samowykształcalnych I_{M5} (90%) i biokompatybilnych J_{M5} (90%). Znaczenie pozostałych technologii, analizowanych w ramach tego obszaru tematycznego, w ciągu najbliższych 20 lat będzie utrzymywać się na dotychczasowym poziomie, przy czym najsłabszą pozycję strategiczną w przyszłości będą miały tradycyjne techniki malarskie i nanoszenie zanurzeniowe A_{M5} (60%).



M6 Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich

Analizę heurystyczną, z wykorzystaniem danych źródłowych pozyskanych w drodze elektronicznej ankietyzacji ekspertów metodą e-Delphix, przeprowadzono także w odniesieniu do technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów sklasyfikowanych jako technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich, spośród których wybitnie wysoko (10 punktów) oceniono pozycję strategiczną fizycznego osadzania z fazy gazowej nanometrycznych warstw powierzchniowych z użyciem wiązki jonowej (IBAD) E^s_{M6} (9,4, 9,1) i z użyciem wiązki elektronów (EB-PVD) D^s_{M6} (9,2, 8,6). W odniesieniu do tych wyjątkowo obiecujących technologii, które otrzymały maksymalną możliwą ocenę, należy zastosować strategię dębu wiosną, sprowadzającą się do ich rozwijania, umacniania i implementowania na szeroka skalę przemysłową, a ich przyszły sukces jest stuprocentowy. Bardzo wysoko (9 punktów) została oceniona obróbka powierzchniowa nanomateriałów J^s_{M6} (4,4, 9,0), a także osadzanie pojedynczych warstw atomowych (ALD) F^s_{M6} (4,9, 8,8). Pozycję strategiczną nakładania na warstwach wierzchnich powłok zawierających nanomateriały I^s_{M6} (4,7, 8,4) i elektronolitografii (EBL) B^s_{M6} (4,3, 8,0) oceniono natomiast wysoko (8 punktów). Grupy technologii J_{M6}, F_{M6}, I_{M6} znajdujące się w prototypowej fazie rozwoju, jak również wczesnodojrzała grupa B_{M6}, wymagają zastosowania strategii cyprysa wiosną, która wskazuje konieczność prowadzenia dalszych prac naukowo-badawczych w celu doskonalenia i wzmacniania potencjału tych obiecujących młodych technologii, należy ponadto wykorzystywać liczne sposobności pojawiające się w bliższym i dalszym otoczeniu. Strategia dębu jesienią właściwa dla solidnych i atrakcyjnych technologii znajdujących się w neutralnym otoczeniu, zapewniająca przyszły sukces poprzez poszukiwanie nowych rynków, nowych grup klientów i nowych obszarów zastosowań, powinna być zastosowana dla chemicznego osadzania nanometrycznych warstw wierzchnich z fazy gazowej (CVD) C^s_{M6} (9,1, 5,1), które aktualnie weszło w późnodojrzałą fazę cyklu życia. Dość wysoką pozycję strategiczną (7 punktów) posiada reaktywne trawienie jonowe (RIE) A^s_{M6} (6,9, 4,3), a umiarkowaną (6 punktów) otrzymywanie nanometrycznych warstw powierzchniowych metodą zol-żel H^s_{M6} (6,9, 3,9), które znalazły się w polu kosodrzewiny jesienią, zatem producentom stosującym te technologie zaleca się bieżące czerpanie zysków, połączone z procesami uatrakcyjniania i promowania sprawdzonych dobrych technologii znajdujących się w neutralnym otoczeniu. Najsłabszą pozycję, wśród



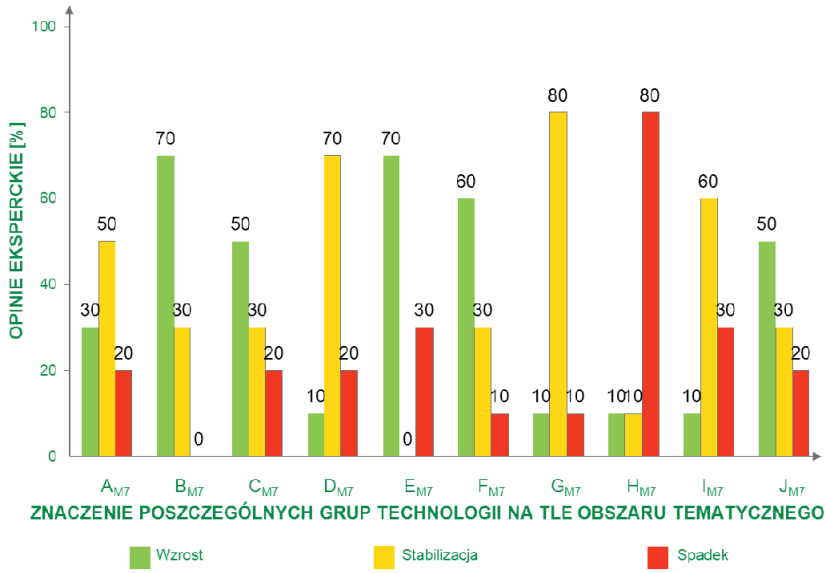
Rysunek 111. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M6: Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich*

poddanych analizie technologii nanostrukturalnych warstw wierzchnich, zajęło ich elektroosadzanie G^{s}_{M6} (6,4, 2,6) o średnich perspektywach rozwojowych (5 punktów). Przedsiębiorstwom stosującym tę najmniej obiecującą późnodojrzałą grupę technologii przyjdzie zatem w przyszłości opierać się licznym trudnościom płynącym z otoczenia, a antidotum na te problemy mogą stać się działania zmierzające do wzmocnienia atrakcyjności tej grupy technologii.

Zestawienia statyczne (rys. 111), sporządzone na podstawie wyników badań ankietowych, wykorzystano do określenia prognozowanych trendów rozwojowych poszczególnych grup technologii nanostrukturalnych warstw wierzchnich. Wyniki analiz wskazują, że w ciągu najbliższych 20 lat należy się spodziewać wzrostu znaczenia fizycznego osadzania z fazy gazowej nanometrycznych warstw powierzchniowych z użyciem wiązki elektronów (EB-PVD) E_{M6} (80%) i z użyciem wiązki jonowej (IBAD) D_{M6} (60%), osadzania pojedynczych warstw atomowych (ALD) F_{M6} (80%), elektronolitografii (EBL) B_{M6} (70%), nakładania na warstwach wierzchnich powłok zawierających nanomateriały I_{M6} (70%), a także obróbki powierzchniowej nanomateriałów J_{M6} (60%). Spadek znaczenia będzie towarzyszył elektroosadzaniu nanometrycznych warstw powierzchniowych G_{M6} (50%), a znaczenie pozostałych technologii, na tle innych analizowanych, pozostanie najpewniej bez zmian.

M7 Inne technologie inżynierii powierzchni

Wyniki badań heurystycznych wskazują, że najlepsze perspektywy rozwoju strategicznego spośród technologii, które zakwalifikowano jako inne technologie inżynierii powierzchni, określone jako wybitnie wysokie (10 punktów), ma pokrywanie powłokami natryskiwanymi cieplnie B^s_{M7} (9,1, 8,7), Technologie te umieszczono w najlepszej szesnastce macierzy strategii dla technologii, stąd należy się spodziewać ich dalszego rozwoju i licznych aplikacji w praktyce przemysłowej, który to postęp powinien być wspomagany rozwijaniem i umacnianiem tych sprawdzonych rozwiązań w sprzyjających warunkach otoczenia. Strategia cyprysa wiosną, polegająca na umacnianiu potencjału atrakcyjnej technologii poprzez dalsze prace naukowo-badawcze zmierzające do jej doskonalenia, z równoczesnym wykorzystaniem sposobności płynących z otoczenia, powinna zostać zastosowana w przypadku metod pokrywania ceramiką/cermetalami E^s_{M7} (5,0, 8,9), których pozycję strategiczną oceniono bardzo wysoko (9 punktów), i metod wytwarzania powierzchniowych warstw odlewniczych i infiltracyjnych F^s_{M7} (4,4, 8,5) ocenionych wysoko (8 punktów). Dobrą pozycję strategiczną (8 punktów) ma także pokrywanie powłokami galwanicznymi A^s_{M7} (7,0, 8,3), które znalazło się w polu kosodrzewiny wiosną, co wymaga podjęcia działań służących uatrakcyjnianiu, unowocześnianiu, automatyzowaniu i komputeryzowaniu tej dojrzałej technologii, którym to procesom sprzyja przyjazne otoczenie, jak również pokrywanie powłokami formowanymi niskociśnieniowo z proszków i spiekanie C^s_{M7} (8,9, 5,0), w odniesieniu do którego zaleca się zastosowanie strategii dębu jesienią. Strategia ta, właściwa dla technologii atrakcyjnych z dużym potencjałem znajdujących się w neutralnym otoczeniu, należy do dobrze rokujących i wymaga podjęcia działań służących rozszerzeniu rynków, grup klientów i obszarów zastosowań. Strategia kosodrzewiny jesienią, adekwatna do późnodojrzałych technologii: napawania powłok G^s_{M7} (6,8, 4,6) o dość wysokich (7 punktów) perspektywach rozwojowych oraz pokrywania powłokami metalizowanymi zanurzeniowo D^s_{M7} (6,7, 4,0) i platerowania I^s_{M7} (6,3, 3,9) o perspektywach umiarkowanych (6 punktów), zaleca producentom czerpanie bieżących zysków (*dojenie krowy*) przy równoczesnym umacnianiu atrakcyjności technologii, w celu wydłużenia okresu *prosperity* na kolejne długie lata. Pozycja strategiczna utwardzania detonacyjnego J^s_{M7} (3,5, 6,8) jest średnia (5 punktów), a zalecana dla niego strategia cyprysa latem zakłada konieczność wzmacniania potencjału tej atrakcyjnej



Rysunek 112. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M7: Inne technologie inżynierii powierzchni*

eksperymentalnej grupy technologii, znajdującej się w burzliwym otoczeniu. Konieczne jest w tym przypadku wykonanie analizy specyficznych i systematycznych czynników ryzyka płynących z otoczenia i, w zależności od jej wyniku, podjęcie stosownych działań obejmujących intensywne wzmacnianie potencjału technologii w toku prac naukowo-badawczych, służących jej udoskonaleniu, lub przeciwnie rezygnacja ze stosowania tej grupy technologii, gdy trudności płynące z otoczenia są nie do przezwyciężenia, zatem może mieć miejsce zarówno optymistyczny, jak i pesymistyczny niespodziankowy scenariusz przyszłych wydarzeń. Tradycyjne metody mechanicznej obróbki powierzchniowej obejmującej nagniatanie i kulkowanie H^s_{M7} (5,7, 1,6) oceniono, w analizowanym obszarze tematycznym, najniżej (4 punkty). Uznano je za schyłkowe, stąd znalazły się w polu kosodrzewiny zimą, któremu odpowiada źle rokująca strategia, zakładająca, że należy opierać się piętrzącym się trudnościom płynącym z otoczenia, starając się przy tym maksymalnie wykorzystać potencjał dobrze poznanej grupy technologii i podejmować, w miarę możliwości, aktywność służącą wzmocnieniu jej atrakcyjności.

Zestawienia statystyczne (rys. 112), wygenerowane na podstawie wyników badań heurystycznych, posłużyły do określenia przyszłych trendów rozwojowych technologii zakwalifikowanych do obszaru tematycznego: Inne technologie inżynierii powierzchni. W ciągu najbliższych

20 lat tendencją wzrostową będą charakteryzować się następujące grupy technologii krytycznych: pokrywanie powłokami natryskiwanymi cieplnie B_{M7} (70%), pokrywanie ceramiką/ cermetalami E_{M7} (70%), wytwarzanie powierzchniowych warstw odlewniczych i infiltracyjnych F_{M7} (90%), pokrywanie powłokami formowanymi niskociśnieniowo z proszków i spiekanie C_{M7} (50%) oraz utwardzanie detonacyjne B_{M7} (50%). Wyniki wskazują jednoznacznie na spodziewany spadek znaczenia nagniatania i kulkowania H_{M7} (80%), natomiast pozostałym technologiom z tego obszaru będzie towarzyszył trend ustabilizowany na dotychczasowym poziomie.

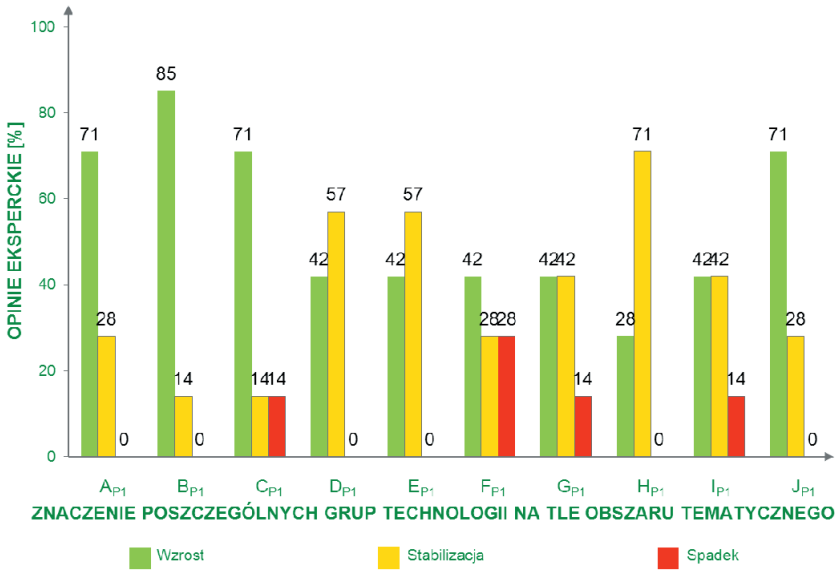
6.2. Pozycja strategiczna i trendy rozwojowe technologii krytycznych sklasyfikowanych zgodnie z podejściem konsumenckim

Inżynieria powierzchni biomateriałów P1

Analiza perspektyw strategicznych inżynierii powierzchni biomateriałów, wykonana z użyciem nowo opracowanej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju, wykazała, że w tym obszarze tematycznym, uznanym przez ekspertów za jeden z najbardziej perspektywicznych spośród wszystkich objętych badaniem, znajduje się aż sześć grup technologii: H_{P1}, D_{P1}, A_{P1}, J_{P1}, B_{P1}, C_{P1} charakteryzujących się bardzo wysoką pozycją strategiczną (9 punktów). Zalecane dla nich strategie są jednak zróżnicowane. W odniesieniu do metod fizycznego i chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej (PVD/CVD) H^s_{P1} (9,2, 8,4) oraz metody zol-żel D^s_{P1} (8,9, 8,2) zasadne jest zastosowanie strategii dębu wiosną, polegającej na rozwijaniu, umacnianiu i szerokim stosowaniu w warunkach przemysłowych tych wczesnodojrzałych technologii znajdujących się w przyjaznym otoczeniu, co zagwarantuje ich sukces komercyjny. Strategię kosodrzewiny wiosną zaleca się zastosować w przypadku metod immobilizacji A^s_{P1} (6,8, 9,1) oraz nanoszenia warstw diamentowych i diamentopodobnych powłok węglowych (DLC) J^s_{P1} (7,2, 8,7), a planowe działania strategiczne powinny dotyczyć uatrakcyjniania i unowocześniania stosowanych rozwiązań technologicznych, automatyzacji i komputeryzacji parku maszynowego oraz promocji, co ma służyć wzmocnieniu tych dojrzałych technologii w sprzyjającym otoczeniu. W przypadku wzrostowej technologii nanoszenia monowarstw samoorganizujących się B^s_{P1} (4,5, 9,4) i, znajdującego się aktualnie we wczesnodojrzałej fazie cyklu życia, wzornikowania C^s_{P1} (5,0, 8,7) – mogącego

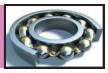
zachodzić w procesach punktowego naświetlania laserem, nastrzykiwania powierzchniowo lub bombardowania wiązką jonów – rekomendowane jest natomiast zastosowanie strategii cyprysa wiosną, polegającej na wykorzystywaniu sposobności płynących z otoczenia, przy równoczesnym wzmacnianiu potencjału technologii. Strategia ta powinna być również zastosowana w odniesieniu do, umożliwiających wytworzenie materiałów gradientowych powierzchniowo, metod infiltracji E_{P1}^{s} (4,2, 8,0), które oceniono wysoko (8 punktów). Pozycja strategiczna ablacji laserowej I_{P1}^{s} (4,6, 4,4) w obszarze inżynierii powierzchni biomateriałów jest dość wysoka (7 punktów), a zalecana dla niej strategia cyprysa jesienią sprowadza się do maksymalnego wykorzystania stabilnego, przewidywalnego otoczenia w celu realizacji produkcji, ze szczególnym zwróceniem uwagi na wzmacnianie potencjału tej atrakcyjnej technologii poprzez kontynuację prac badawczo-rozwojowych służących jej doskonaleniu. Możliwości zastosowania tej metody – wykorzystywanej z powodzeniem w procesach obróbczych innych, bardziej konwencjonalnych materiałów – do obróbki powierzchniowej poszczególnych biomateriałów nie zostały jeszcze do końca poznane. Dalszych badań wymaga, przykładowo, zmiana głębokości wnikania promieniowania laserowego w materiał polimerowy, zachodząca pod wpływem zmian chemicznych i fizycznych warstwy wierzchniej materiału, wywołanych kolejnymi impulsami lasera. Strategia cyprysa jesienią powinna być także zastosowana w przypadku, znajdujących się we wczesnodojrzałej fazie cyklu życia, metod konsolidacji G_{P1}^{s} (3,6, 4,4), których pozycja strategiczna jest umiarkowana (6 punktów). Taką samą ocenę przyznano, umożliwiającej wytwarzanie materiałów gradientowych, dojrzałej technologii osadzania elektroforetycznego i sedymentacyjnego F_{P1}^{s} (6,6, 3,8), lecz dla niej właściwa jest strategia kosodrzewiny jesienią. Producenci stosujący tę technologię powinni z jednej strony *zbierać żniwa*, korzystając z tego, że otoczenie jest neutralne i nieprzynoszące istotnych trudności, a z drugiej strony zalecane jest unowocześnianie i promowanie tej grupy technologii w celu utrzymania przewagi konkurencyjnej na rynku.

Zaprezentowane na rysunku 113 zestawienia statystyczne posłużyły do określenia trendów rozwojowych poszczególnych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni biomateriałów na tle analizowanego obszaru tematycznego. Stwierdzono, że najszersze perspektywy rozwojowe i szanse na umocnienie swojej pozycji w przyszłości mają następujące grupy technologii służących obróbce powierzchniowej biomateriałów: nanoszenie monowarstw samoorganizujących się B_{P1} (85%), metody immobilizacji A_{P1} (71%), wzornikowanie C_{P1} (71%) oraz nanoszenie warstw diamentowych i diamentopodobnych powłok węglowych

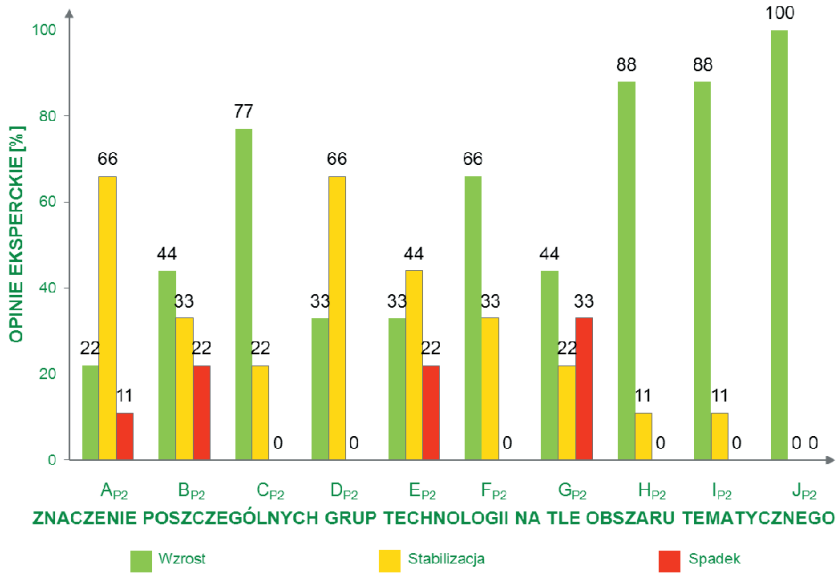


Rysunek 113. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P1: Inżynieria powierzchni biomateriałów*

(DLC) J_{P1} (71%). Najbardziej podzielone zdania eksperci mieli w przypadku technologii osadzania elektroforetycznego i sedymentacyjnego F_{P1}. Mimo iż przeważyły opinie prognozujące wzrost znaczenia tej grupy technologii (42%), pojawiły się też stosunkowo liczne opinie przewidujące spadek jej znaczenia (28%) bądź stabilizację na dotychczasowym poziomie (28%). Do zalet tej grupy metod należy zaliczyć dobrą biozgodność i odporność antykorozyjną powłok oraz możliwość nanoszenia ich na elementy o bardzo złożonej geometrii, natomiast zasadniczą ich wadą jest złożoność kontroli warunków procesu technologicznego, którymi są zarówno własności proszków (gęstość, kształt ziaren i ich rozmiar), jak i cieczy (gęstość, lepkość). Podobnie zróżnicowane oceny dotyczyły metod konsolidacji G_{P1} (wzrost: 42%; stabilizacja: 42%; spadek: 14%). Zastosowanie tych metod pozwala na spiekanie pod ciśnieniem zewnętrznym ułatwiającym przegrupowanie ziaren, aktywującym zjawiska płynięcia dyfuzyjnego oraz eliminującym występowanie porów w końcowym etapie spiekania, lecz obserwowane są także istotne ograniczenia tej metody w postaci trudności w zastosowaniu wysokiej temperatury, ze względu na metastabilny charakter nanoproszków i konieczności dopasowania kształtu elementu do formy. Przyszłe znaczenie pozostałych technologii krytycznych inżynierii powierzchni biomateriałów, objętych badaniem, zdaniem ankietowanych ekspertów, najprawdopodobniej utrzyma się na dotychczasowym poziomie.



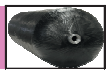
Analiza wyników badań heurystycznych, przeprowadzonych drogą elektronicznej ankietyzacji ekspertów, wykazała, że spośród poddanych badaniom technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych najlepszą pozycję strategiczną, ocenioną maksymalnie – na 10 punktów, mają metody fizycznego i chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej (PVD/CVD) J^s_{P2} (9,3, 9,5), w odniesieniu do których zalecane jest zastosowanie strategii dębu wiosną, polegającej na dążeniu do zagwarantowanego sukcesu, poprzez rozwijanie i umacnianie bardzo dobrze rokujących technologii znajdujących się w przyjaznym otoczeniu. Bardzo wysoką pozycję strategiczną (9 punktów) mają technologie cieplne i cieplno-chemiczne C^s_{P2} (7,3, 8,7), które są szeroko stosowane w różnych odmianach i wariantach do obróbki powierzchniowej materiałów metalowych. Grupa technologii C_{P2} wymaga zastosowania strategii kosodrzewiny wiosną, zalecającej uatrakcyjnianie i unowocześnianie późnodojrzałych technologii, komputeryzację i automatyzację parku maszynowego, a także prowadzenie działań promocyjnych umacniających ich pozycję konkurencyjną na rynku, na którym przeważają sposobności. Podobnie bardzo wysoko (9 punktów) oceniono pozycje strategiczne: implantacji jonów H^s_{P2} (4,6, 9,2), znajdującej się w prototypowej fazie życia, i wzrostowej technologii pokrywania ceramiką i cermetalami I^s_{P2} (3,9, 9,2). W odniesieniu do tych grup technologii, jak również do ocenionej wysoko (8 punktów) wczesnodojrzałej technologii natapiania/stopowania laserowego F^s_{P2} (4,7, 8,3), zalecane jest zastosowanie strategii cyprysa wiosną, zgodnie z którą należy wykorzystywać sposobności płynące z otoczenia, przy równoczesnym uatrakcyjnianiu i wzmacnianiu potencjału technologii, czemu mają służyć prace badawczo-rozwojowe. Dość wysoką (7 punktów) pozycję strategiczną ma, znajdujące się w późnodojrzałej fazie cyklu życia, natryskiwanie cieplne D^s_{P2} (6,5, 4,7), które umieszczono w polu kosodrzewiny jesienią, podobnie jak ocenione na 6 punktów technologie bazowe: malowanie A^s_{P2} (6,9, 4,1) i technologie galwaniczne B^s_{P2} (6,6, 4,2). Zalecana dla grup technologii D_{P2}, A_{P2} i B_{P2} strategia zakłada, że planowe działania, w długiej perspektywie czasowej, powinny dotyczyć nie tylko czerpania bieżących korzyści płynących ze stosowania na szeroką skalę sprawdzonych, efektywnych technologii, lecz także szukania sposobów wydłużenia okresu *zbierania żniw*, czemu mają służyć modernizacja, automatyzacja i promocja. Najsłabsze pozycje strategiczne, spośród badanych technologii krytycznych



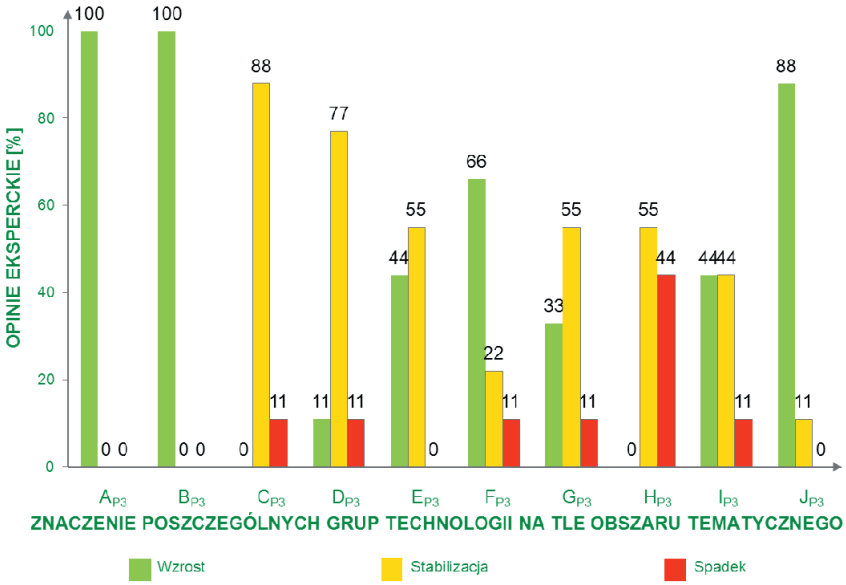
Rysunek 114. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P2: Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych*

inżynierii powierzchni materiałów metalowych, zajmują natapianie/stopowanie elektronowe G^s_{P2} (4,0, 6,2) i utwardzanie detonacyjne E^s_{P2} (3,8, 6,9).

Na podstawie danych źródłowych, pozyskanych drogą elektronicznej ankietyzacji ekspertów, sporządzono zestawienia statystyczne (rys. 114), które posłużyły do wykonania analizy przyszłych ścieżek rozwoju strategicznego grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych. W odniesieniu do większości analizowanych grup technologii spodziewany jest optymistyczny wariant wydarzeń, wskazujący na ich przyszły rozwój w długoterminowym horyzoncie czasowym, co w pełni odpowiada rzeczywistej sytuacji gospodarczej, ponieważ technologie cieplne i cieplno-chemiczne należą do podstawowych metod obróbki materiałów konstrukcyjnych metalowych, stosowanych powszechnie na skalą przemysłową. Najkorzystniejsza prognoza dotyczy fizycznego i chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej (PVD/CVD) J_{P2} (100%), implantacji jonów H_{P2} (88%) oraz technologii pokrywania ceramiką i cermetalami I_{P2} (88%). Zgodnie z wynikami badań trend ustabilizowany będzie udziałem malowania A_{P2} (66%) i natryskiwania cieplnego D_{P2} (44%), a także utwardzania detonacyjnego o stosunkowo wąskim zakresie praktycznych zastosowań E_{P2} (44%).



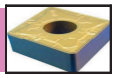
W ramach analizy heurystycznej, przeprowadzonej z użyciem nowo opracowanej metodologii, sporządzono macierze kontekstowe wizualizujące pozycje strategiczne poszczególnych grup technologii krytycznych, które zakwalifikowano do badań w ramach rozpatrywanego obszaru tematycznego: Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych. Najwyższą możliwą ocenę (10 punktów) otrzymały metody chemicznego B^s_{P3} (9,2, 9,3) i fizycznego A^s_{P3} (9,1, 9,1) nanoszenia powłok z fazy gazowej, w odniesieniu do których zasadne jest zastosowanie strategii dębu wiosną, prowadzące do sukcesu rynkowego w sprzyjających warunkach otoczenia. Prototypowa grupa technologii polegająca na osadzaniu laserem impulsowym lub przez promieniowanie laserowo-plazmowych źródeł EUV J^s_{P3} (4,9, 9,1) została oceniona bardzo wysoko (9 punktów), a zalecana dla niej strategia cyprysa wiosną zakłada wykorzystanie sprzyjających warunków otoczenia i kontynuację badań nad tymi technologiami. Na uwagę zasługują zwłaszcza nowatorskie – w skali światowej – badania mikro- i nanoobróbki polimerów organicznych promieniowaniem EUV wytwarzanym z zastosowaniem źródeł laserowo-plazmowych. Do technologii o wysokiej pozycji strategicznej (8 punktów) należą metoda zol-żel F^s_{P3} (6,7, 8,6) i implantacja jonów E^s_{P3} (6,5, 8,0), które umieszczono w szesnastce macierzy strategii dla technologii odpowiadającej kosodrzewinie wiosną, co oznacza, że należy umacniać ich atrakcyjność przy równoczesnym wykorzystaniu licznych sposobności płynących z otoczenia, jak również wytwarzanie powłok w procesach galwanicznych C^s_{P3} (8,6, 5,1), w odniesieniu do których zaleca się zastosowanie strategii dębu jesienią, polegającej na czerpaniu bieżących korzyści przy równoczesnym poszukiwaniu nowych zakresów zastosowań technologii w neutralnych warunkach otoczenia. W polu dębu jesienią znalazła się również oceniona dość wysoko (7 punktów) metalizacja próżniowa D^s_{P3} (8,5, 4,7). Realizacja procesów obróbki powierzchniowej z użyciem dojrzałych technologii osadzania elektroforetycznego I^s_{P3} (6,4, 4,2) i natryskiwania cieplnego G^s_{P3} (6,9, 4,0), mających umiarkowane perspektywy rozwojowe, wymaga zastosowania strategii kosodrzewiny jesienią, zgodnie z którą plany strategiczne, dotyczące technologii aktualnie przynoszących duże zyski, powinny obejmować koncepcję unowocześniania i promowania technologii, w celu maksymalnego wydłużenia okresu *zbierania żniw*. Spośród technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych najsłabszą pozycję



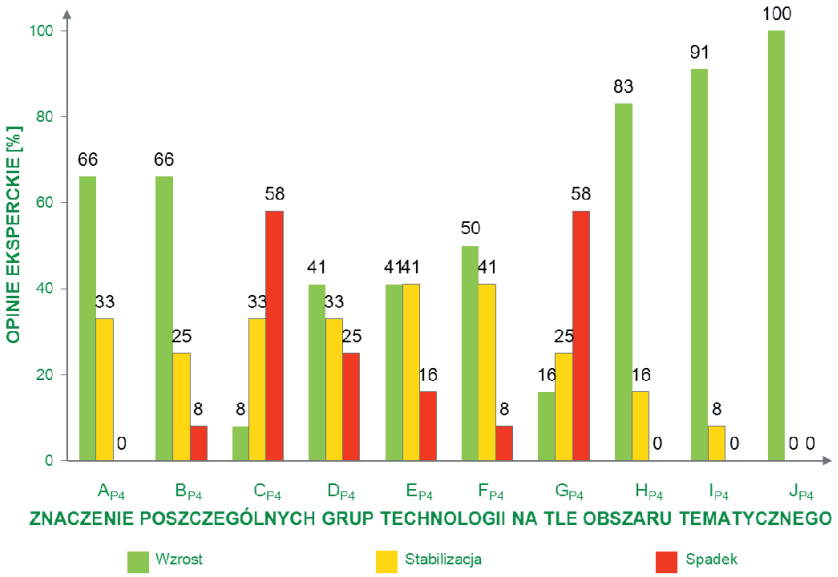
Rysunek 115. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P3: Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych*

strategiczną ma tradycyjne malowanie H^{s}_{P3} (5,7, 2,1), które zostało umieszczone w szesnastce macierzy strategii dla technologii odpowiadającej kosodrzewinie zimą, z czym wiąże się konieczność opierania się trudnościom płynącym z otoczenia, związanym z silną konkurencją technologii daleko bardziej nowoczesnych i umożliwiających uzyskanie nieporównywalnie lepszych własności obrabianych produktów.

Zestawione statystycznie pierwotne dane źródłowe (rys. 115), pozyskane w procesie ankietyzacji ekspertów metodą e-Delphix, posłużyły do przeprowadzenia analizy ścieżek rozwoju strategicznego technologii krytycznych, wytypowanych do analizy w ramach obszaru: Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych. Zgodnie z prezentowanymi wynikami badań heurystycznych tendencja wzrostowa będzie obserwowana w odniesieniu do metod fizycznego A_{P3} (100%) i chemicznego B_{P3} (100%) nanoszenia powłok z fazy gazowej, osadzania laserem impulsowym lub przez promieniowanie laserowo-plazmowych źródeł EUV J_{P3} (88%) oraz metody zol-żel F_{P3} (66%). Przyszłe znaczenie osadzania elektroforetycznego I_{P3} na tle analizowanego obszaru będzie wzrastać (44%) lub utrzyma się na dotychczasowym poziomie (44%). Ustabilizowany trend będzie udziałem pozostałych poddanych badaniom technologii inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych.



Analiza wykonana na podstawie wyników badań heurystycznych, przedstawionych graficznie z użyciem macierzy kontekstowych, umożliwiła określenie pozycji strategicznej technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych. Najwyższą możliwą ocenę (10 punktów) przyznano metodzie fizycznego nanoszenia powłok z fazy gazowej (PVD) A^s_{P4} (9,5, 8,4), która znalazła się w najbardziej obiecującym polu macierzy strategii dla technologii – dębu wiosną, podobnie jak chemiczne nanoszenie powłok z fazy gazowej (CVD) B^s_{P4} (9,1, 8,1) ocenione na 9 punktów, w związku z czym w odniesieniu do obu tych grup technologii zaleca się szerokie aplikacje w praktyce przemysłowej z wykorzystaniem sposobności płynących z otoczenia. Bardzo wysoko (9 punktów) oceniono również pozycje strategiczne niezwykle obiecujących prototypowych metod obróbki, tj. ablacji laserowej (PLD) J^s_{P4} (4,4, 9,0), technologii hybrydowych I^s_{P4} (4,8, 9,0) i technologii nanoszenia powłok gradientowych H^s_{P4} (4,7, 8,7), których dalszy rozwój wymaga kontynuacji prac badawczo-rozwojowych i wykorzystania sposobności płynących z otoczenia, czyli zastosowania strategii cyprysa wiosną. Dość wysoko (7 punktów) oceniono, znajdujące się w dojrzałej fazie cyklu życia, azotowanie i kompleksowe obróbki z jego udziałem E^s_{P4} (6,8, 4,3), dla których zaleca się postępowanie zgodne ze strategią kosodrzewiny jesienią, polegające na *zbieraniu żniw* i podjęciu działań unowocześniających i promocyjnych w celu maksymalnego wydłużenia czasu *prosperity*. Podobnie 7 punktów przyznano stopowaniu/wtapianiu laserowemu F^s_{P4} (4,2, 4,7), które umiejscowiono w polu cyprysa jesienią, co oznacza, że zalecane jest umacnianie potencjału tej prototypowej, obiecującej technologii, czemu sprzyja neutralne otoczenie. Perspektywy rozwojowe metod metalurgii proszków, zapewniające zmianę składu chemicznego i/lub fazowego w warstwie wierzchniej D^s_{P4} (3,8, 6,4), ze względu na trudności płynące z otoczenia w postaci szerokich alternatywnych poszukiwań efektywnych metod wytwarzania materiałów gradientowych, a także z uwagi na konieczność dopracowania tej obiecującej grupy technologii, oceniono jako średnie (5 punktów) i naniesiono na odpowiadające opisanej sytuacji pole macierzy – cyprysa latem. Średnia (5 punktów) jest również pozycja strategiczna dojrzałej technologii natryskiwania C^s_{P4} (6,9, 2,2), która, znajdując się w polu kosodrzewiny zimą, będzie zmagać się z licznymi trudnościami płynącymi z otoczenia, związanymi z silną konkurencją ze strony

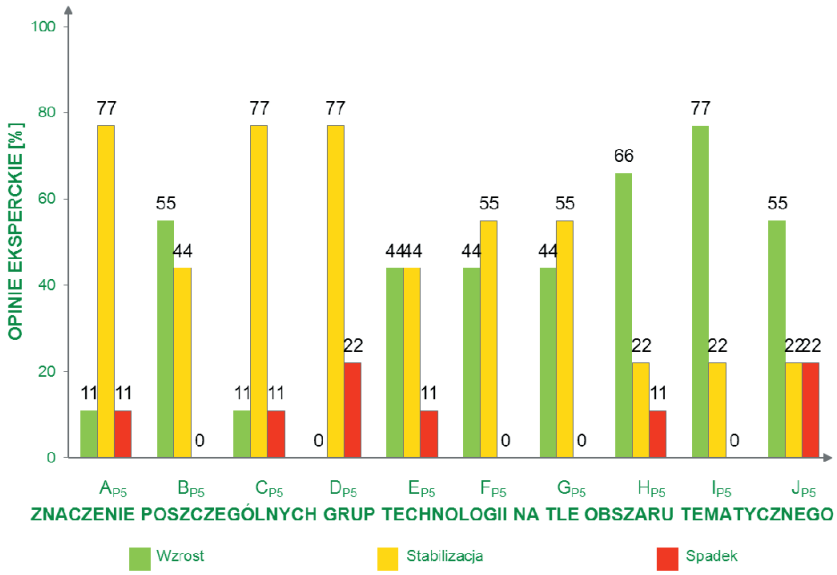


Rysunek 116. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P4: Inżynieria powierzchni materiałów narzędziowych*

bardziej nowoczesnych i efektywnych technologii alternatywnych. Podobne okoliczności będą towarzyszyć, mającej dość niskie (4 punkty) perspektywy rozwoju strategicznego, dojrzałej technologii napawania G^{s}_{P4} (6,4, 2,1), którą umieszczono w tym samym polu macierzy strategii dla technologii.

Wyniki badań eksperckich, które zestawiono statystycznie (rys. 116), posłużyły do utworzenia ścieżek rozwoju strategicznego technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych. Przyszłe znaczenie większości analizowanych w ramach tego obszaru tematycznego grup technologii będzie rosnąć, co odpowiada bardzo dobrej pozycji całego obszaru na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem. Najszybszy postęp, zgodnie z opracowanymi prognozami, towarzyszyć będzie ablacji laserowej (PLD) J_{P4} (100%), technologiom hybrydowym I_{P4} (91%) i metodom nanoszenia powłok gradientowych H_{P4} (83%), znajdującym się aktualnie w prototypowej fazie życia. Zauważalnie zwiększać się będzie również przewaga konkurencyjna metod fizycznego A_{P4} (66%) i chemicznego B_{P4} (66%) nanoszenia powłok z fazy gazowej. Równocześnie obserwowana będzie powolna degradacja rozwiązań najbardziej tradycyjnych – natryskiwania C_{P4} (58%) i napawania G_{P4} (58%).

Wykorzystując pierwotne dane źródłowe, zebrane w ramach wykonanych badań e-foresightowych, przeprowadzono analizę pozycji strategicznych poszczególnych grup technologii krytycznych zakwalifikowanych do badań heurystycznych w ramach obszaru tematycznego: Inżynieria powierzchni stali dla przemysłu motoryzacyjnego. Najwyższą pozycję strategiczną (9 punktów), spośród tych technologii, posiadają: cynkowanie ogniowe z dodatkowym wyżarzaniem (powłoka Zn-Fe) B^s_{P5} (8,1, 9,1), którego przyszły sukces jest gwarantowany, ponieważ znalazło się w najbardziej obiecującej ćwiartce macierzy strategii dla technologii – dębu wiosną, a także nanoszenie powłok polimerowych proszkowych I^s_{P5} (4,6, 9,0), umieszczone w polu cyprysa wiosną, zatem konieczne jest umacnianie potencjału tej wczesnodojrzałej technologii w sprzyjających warunkach otoczenia. Strategia cyprysa wiosną jest także zalecana do implementacji w przypadku nakładania powłok z folii polimerowych J^s_{P5} (3,9, 8,2), znajdującego się aktualnie w fazie wzrostowej i natryskiwania cieplnego F^s_{P5} (4,6, 7,9), które weszło we wczesnodojrzałą fazę cyklu życia. Pozycja strategiczna obu tych technologii J_{P5} i F_{P5} jest wysoka (8 punktów), podobnie jak malowania i lakierowania ciekłymi materiałami polimerowymi H^s_{P5} (6,8, 8,5), które jako technologia dojrzała odpowiada kosodrzewinie, a sprzyjające warunki otoczenia powodują, że zasadne jest zastosowanie w odniesieniu do niego strategii kosodrzewiny wiosną, zgodnie z którą konieczne jest podjęcie działań zmierzających do poprawy jego atrakcyjności poprzez modernizację, automatyzację i promocję. Dość dobra (7 punktów) pozycja strategiczna cynkowania ogniowego (w czystym Zn i stopach Zn-Al) A^s_{P5} (6,8, 4,6) i neutralne oddziaływanie otoczenia sprawia, że właściwe jest w tym przypadku zastosowanie strategii kosodrzewiny jesienią, zakładającej maksymalne wykorzystanie bieżącej dobrej koniunktury i poczynienie planów strategicznych mających zapewnić jak najdłuższy czas jej trwania. Strategia kosodrzewiny jesienią powinna być również zastosowana w odniesieniu do, ocenionych na 6 punktów, następujących metod powszechnie stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym: aluminiowania ogniowego (w czystym Al i stopach Al-Si) C^s_{P5} (6,6, 4,3), technologii galwanicznych D^s_{P5} (4,6, 3,5) i nanoszenia powłok podkładowych polimerowych G^s_{P5} (6,4, 4,1). Umiarkowanie (6 punktów) oceniono także pozycję strategiczną, znajdującej się w fazie wzrostowej, metalizacji natryskowej E^s_{P5} (4,4, 3,7), która znalazła się w polu cyprysa jesienią, w związku z czym należy umacniać jej potencjał w neutralnych warunkach otoczenia.



Rysunek 117. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P5: Inżynieria powierzchni stali dla przemysłu motoryzacyjnego*

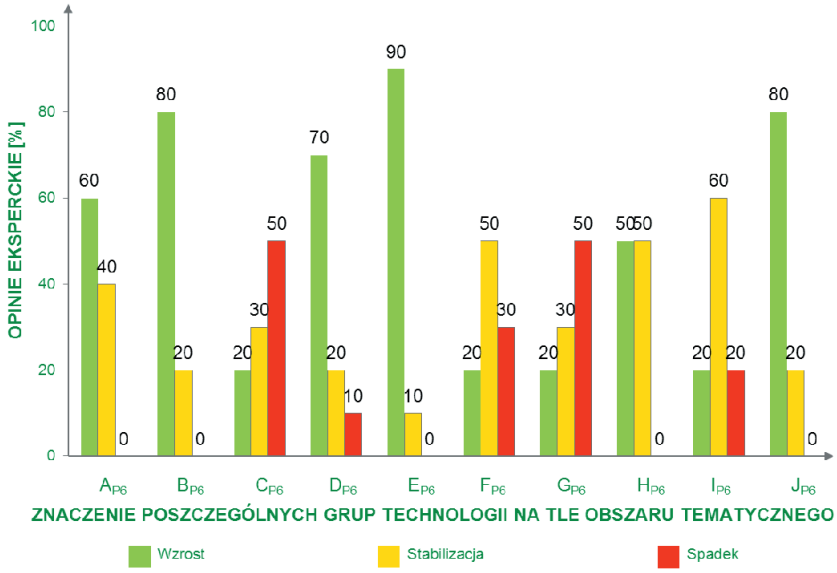
Wykorzystując zestawienia statystyczne (rys. 117), sporządzone na podstawie wyników badań heurystycznych, przeanalizowano prognozowane ścieżki rozwoju strategicznego poszczególnych grup technologii obróbki powierzchniowej stali użytecznych w przemyśle motoryzacyjnym. Przewiduje się, że w ciągu założonego horyzontu czasowego 20 lat nastąpi wzrost znaczenia nanoszenia powłok polimerowych proszkowych I_{P5} (77%), malowania i lakierowania ciekłymi materiałami polimerowymi H_{P5} (66%), cynkowania ogniowego z dodatkowym wyżarzaniem (powłoka Zn-Fe) B_{P5} (55%) oraz nakładania powłok z folii polimerowych J_{P5} (55%). Przyszłe znaczenie metalizacji natryskowej E_{P5} może wzrosnąć (44%) lub postać na dotychczasowym poziomie (44%). Trend ustabilizowany będzie dotyczył pozostałych grup technologii obróbki powierzchniowej stali dla przemysłu motoryzacyjnego.

Inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych P6

Analiza heurystyczna z wykorzystaniem autorskiej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju pozwoliła określić pozycje strategiczne poszczególnych grup technologii, które jako technologie krytyczne zostały przeanalizowane w ramach obszaru

tematycznego: Inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych. Najlepszą pozycję strategiczną, spośród technologii przeanalizowanych w ramach tego obszaru, ma fizyczne osadzanie z fazy gazowej (PVD) B_{P6}^{s} (9,5, 8,9), które otrzymało maksymalną ocenę (10 punktów) i w związku z tym znalazło się w najbardziej obiecującej szesnastce macierzy strategii dla technologii – dębu wiosną, a zatem rekomendowane jest rozwijanie i umacnianie tej grupy technologii, która powinna w przyszłości być coraz częściej stosowana na szeroką skalę przemysłową, zwłaszcza że otoczenie jest niezwykle sprzyjające. W polu dębu wiosną znalazły się również, ocenione bardzo wysoko (9 punktów), metody chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej (CVD) A_{P6}^{s} (9,1, 8,4) i metody zol-żel D_{P6}^{s} (8,7, 8,6). Młode technologie, obejmujące teksturowanie laserowe J_{P6}^{s} (4,8, 9,1) i wytwarzanie powłok hybrydowych – organiczno-nieorganicznych E_{P6}^{s} (4,6, 9,3), na które intensywnie oddziałują pozytywne czynniki płynące z otoczenia, wymagają zastosowania strategii cyprysa wiosną, polegającej na umacnianiu potencjału technologii z wykorzystaniem licznych pozytywnych zdarzeń zewnętrznych korzystnie wpływających na ich postęp. Umiarkowane możliwości rozwoju (6 punktów) charakteryzują teksturowanie mechaniczne z wykorzystaniem ostrza diamentowego I_{P6}^{s} (6,4, 3,9), wymagające zastosowania strategii kosodrzewiny jesienią zalecającej *zbieranie żniw* wsparte dalekosiężnymi planami rozwoju, służącymi maksymalnemu wydłużeniu fazy dojrzałości technologii, a także reaktywne trawienie jonowe (RIE) H_{P6}^{s} (3,5, 4,5) wymagające wzmocnienia potencjału w neutralnym otoczeniu (strategia cyprysa jesienią). Strategia kosodrzewiny zimą należy do strategii rokujących źle, stąd technologie, w odniesieniu do których jest zalecana, tj. pyroliza i jej odmiany C_{P6}^{s} (7,0, 2,1) oceniona na 5 punktów oraz trawienie chemiczne/ wyługowanie alkaliów z warstw powierzchniowych i zagęszczenie pozostałego SiO_2 G_{P6}^{s} (6,0, 2,2) (4 punkty), będą zapewne borykać się z licznymi trudnościami, zwłaszcza z silną konkurencją ze strony technologii bardziej nowoczesnych, bardziej ekologicznych i dających znacznie szersze możliwości kształtowania własności produktu i materiału, z którego jest on wykonany. Dość niskie perspektywy rozwoju (4 punkty) cechują również metody odparowania F_{P6}^{s} (6,3, 6,3), które znalazły się w polu kosodrzewiny latem i jeśli burzliwe otoczenie nie przyniesienie niespodziewanego obrotu spraw na korzyść, to degradacja tej technologii również jest nieunikniona.

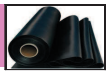
Na podstawie zestawień statystycznych (rys. 118), bazujących na wynikach pozyskanych drogą elektronicznej ankietyzacji ekspertów, określono ścieżki rozwoju strategicznego grup



Rysunek 118. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P6: Inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych*

technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów funkcjonalnych. Bardzo duża atrakcyjność całego obszaru tematycznego wpływa na fakt, że prognozowany jest wzrost znaczenia większości należących do niego grup technologii. Spodziewany jest spadek przyszłego znaczenia najbardziej konwencjonalnych grup technologii: pyrolizy wraz z jej odmianami C_{P6} (50%) oraz trawienia chemicznego i wyługowania alkaliów z warstw powierzchniowych i zagęszczenia pozostałego SiO_2 G_{P6} (50%), które będą systematycznie wypierane przez bardziej nowoczesne rozwiązania technologiczne. Trend ustabilizowany jest natomiast prognozowany w odniesieniu do teksturowania mechanicznego z wykorzystaniem ostrza diamentowego I_{M6} (60%), metody odparowania F_{M6} (50%) i być może reaktywnego trawienia jonowego (RIE) H_{P6} (wzrost: 50%; stabilizacja: 50%).

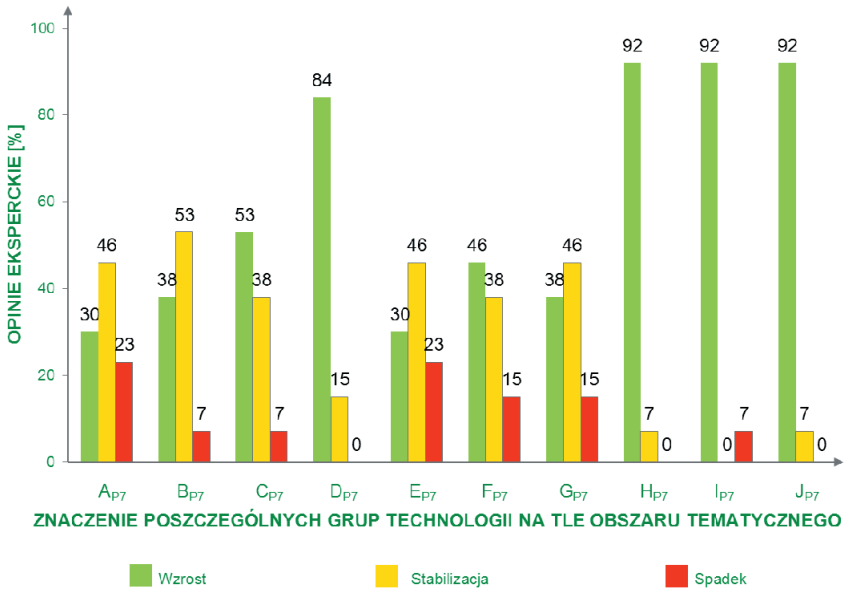
Inżynieria powierzchni materiałów polimerowych P7



Analiza heurystyczna przeprowadzona z użyciem nowo opracowanej metodologii umożliwiła określenie pozycji strategicznych poszczególnych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów polimerowych. Wyniki badań wskazują, że pięć grup technologii B_{P7},

H_{P7}, J_{P7}, I_{P7} i D_{P7} oceniono bardzo wysoko (9 punktów), co świadczy o dobrych perspektywach całego obszaru tematycznego. Młode obiecujące technologie, tj. utworzenie na powierzchni polimerów powłok gradientowych H^s_{P7} (5,0, 9,5) i samowykształcalnych I^s_{P7} (4,7, 8,9), polimeryzacja *in situ* J^s_{P7} (4,6, 9,2) oraz laserowa obróbka powierzchni polimerów D^s_{P7} (4,8, 8,6), znalazły się w polu cyprysa wiosną, co oznacza, że należy kontynuować prace naukowe nad ich rozwojem i wykorzystywać liczne sposobności płynące z otoczenia. Stosunkowo prosta i wysokowydajna metoda wyładowań koronowych B^s_{P7} (7,4, 8,3), stosowana powszechnie w przemyśle ze względu na niewielkie nakłady, zarówno na etapie inwestycji, jak i eksploatacji, została umieszczona w polu kosodrzewiny wiosną, podobnie jak obróbka plazmą powierzchni polimerów C^s_{P7} (7,0, 8,4), którą oceniono wysoko (8 punktów), zatem zaleca się w odniesieniu do tych technologii wykorzystywanie sposobności płynących z otoczenia przy równoczesnej dbałości o poprawę ich atrakcyjności dla utrzymania przewagi konkurencyjnej. Umiarkowane (6 punktów) perspektywy rozwojowe charakteryzują obróbkę powierzchni polimerów z użyciem promieni UV E^s_{P7} (3,9, 6,2) i promieniowania elektronowego G^s_{P7} (4,0, 6,3) o ograniczonym zakresie zastosowań. Technologie te, umieszczone w polu cyprysa latem, nadal wymagają dopracowania, co w połączeniu z nieprzewidywalnym otoczeniem powoduje, że zarówno optymistyczny, jak i pesymistyczny niespodziankowy scenariusz przyszłych wydarzeń nie są wykluczone. Strategia cyprysa jesienią jest natomiast właściwa dla innej technologii, również mającej umiarkowaną (6 punktów) pozycję strategiczną, tj. obróbki powierzchni polimerów z użyciem promieni gamma F^s_{P7} (3,6, 3,6), której otoczenie jest bardziej stabilne, zatem nie należy się spodziewać radykalnych zmian istniejących trendów. Najbardziej klasyczna spośród analizowanych technologii obróbki powierzchniowej polimerów – metalizacja A^s_{P7} (6,5, 6,1) została umieszczona w polu kosodrzewiny latem, więc zalecane jest jej uatrakcyjnienie i unowocześnienie, ze szczególnym zwróceniem uwagi na dopasowanie oferty do aktualnych i potencjalnych potrzeb klienta.

Wygenerowane na podstawie opinii eksperckich zestawienia statystyczne (rys. 119) umożliwiły przeprowadzenie analizy ścieżek rozwoju strategicznych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów polimerowych. Ponownie można zauważyć związek pomiędzy atrakcyjnością całego obszaru tematycznego a atrakcyjnością poszczególnych grup technologii stanowiących jego składowe. W odniesieniu do większości rozpatrywanych grup technologii prognozowane są tendencje wzrostowe, a przyszłe znaczenie czterech z nich, ocenionych najsłabiej w ramach analizy opartej na macierzach kontekstowych, utrzyma się na



Rysunek 119. *Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P7: Inżynieria powierzchni materiałów polimerowych*

dotychczasowym poziomie. Zgodnie z jednoznaczną prognozą, w ciągu najbliższych 20 lat nastąpi wzrost znaczenia metod obróbki polegających na utworzeniu na powierzchni polimerów powłok gradientowych H_{P7} (92%) i samowykształcalnych I_{P7} (92%), polimeryzacji *in situ* J_{P7} (92%) oraz powierzchniowej obróbki laserowej polimerów D_{P7} (84%).

Badania heurystyczne wykonane z użyciem nowo opracowanej metodologii komputerowo wspomaganego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów wykonano w odniesieniu do trzech poziomów ogólności: mikro, mezo i makro, który to podział szczegółowo opisano w podrozdziale 3.3 niniejszej pracy. Pierwotne dane źródłowe w postaci wyrażonych ilościowo, z użyciem dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych lub wartości procentowych, opinii eksperckich pozyskano drogą elektronicznej ankietyzacji, zgodnie z ideą e-foresightu technologicznego, podczas trzech iteracji metody e-Delphix, z użyciem platformy internetowej i organizacji wirtualnej pozwalających na zarządzanie danymi w cyberprzestrzeni.

W niniejszym rozdziale pracy omówiono najistotniejsze zjawiska i czynniki determinujące przyszły rozwój inżynierii powierzchni materiałów w skali mikro, czyli w odniesieniu do 140 grup technologii krytycznych, scharakteryzowanych w ramach dwóch pól badawczych

odpowiadających podejściu procesowemu (*M*) i alternatywnemu podejściu konsumenckiemu (*P*). Każde z rozpatrywanych pól badawczych podzielono dodatkowo na 7 obszarów tematycznych odpowiadających różnym rodzajom stosowanych urządzeń i realizowanych z ich udziałem procesów fizykochemicznych kształtujących strukturę i własności warstw powierzchniowych obrabianych materiałów (*M*1-*M*7) lub rodzajom materiałów inżynierskich, z których wytwarzane są produkty mające spełnić oczekiwania obecnych i potencjalnych klientów (*P*1-*P*7). Analiza wykonana z użyciem macierzy kontekstowych, tj. dendrologicznej macierzy wartości technologii, meteorologicznej macierzy oddziaływania otoczenia i macierzy strategii dla technologii, będącej wypadkową dwóch pierwszych macierzy oraz zestawień statystycznych, wygenerowanych na podstawie wyników metody e-Dephix, pozwoliła określić pozycje strategiczne poszczególnych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów na tle rozpatrywanych obszarów tematycznych, do których zostały one zakwalifikowane, oraz określić ścieżki ich rozwoju strategicznego w założonym horyzoncie czasowym najbliższych 20 lat.

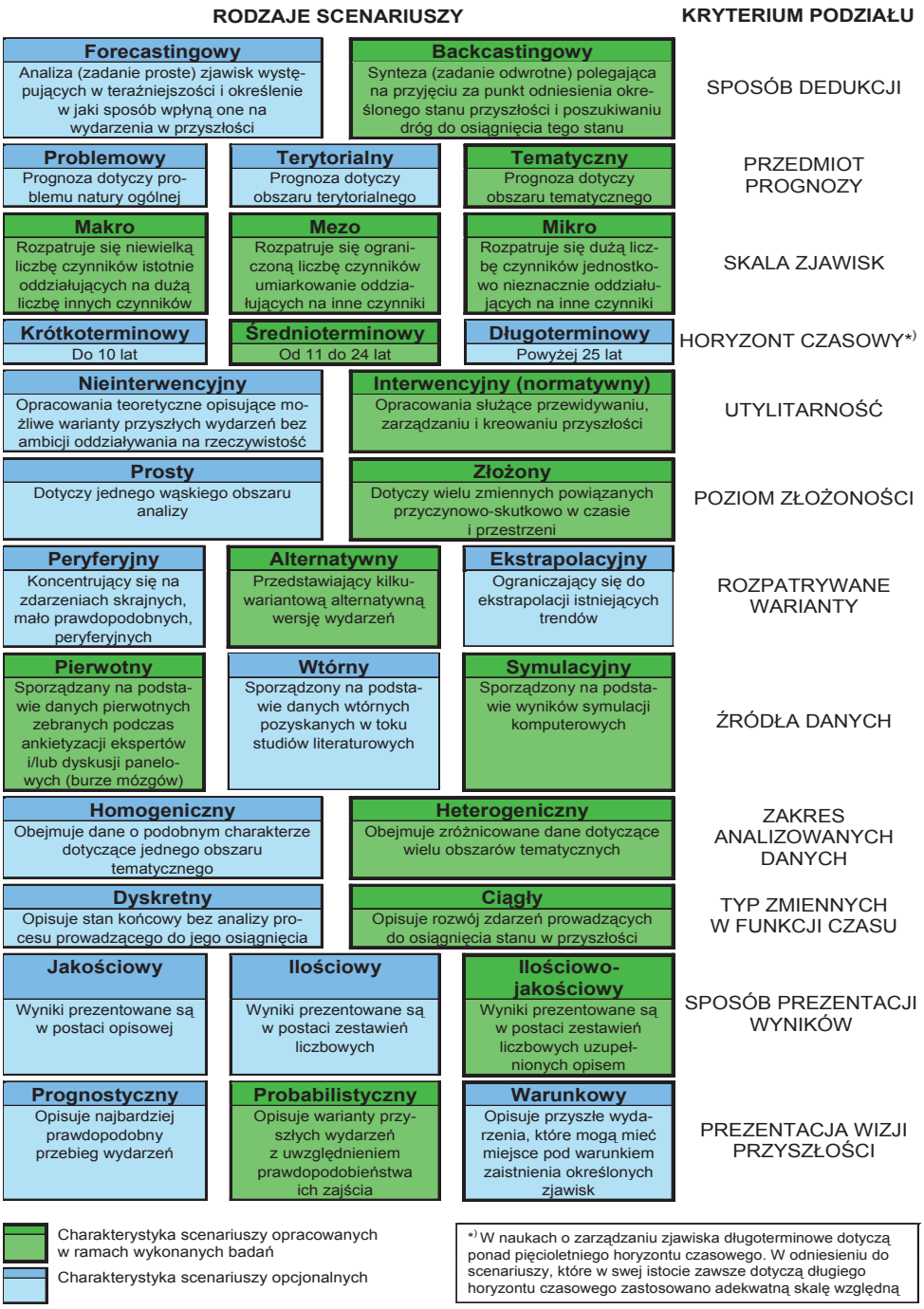
Analizę kluczowych czynników i zjawisk wpływających na rozwój inżynierii powierzchni materiałów na wyższym stopniu ogólności, tj. makro i mezo, dotyczącą prognozowanych alternatywnych probabilistycznych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń i sposobu oddziaływania na nie trendów rozwojowych poszczególnych obszarów tematycznych oraz kluczowych mezoczynników techniczno-ekonomicznych, do przeprowadzenia której wykorzystano narzędzia sztucznej inteligencji, zaprezentowano w kolejnym rozdziale niniejszej pracy.

7. Wspomagane sieciami neuronowymi makro- i mezoscenariusze przyszłych wydarzeń dotyczących inżynierii powierzchni materiałów

Przegląd piśmiennictwa [352-356] wskazuje, że nie istnieje jeden poprawny i ogólnie przyjęty sposób konstruowania scenariuszy przyszłych wydarzeń bądź algorytm postępowania zalecany do wdrożenia w procesie ich budowania. Praktyka wykazuje, że każdorazowo algorytm ten jest tworzony na nowo przez realizatorów konkretnego badania [357]. Podobnie rzecz miała się w przypadku kreowania scenariuszy przedstawiających prognozowaną przyszłość inżynierii powierzchni materiałów, gdzie wyzwaniem metodologicznym było umiejętne połączenie prezentacji i opisu czynników o różnym stopniu ogólności i uchwycenie występujących pomiędzy nimi związków przyczynowo-skutkowych. W celu rozwiązania tak postawionego zadania badawczego wszystkie analizowane czynniki podzielono na trzy grupy: makro, mezo i mikro, co szczegółowo opisano w podrozdziale 3.3 niniejszej pracy. Opracowane w ramach przeprowadzonych badań scenariusze przyszłych wydarzeń dotyczących inżynierii powierzchni materiałów, zgodnie z doniesieniami literaturowymi [354, 357-359], mogą być scharakteryzowane na wiele sposobów, z uwzględnieniem różnorakich kryteriów podziału, które to kryteria wybrano arbitralnie i zgodnie z nimi scharakteryzowano utworzone scenariusze na tle scenariuszy opcjonalnych (rys. 120).

Na początkowym etapie prac badawczych, na podstawie wyników panelowych dyskusji eksperckich, wspartych niektórymi wynikami badań wykonanych w ramach Narodowego Programu Foresight Polska 2020 [162], opracowano trzy alternatywne warianty scenariuszy przewidywanych wydarzeń w skali makro, dotyczące prognozowanej przyszłości Polski/ Europy/ Świata: optymistyczny, neutralny i pesymistyczny.

Scenariusz optymistyczny *Wygrany wyścig* zakłada, że światowy kryzys gospodarczy został zażegnany i ma miejsce wzrost gospodarczy opierający się na pokojowej współpracy i integracji międzynarodowej. Wzrasta pozycja konkurencyjna Unii Europejskiej wśród gospodarek światowych. W kraju realizowane są z powodzeniem, znajdujące akceptację społeczną, liczne reformy, służące rzeczywistej transformacji gospodarki, co sprzyja zrównoważonemu rozwojowi w ramach gospodarki opartej na wiedzy. Polska umiejętnie łączy endogenne czynniki wzrostu z inwestycjami zagranicznymi i efektywnym wykorzystaniem funduszy unijnych. Konsekwencją szeroko zakrojonych planowych działań



Rysunek 120. *Charakterystyka scenariuszy opracowanych w ramach wykonanych badań na tle charakterystyki scenariuszy opcjonalnych*

strategicznych jest systematyczny wzrost poziomu wykształcenia społeczeństwa, aplikacja na szeroką skalę innowacyjnych, proekologicznych technologii w licznych prężnie rozwijających się małych i średnich przedsiębiorstwach (MSP) oraz dużych korporacjach coraz częściej działających w gałęziach wysokiej techniki, efektywne wykorzystanie zasobów rolnych kraju, a także ukształtowanie się nowoczesnej infrastruktury transportowej i teleinformatycznej**.** Dostępny potencjał jest należycie wykorzystywany do realizacji strategicznych celów rozwojowych, statystycznie ludziom żyje się lepiej, nastroje społeczne są optymistyczne, a perspektywy na kolejne lata świetlane.

Zgodnie ze scenariuszem neutralnym o nazwie *Wypracowany rozwój* światowy kryzys gospodarczy został zażegnany i Świat ostrożnie powraca na ścieżkę wzrostu gospodarczego w paradygmacie zrównoważonego rozwoju, opierającego się na współpracy i integracji międzynarodowej, choć cały czas ciąży nad nim widmo terroryzmu i lokalnych wojen, które w niesprzyjających okolicznościach mogą rozszerzyć się na wiele krajów. Unia Europejska musi ostro walczyć o swoją pozycję wśród gospodarek światowych, zwłaszcza z wyrastającymi na światowe potęgi Chinami i Indiami. W kraju podejmowane są, z różnym skutkiem, próby prowadzenia reform służących transformacji gospodarki, które często spotykają się z ostracyzmem społecznym i niechęcią ludzi do zmian. Polska stara się wykorzystywać fundusze unijne, lecz nie wszystkie pieniądze zostają efektywnie zagospodarowane. Wdrażanie idei gospodarki opartej na wiedzy i zrównoważonego rozwoju przynosi efekt w postaci wzrostu poziomu wykształcenia społeczeństwa i jego proekologicznej świadomości. Sektor małych i średnich przedsiębiorstwach (MSP) rozwija się w stałym, lecz powolnym tempie, a poziom aplikacji priorytetowych innowacyjnych technologii nadal pozostawia wiele do życzenia. Duże korporacje głównie działają w gałęziach średnioniskiej i średniowysokiej techniki. Kraj stale boryka się z problemami w obszarze finansów publicznych, rolnictwa i służby zdrowia, a tempo kształtowania się nowoczesnej infrastruktury transportowej i teleinformatycznej jest stałe, lecz stosunkowo wolne. Dostępny potencjał jest tylko częściowo wykorzystywany do realizacji strategicznych celów rozwojowych, statystycznie ludziom żyje się nieco lepiej, lecz nastroje społeczne są mieszane. Teoretycznie dość dobre perspektywy rozwojowe na kolejne lata w głównej mierze zależą od kondycji europejskiej i ogólnoświatowej gospodarki, mądrego gospodarowania finansami publicznymi w długim horyzoncie czasowym i tempa realizacji kolejnych reform popartych zaangażowaniem społeczeństwa.

Scenariusz pesymistyczny *Równia pochyła* zakłada, że światowy kryzys gospodarczy został jedynie nieco spowolniony. Świat boryka się z terroryzmem, wzrastającymi cenami ropy naftowej, skutkami katastrof i lokalnych wojen rozszerzających się na coraz liczniejsze kraje. Unia Europejska pozostaje w tyle w odniesieniu do innych gospodarek światowych, zwłaszcza wyrastających na światowe potęgi Chin i Indii. W kraju podejmowane są najczęściej nieudane próby prowadzenia reform służących transformacji gospodarki, które spotykają się z ostracyzmem społecznym i silną niechęcią ludzi do zmian. Przekazywane Polsce fundusze unijne z roku na rok maleją, a większość pieniędzy zostaje wykorzystana na bieżące ratowanie kondycji gospodarki, podczas gdy poziom inwestycji maleje. Wdrażanie idei gospodarki opartej na wiedzy i zrównoważonym rozwoju, które początkowo zapowiadało się dobrze, podupada. Sektor małych i średnich przedsiębiorstw (MSP) rozwija się słabo, a aplikacja innowacyjnych proekologicznych technologii jest najczęściej niemożliwa ze względu na brak inwestycji i trudno dostępne kredyty. Duże korporacje działają w gałęziach średnioniskiej i średniowysokiej techniki, a wiele z nich bankrutuje lub przenosi swoje siedziby do państw azjatyckich. Kraj stale boryka się z problemami w obszarze finansów publicznych, rolnictwa, służby zdrowia, edukacji i infrastruktury transportowej. Dostępny potencjał jest słabo wykorzystywany do realizacji strategicznych celów rozwojowych, które najwyraźniej zostały źle sformułowane, statystycznie ludziom żyje się coraz gorzej, czemu towarzyszą niepokoje społeczne. Perspektywy rozwojowe na kolejne lata są słabe i jeżeli nie nastąpi gwałtowny przełom, Polska będzie zmierzać ku katastrofie.

W prowadzonych badaniach przyjęto sposób dedukcji polegający na poszukiwaniu kombinacji mikro- i mezoczynników, która spowoduje, że z określonym prawdopodobieństwem każdy z trzech możliwych makroscenariuszy będzie miał miejsce w przyszłości. Pozycję strategiczną technologii szczegółowych i grup technologii krytycznych odpowiadających poziomowi mikro wraz z ich prognozowanym rozwojem przedstawionym w postaci zestawień statystycznych i/lub ścieżek rozwoju strategicznego technologii, sporządzonych na podstawie wyników badań eksperckich, zaprezentowano odpowiednio w rozdziałach 5. i 6. niniejszej pracy. Do analizy wzajemnych oddziaływań pomiędzy zdarzeniami w skali makro i mezo zastosowano metodykę badań informatycznych opisaną w podrozdziale 3.5 pracy i oryginalne programy komputerowe omówione w podrozdziale 4.3 niniejszej rozprawy. Wyniki badań eksperckich w postaci wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych analizowanych zjawisk, otrzymane w procesie ankietyzacji ekspertów metodą

e-Delphix, stanowiły zmienne wejściowe, które, podzielone na podzbiory: uczący, walidacyjny i testowy, posłużyły do trenowania sieci neuronowych. Zmienne wyjściowe są natomiast generowane w postaci różnych wykresów prezentujących zależności pomiędzy wartościami prawdopodobieństwa poszczególnych makroscenariuszy a podlegających poszczególnym trendom pozostałych czynników analizy.

7.1. Makroscenariusze a rozwój obszarów tematycznych inżynierii powierzchni materiałów

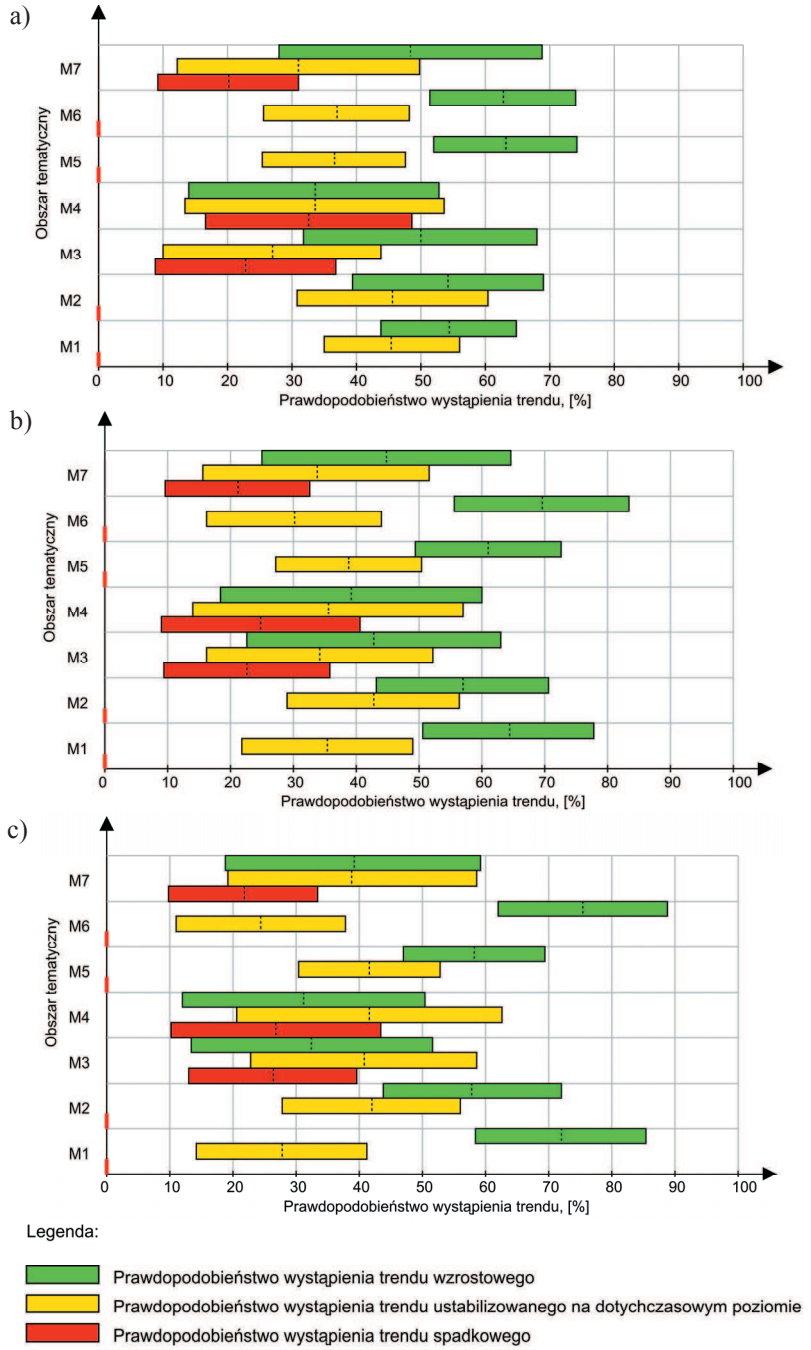
Eksperymenty symulacyjne wykonane z użyciem programu SCENNET21, do którego jako funkcje zaimplementowano sztuczne sieci neuronowe, miały na celu określenie, w jakim stopniu na zaistnienie, z danym prawdopodobieństwem, każdego z trzech alternatywnych scenariuszy ma rozwój poszczególnych 14 obszarów tematycznych, wchodzących w skład pola badawczego *M*, odzwierciedlającego punkt widzenia producenta i pola *P* odpowiadającego podejściu klienta, oczekującego na produkt o wymaganych cechach użytkowych.

Zastosowanie do rozwiązania tak postawionego problemu badawczego narzędzi sztucznej inteligencji pozwala na błyskawiczne wyszukiwanie w wielotysięcznym zbiorze rozwiązania zbliżonego do optymalnego, satysfakcjonującego użytkownika. Sieć neuronowa wytrenowana z użyciem zaimplementowanych do niej danych wejściowych, pozyskanych w drodze ankietyzacji ekspertów, generuje wielowariantowe prognozy przyszłych wydarzeń. W szczególności możliwe jest określenie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych trendów rozwojowych (wzrostowego, ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie i spadkowego) analizowanych obszarów tematycznych, przy żądanej przez użytkownika wartości prawdopodobieństwa wystąpienia każdego z trzech alternatywnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń. Użytkownik przeprowadzając symulację komputerową, może zarówno zadać konkretną wartość liczbową prawdopodobieństwa wybranego makroscenariusza, jak i poszukiwać rozwiązania dla jego skrajnych wartości, tj. maksymalnej lub minimalnej.

Na rysunku 121 przedstawiono przykładowe wyniki trzech eksperymentów symulacyjnych, wykonanych w odniesieniu do pola badawczego *M*, w postaci wykresów wygenerowanych z użyciem programu SCENNET21, dotyczących scenariusza optymistycznego, dla którego wartość prawdopodobieństwa kolejno określono na poziomie 10% (rys. 121a), 20% (rys. 121b)

i 30% (rys. 121c). Na osi odciętych znajdują się określone w procentach wartości prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego, ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie i spadkowego. Na oś rzędnych naniesiono natomiast poszczególne obszary tematyczne poddane analizie, czyli kolejno: Technologie laserowe w inżynierii powierzchni (*M*1), Technologie PVD (*M*2), Technologie CVD (*M*3), Technologie cieplno-chemiczne (*M*4), Technologie polimerowych warstw wierzchnich (*M*5), Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich (*M*6), Inne technologie inżynierii powierzchni (*M*7).

Zaprezentowane wyniki symulacji komputerowych, przeprowadzonych z użyciem sieci neuronowych, wskazują na wiodącą przewidywaną rolę rozwoju technologii nanostrukturalnych warstw wierzchnich (*M*6) i technologii laserowych (*M*1) na tle całego pola badawczego *M*, dla których prawdopodobieństwo trendu wzrostowego w istotny sposób rośnie wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa optymistycznego makroscenariusza przyszłych wydarzeń. Należy również zauważyć, że w przypadku tych obszarów tematycznych prawdopodobieństwo wystąpienia trendu spadkowego jest zerowe, co oznacza, że degradacja tych obszarów nie jest możliwa. Podobną sytuację można zaobserwować w odniesieniu do technologii PVD (*M*2) i technologii polimerowych warstw wierzchnich (*M*5), dla których wartość prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego we wszystkich trzech analizowanych przypadkach jest zbliżona i dla obu obszarów tematycznych każdorazowo wynosi maksymalnie ok. 70%. Zależność pomiędzy wartością prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego w odniesieniu do technologii CVD (*M*3) i innych technologii inżynierii powierzchni (*M*7) a wartością prawdopodobieństwa wystąpienia scenariusza optymistycznego w skali makro jest odwrotnie proporcjonalna, co oznacza, że im szybszy jest postęp, tym szybsza będzie degradacja grup technologii zawierających się w tych obszarach na tle pola badawczego, czyli jest wskazane, aby zamiast nich, bardziej intensywnie rozwijały się technologie o lepszych rokowaniach, tj. *M*6, *M*1, *M*2, *M*5. Najbardziej przewidywalny jest rozwój klasycznych technologii obróbki cieplno-chemicznej, dla których maksymalna wartość prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego we wszystkich trzech przypadkach odpowiadających 10, 20 i 30% prawdopodobieństwu wystąpienia scenariusza optymistycznego kształtuje się na zbliżonym poziomie 50-60%. Zarówno wartości te, jak i wartości prawdopodobieństwa wystąpienia trendu ustabilizowanego i spadkowego tych technologii odzwierciedlają realną sytuację i przyszłą pozycję strategiczną tych technologii na tle pola badawczego M. Obróbka cieplno-chemiczna,

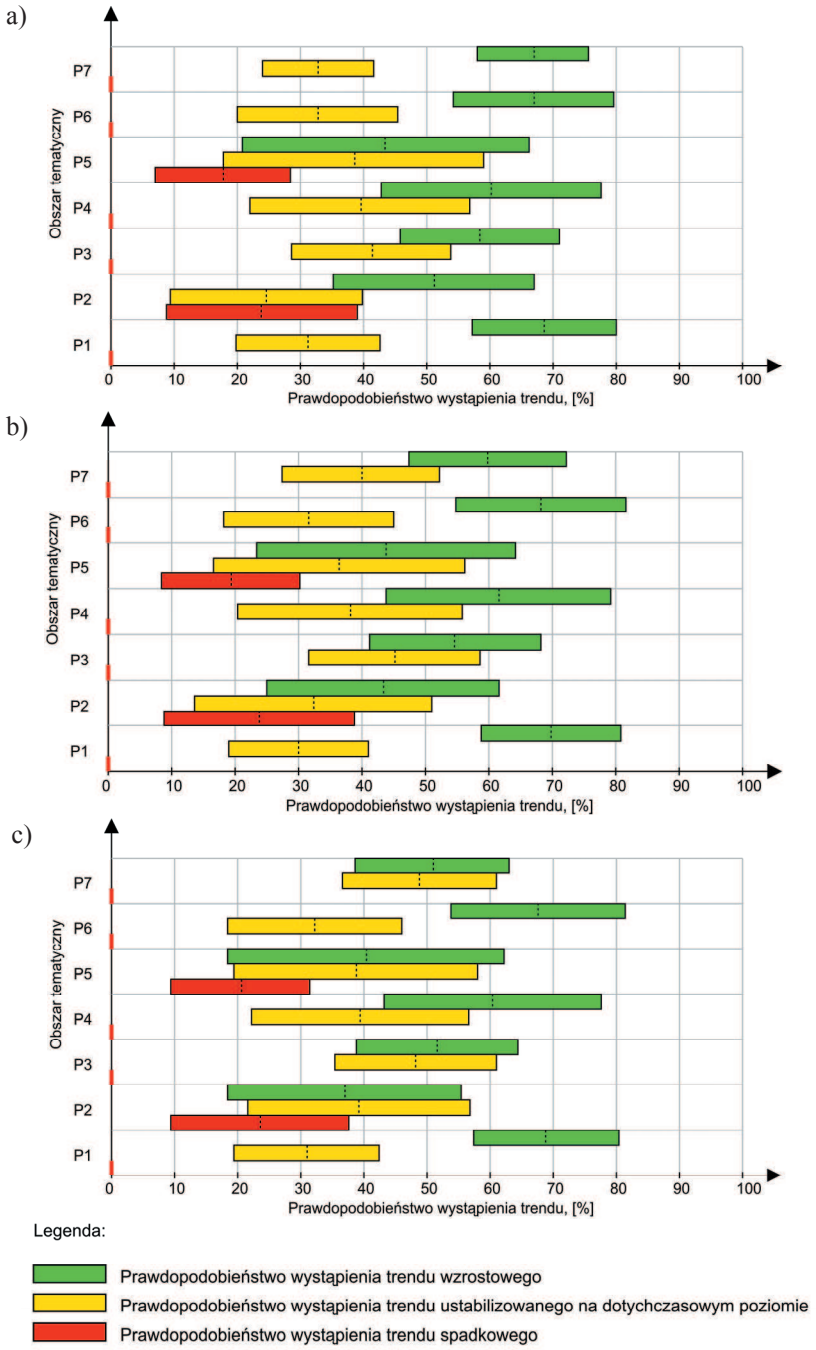


Rysunek 121. *Wyniki symulacji prezentujące wartości prawdopodobieństwa poszczególnych trendów obszarów tematycznych pola badawczego M w przypadku zaistnienia scenariusza optymistycznego z: a)10%, b) 20% i c) 30% prawdopodobieństwem*

mimo iż nie należy do technologii awangardowych ani skrajnie rozwojowych, ze względu na rachunek ekonomiczny i powszechność stosowania, zajmuje ważne i istotne miejsce we współczesnej gospodarce, a prognoza wskazuje, że taki stan rzeczy utrzyma się przez najbliższe 20 lat.

W odniesieniu do pola badawczego *P* wybrano do prezentacji przykładowe wyniki eksperymentów symulacyjnych, dotyczących zależności pomiędzy trendami rozwojowymi poszczególnych obszarów tematycznych a pesymistycznym makroscenariuszem przyszłych wydarzeń, mogącym wystąpić odpowiednio z 10% (rys. 122a), 20% (rys. 122b) i 30% (rys. 122c) prawdopodobieństwem. Na oś odciętych, podobnie jak w przypadku pola badawczego *M*, naniesiono określone w procentach wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych trendów (wzrostowego, ustabilizowanego i spadkowego) w odniesieniu do badanych obszarów tematycznych. Na osi rzędnych znajdują się natomiast kolejno następujące obszary tematyczne poddane badaniom symulacyjnym: Inżynieria powierzchni biomateriałów (*P*1), Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych (*P*2), Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych (*P*3), Inżynieria powierzchni materiałów narzędziowych (*P*4), Inżynieria powierzchni stali dla przemysłu motoryzacyjnego (*P*5), Inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych (*P*6), Inżynieria powierzchni materiałów polimerowych (*P*7).

Wyniki wykonanych eksperymentów symulacyjnych wskazują na pewny i szybki rozwój inżynierii powierzchni biomateriałów (*P*1), materiałów funkcjonalnych (*P*6) i materiałów narzędziowych (*P*4), o czym świadczy zerowe prawdopodobieństwo wystąpienia trendu spadkowego, a także utrzymująca się na stałym poziomie, maksymalnie ok. 80% w każdym z analizowanych przypadków, wartość prawdopodobieństwa trendu wzrostowego, mimo iż symulacja dotyczy pesymistycznego wariantu przyszłych wydarzeń. W odniesieniu do inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych (*P*3) i materiałów polimerowych (*P*7) obserwowana jest odwrotnie proporcjonalna zależność pomiędzy wartością prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego technologii należących do tych obszarów tematycznych a wartością prawdopodobieństwa wystąpienia pesymistycznego makroscenariusza, co oznacza, że pożądany jest rozwój tych obszarów, którego brak towarzyszy niekorzystnemu przyszłemu scenariuszowi wydarzeń. Dobrą przyszłą pozycję strategiczną technologii reprezentujących obszary *P*3 i *P*7 potwierdza brak prognoz zakładających spadek ich przyszłego znaczenia, nawet gdy rozważany jest pesymistyczny



Rysunek 122. *Wyniki symulacji prezentujące wartości prawdopodobieństwa poszczególnych trendów obszarów tematycznych pola badawczego P w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego z: a)10%, b) 20% i c) 30% prawdopodobieństwem*

wariant wydarzeń. Odwrotnie proporcjonalną zależność pomiędzy wartością prawdopodobieństwa trendu wzrostowego a wartością prawdopodobieństwa pesymistycznego makroscenariusza przyszłych wydarzeń można zaobserwować również w odniesieniu do inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych (*P*2) i stali dla przemysłu motoryzacyjnego (*P*5). Wyniki symulacji wskazują, że w obu rozpatrywanych przypadkach brak rozwoju technologii należących do tych obszarów tematycznych wpływałaby niekorzystnie na bieg zdarzeń. Technologie wytwarzania stali dla przemysłu motoryzacyjnego (*P*5) i materiałów konstrukcyjnych metalowych (*P*2), podobnie jak omówione wcześniej technologie cieplno-chemiczne (*M*4), należą do konwencjonalnych, tradycyjnych metod obróbki powierzchniowej, stosowanych jednak na dużą skalę w praktyce przemysłowej. Większa wartość prawdopodobieństwa wystąpienia trendu spadkowego, w przypadku obszaru tematycznego *P*2, w porównaniu do obszaru *P*5, świadczy o lepszej pozycji strategicznej tego ostatniego. W przemyśle motoryzacyjnym, pomimo coraz częstszego zastępowania tradycyjnych stali innymi materiałami, np. stopami metali lekkich (Mg, Al) lub materiałami polimerowymi, zasadniczo pozycja stali jest niezagrożona, m.in. dzięki szybkiemu rozwojowi nowych gatunków stali. Wśród nich należy wymienić, charakteryzujące się unikalną kombinacją własności wytrzymałościowych i plastycznych, austenityczne stale wysokomanganowe typu *TRIP* ang. ***T**ransformation **I**nduced **P**lasticity),* w których podczas odkształcenia plastycznego na zimno indukowana jest przemiana martenzytyczna, typu *TWIP* (ang.: ***Tw**inning **I**nduced **P**lasticity*), charakteryzujące się intensywnym bliźniakowaniem mechanicznym podczas odkształcenia plastycznego oraz typu *TRIPLEX,* cechujące się strukturą trójfazową: austenityczno-ferrytyczną z dyspersyjnymi węglikami. Technologie wytwarzania materiałów konstrukcyjnych metalowych (*P*2), również nienależących do awangardowych i skrajnie rozwojowych, mają zapewnione swoje pewne miejsce wśród ważnych technologii inżynierii powierzchni materiałów, ze względu na powszechność występowania i często brak możliwości zastąpienia ich innymi rozwiązaniami, po ekonomicznie uzasadnionych kosztach.

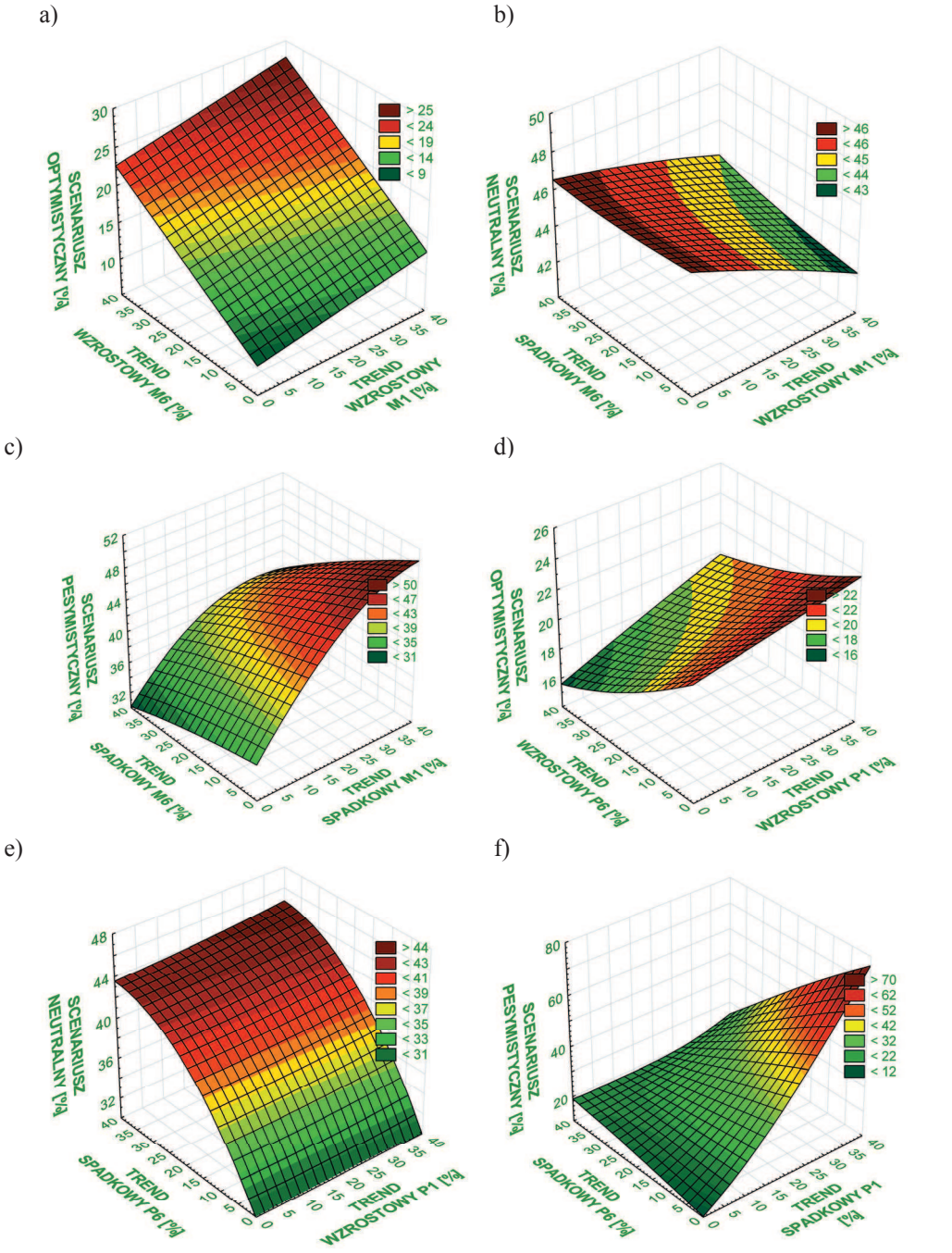
Zaprezentowane wybrane wyniki, dotyczące scenariusza optymistycznego w odniesieniu do pola badawczego *M* i scenariusza pesymistycznego dla pola badawczego *P*, stanowiące jedynie przykład znacznie szerszych badań symulacyjnych, pozwalają odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób wzrost, stabilizacja lub spadek znaczenia analizowanych obszarów tematycznych wpłynie na wystąpienie z określonym prawdopodobieństwem w ciągu najbliższych 20 lat każdego z alternatywnych makroscenariuszy: optymistycznego, neutralnego i pesymistycznego.

Należy ponadto podkreślić, że odpowiednio wytrenowane sieci neuronowe są użytecznym narzędziem pozwalającym na szybkie wygenerowanie alternatywnych wariantów prognozy przyszłych wydarzeń.

Program SCENNET21 umożliwia wykonywanie symulacji komputerowych, których wyniki dotyczą analizowanych całościowo pól badawczych, odpowiednio *M* i *P*. Program *Statistica* 4.0.*F* pozwala natomiast na generowanie trójwymiarowych wykresów, którą to funkcję wykorzystano do przeprowadzenia szczegółowych analiz zależności wartości prawdopodobieństwa wystąpienia danego makroscenariusza przyszłych wydarzeń i wartości prawdopodobieństwa wybranych dwóch trendów, opcjonalnie wzrostowego, ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie lub spadkowego, dotyczących wybranych dwóch obszarów tematycznych. Na potrzeby tych eksperymentów symulacyjnych założono, że wartości prawdopodobieństwa pozostałych 19 trendów, dotyczących nierozpatrywanych akurat szczegółowo obszarów tematycznych, wynoszą w odniesieniu do trendu wzrostowego 27, ustabilizowanego 50, a spadkowego 23 procent.

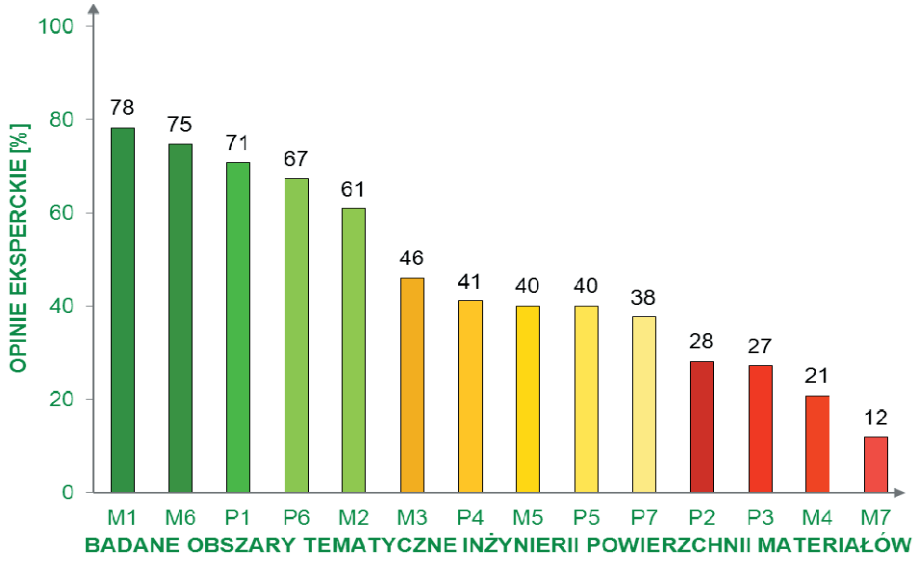
Przykładowe wyniki tych symulacji komputerowych, prezentujące zależności pomiędzy wartością prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych alternatywnych makroscenariuszy a wartością prawdopodobieństwa wybranych trendów (wzrostowego lub spadkowego) dotyczących obszarów tematycznych *M*1 i *M*6, przedstawiono na rysunkach 123 a-c. W odniesieniu do pola badawczego *P* wybrano natomiast do prezentacji zależności pomiędzy wartością prawdopodobieństwa alternatywnych makroscenariuszy a wartością prawdopodobieństwa niektórych trendów (wzrostowych lub spadkowych) dotyczących obszarów tematycznych P1 i P6 (rys. 123 d-f). Przedstawione wykresy (rys. 123) pozwalają szczegółowo przeanalizować, w jaki sposób wystąpienie trendów dotyczących dwóch obszarów tematycznych, przy założonych stałych wartościach pozostałych trendów, wpływa na zaistnienie danego makroscenariusza przyszłych wydarzeń.

Wyniki eksperymentów symulacyjnych potwierdzają wyniki wykonanych niezależnie badań heurystycznych (liczebność próby: 202), przedstawionych szczegółowo na rysunkach 124-126. Ankietowani eksperci w szczególności oceniali możliwości praktycznej aplikacji rozpatrywanych grup technologii zakwalifikowanych do poszczególnych obszarów tematycznych (rys. 124), typowali obszary tematyczne, którym będą najczęściej poświęcone prace naukowo-badawcze (rys. 125) oraz definiowali, które obszary tematyczne, a ściślej grupy technologii zawarte w tych obszarach, są kluczowe i ich znaczenie powinno bezwzględnie

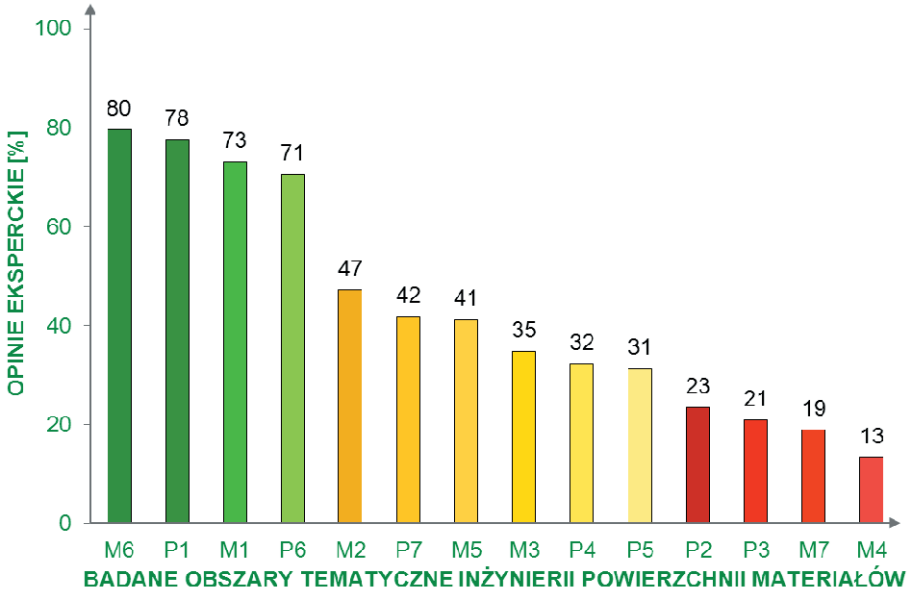


Rysunek 123. *Wyniki symulacji wpływu prawdopodobieństwa wystąpienia wybranych trendów dotyczących odpowiednio obszarów M1 i M6 (a-c) oraz P1 i P6 (d-e) na prognozowane alternatywne scenariusze wydarzeń*

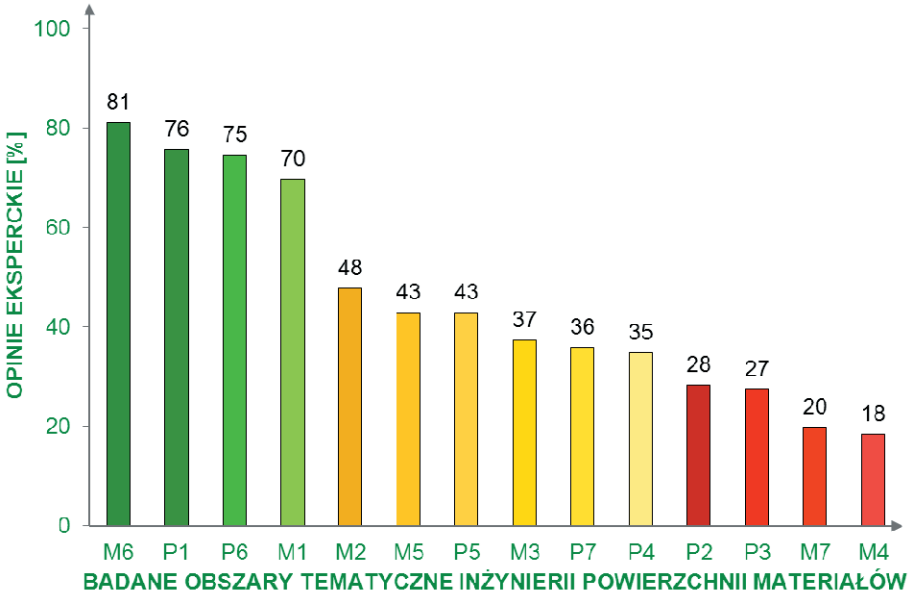
wzrastać, aby miał szansę zaistnieć optymistyczny makroscenariusz przyszłych wydarzeń, zwany *Wygranym wyścigiem* (rys. 126). Założono 20-letni horyzont czasowy prowadzonych badań heurystycznych. We wszystkich przypadkach prezentowanych na trzech wykresach najlepiej oceniono technologie laserowe w inżynierii powierzchni (*M*1), technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich (*M*6), inżynierię powierzchni biomateriałów (*P*1) oraz inżynierię powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych (*P*6), w odniesieniu do których każdorazowo otrzymano ok. 80-70% odpowiedzi potwierdzających prawdziwość stawianych tez, dotyczących kolejno: przyszłych licznych aplikacji przemysłowych, licznych prac naukowo-badawczych poświęconych danemu zagadnieniu i bezwzględnej konieczności rozwoju, gwarantującej zaistnienie optymistycznego makroscenariusza przyszłych wydarzeń. Wyniki badań heurystycznych, podobnie jak wyniki badań symulacyjnych, we wszystkich trzech przypadkach wskazują na słabą pozycję klasycznych technologii obróbki powierzchniowej. Interpretując je, po raz kolejny należy zwrócić uwagę, że znaczenia tych technologii, mimo iż nie należą do awangardowych ani skrajnie rozwojowych, nie sposób przecenić, ponieważ są one powszechnie stosowane w przemyśle i, ze względu na rachunek ekonomiczny, produkcja z ich udziałem nadal będzie realizowana w ciągu najbliższych 20 lat, choć zapewne rozwiązania najmniej ekologiczne i najbardziej przestarzałe zostaną wyparte przez te bardziej nowoczesne i bardziej przyjazne środowisku naturalnemu.



Rysunek 124. *Wyniki badań heurystycznych, dotyczących oceny możliwości praktycznej aplikacji w przemyśle rozpatrywanych grup technologii, zawartych w poszczególnych obszarach tematycznych M1-M7 i P1-P7, w ciągu najbliższych 20 lat*



Rysunek 125. *Wyniki badań heurystycznych, dotyczących oceny, którym grupom technologii, zawartym w poszczególnych obszarach tematycznych M1-M7 i P1-P7, będą w ciągu najbliższych 20 lat, najczęściej poświęcone prace naukowo-badawcze*



Rysunek 126. *Wyniki badań heurystycznych, dotyczących oceny, które z rozpatrywanych grup technologii, zawartych w poszczególnych obszarach tematycznych M1-M7 i P1-P7, są kluczowe i ich znaczenie powinno wzrastać, aby w ciągu najbliższych 20 lat, miał szansę zaistnieć optymistyczny makroscenariusz przyszłych wydarzeń*

7.2. Makroscenariusze a kluczowe mezoczynniki determinujące rozwój inżynierii powierzchni materiałów

W celu określenia wpływu kluczowych, wyselekcjonowanych na wcześniejszych etapach prac, mezoczynników determinujących rozwój inżynierii powierzchni materiałów na wartość prawdopodobieństwa zaistnienia alternatywnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń, zastosowano oryginalny program komputerowy SCENNET48, do którego dołączono jako funkcję (uprzednio wytrenowaną, z użyciem zaimplementowanych do niej danych wejściowych, stanowiących wyniki badań eksperckich) sztuczną sieć neuronową. Pełną listę 16 analizowanych mezoczynników oznaczonych symbolami alfanumerycznymi *C*1-*C*16 zaprezentowano na rysunku 10 w rozdziale 3.3 niniejszej pracy.

W ramach badań symulacyjnych wykonano trzy grupy eksperymentów, których, z konieczności, tylko niektóre wyniki wybrano do prezentacji w niniejszej pracy, przyjmując następujące założenia:

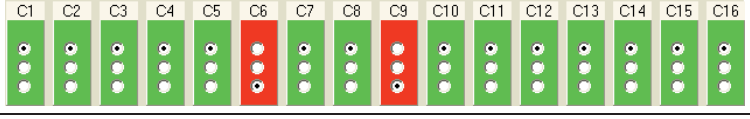
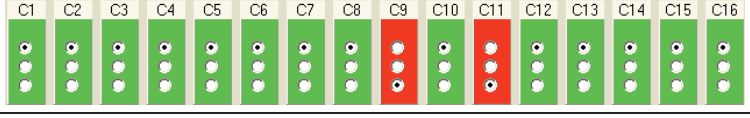
- W odniesieniu do każdego wektora wyjściowego klasyfikator oblicza wartość prawdopodobieństwa wystąpienia scenariusza optymistycznego, neutralnego lub pesymistycznego.
- Każda zmienna niezależna może przyjmować jedną z trzech wartości ze zbioru {1, 0, -1}, przy czym wartość 1 odpowiada trendowi wzrostowemu, 0 – trendowi ustabilizowanemu na dotychczasowym poziomie (neutralnemu), natomiast -1 – trendowi spadkowemu danego mezoczynnika.
- Podczas każdego z eksperymentów poszczególne zmienne niezależne mogą przyjmować tylko dwie wybrane wartości ze zdefiniowanego zbioru wartości dopuszczalnych {1, 0, -1}, dzięki czemu liczba możliwych przypadków zostaje ograniczona z 3^{16}, czyli 43 046 721, co odpowiada liczbie wszystkich kombinacji rozpatrywanych równocześnie 16 mezoczynników mogących przyjmować każdy z 3 możliwych trendów, do 2^{16}, czyli 65 536, co ma miejsce, gdy tylko 2 trendy są brane pod uwagę.

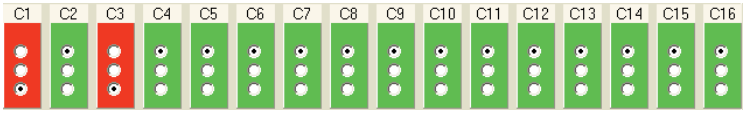
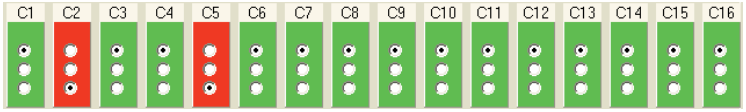
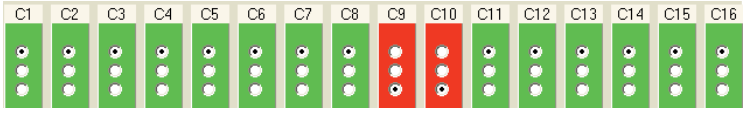
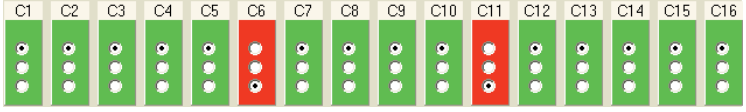
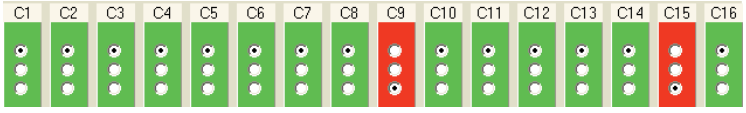
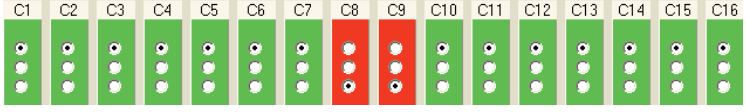
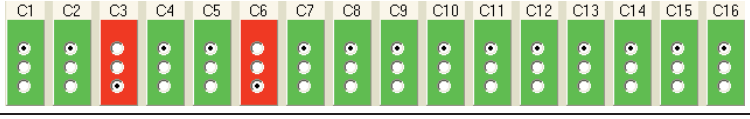
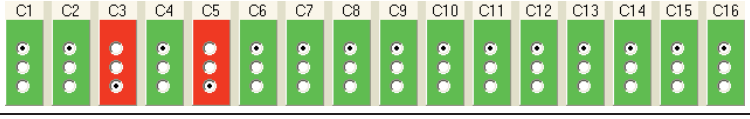
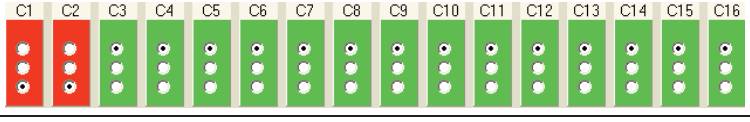
Celem pierwszej grupy eksperymentów było wyselekcjonowanie mezoczynników, które wpłyną na zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny wraz z określeniem wartości prawdopodobieństwa tego zdarzenia. Zmienne niezależne mogą przyjmować wartość ze zbioru {1, -1}, co odpowiada zmianie trendu badanych mezoczynników ze wzrostowego na spadkowy. Zgodnie z przyjętym założeniem poszukiwano przypadków, w których liczba mezoczynników wykazujących zmianę trendu ze wzrostowego na

spadkowy jest jak najmniejsza. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów odnaleziono 15 różnych kombinacji, w których 2 mezoczynniki równocześnie zmieniły wartość z 1 na -1 (tabl. 19) oraz 194 takie kombinacje z udziałem 3 mezoczynników.

Zgodnie z wynikami przeprowadzonych eksperymentów trzy dwuelementowe kombinacje zmian trendów ze wzrostowych na spadkowe spowodują ze stuprocentowym prawdopodobieństwem zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny. Taki efekt wywołują równoczesne zmiany na gorsze czynnika *C*9 – Dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnianie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach w połączeniu z następującymi mezoczynnikami: *C*1 – Skuteczność działań państwa służących umożliwieniu szerokiego dostępu do informacji dotyczących kluczowych technologii i wyników foresightów technologicznych; *C*2 – Przejrzystość i przyjazność przepisów prawnych lub *C*3 – Strategiczne priorytety zjednoczonej Europy określone poziomem współpracy międzynarodowej i kwotą przekazywanych funduszy.

Tablica 19. *Minimalna kombinacja mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny*

Lp.	Trend mezoczynników analizy	Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza neutralnego, %
1.		100
2.		100
3.		100
4.		99,7
5.		97,0

Lp.	Trend mezoczynników analizy	Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza neutralnego, %
6.		93,8
7.		90,2
8.		88,2
9.		88,2
10.		86,7
11.		83,8
12.		83,7
13.		73,6
14.		70,9
15.		59,7

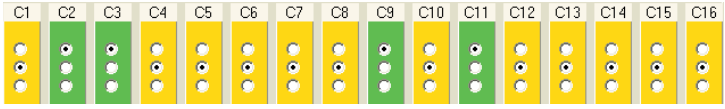
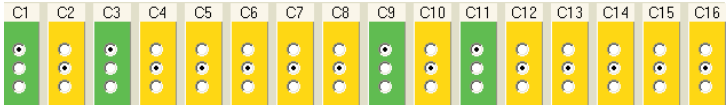
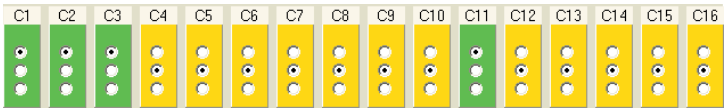
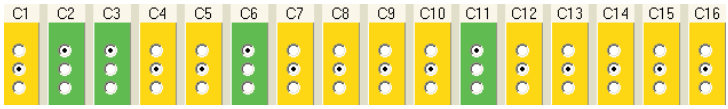
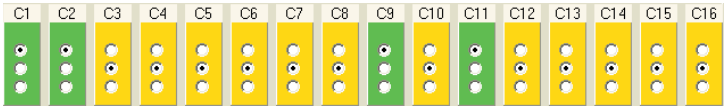
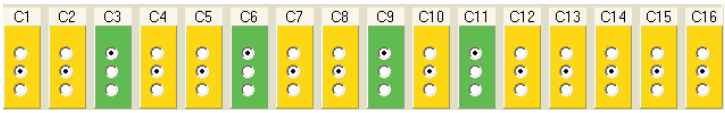
Legenda:

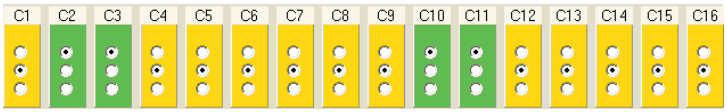
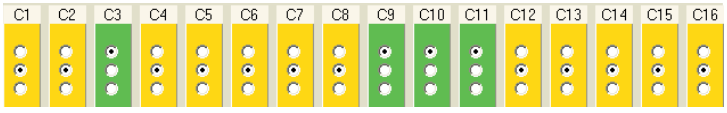
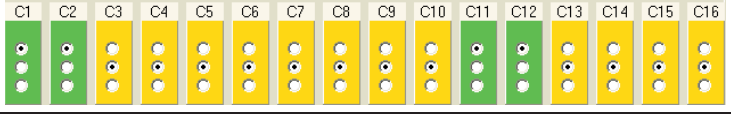
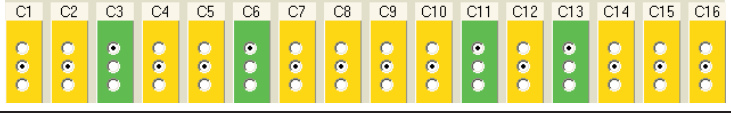
Trend wzrostowy

Trend spadkowy

Celem drugiej grupy eksperymentów było określenie mezoczynników, które wpłyną na zmianę makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny wraz z określeniem wartości prawdopodobieństwa tego zdarzenia. Zmienne niezależne mogą przyjmować wartość ze zbioru {0, 1}, co odpowiada zmianie trendu badanych mezoczynników z neutralnego na wzrostowy. Ponownie przyjęto założenie, że poszukiwana jest minimalna liczba zmieniających się trendów, dotyczących poszczególnych mezoczynników. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów odnaleziono 16 różnych kombinacji, w których 4 mezoczynniki równocześnie zmieniły wartość z 0 na 1 (tabl. 20) oraz 152 takie kombinacje z udziałem 5 mezoczynników. Analiza wyników eksperymentów symulacyjnych wykazuje największe prawdopodobieństwo (94,9%) zmiany makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny, w przypadku gdy nastąpi

Tablica 20. *Minimalna kombinacja mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny*

Lp.	Trend mezoczynników analizy	Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza optymistycznego, %
1.		94,9
2.		90,4
3.		85,4
4.		83
5.		80,5
6.		77,7

Lp.	Trend mezoczynników analizy	Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza optymistycznego, %
7.		74,9
8.		72,8
9.		68,4
10.		67,8
11.		60,8
12.		59,1
13.		57,3
14.		55,6
15.		50,2
16.		50,1

Legenda:

Trend wzrostowy

Trend neutralny

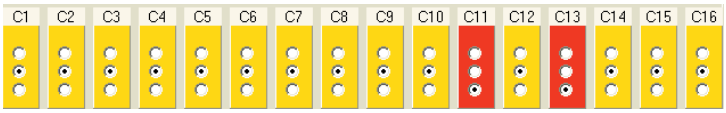
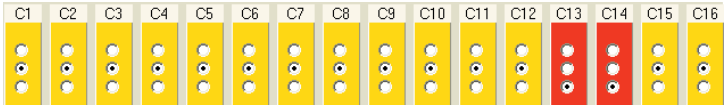
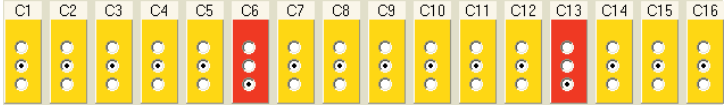
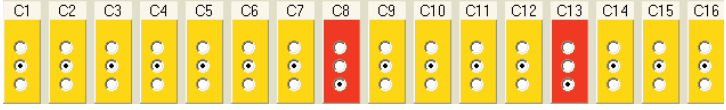
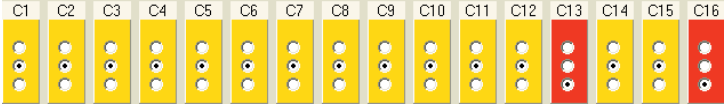
równoczesna zmiana trendów z neutralnych na wzrostowe, dotyczących następujących mezoczynników: *C*2 – Przyjazność i przejrzystość przepisów prawnych; *C*3 – Strategiczne priorytety zjednoczonej Europy określone poziomem współpracy międzynarodowej i kwotą przekazywanych funduszy; *C*9 – Dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnianie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach oraz *C*11 – Znaczenie technologii proekologicznych dla poprawy funkcjonalności, wydłużenia żywotności i możliwości recyklingu.

Ostatnia grupa eksperymentów miała na celu wyłonienie mezoczynników, które wpłyną na zmianę makroscenariusza z neutralnego na pesymistyczny wraz z określeniem wartości prawdopodobieństwa wystąpienia tego zdarzenia. Zmienne niezależne, w przypadku tych eksperymentów, mogą przyjmować wartość ze zbioru {0, -1}, co odpowiada zmianie trendu badanych mezoczynników z neutralnego na spadkowy. Podobnie jak podczas pozostałych eksperymentów przyjęto założenie, że poszukiwana jest minimalna liczba zmieniających się trendów, dotyczących poszczególnych mezoczynników. Wykonane eksperymenty doprowadziły do wyznaczenia 5 różnych kombinacji, w których 2 mezoczynniki równocześnie zmieniły wartość z 0 na -1 (tabl. 21) oraz 63 takie kombinacje z udziałem 3 mezoczynników.

Zgodnie z wynikami eksperymentów symulacyjnych najbardziej prawdopodobna (94,1%) jest zmiana makroscenariusza z neutralnego na pesymistyczny przy równoczesnej zmianie trendów z neutralnych na pesymistyczne, dotyczących następujących mezoczynników: *C*11 – Znaczenie technologii proekologicznych dla poprawy funkcjonalności, wydłużenia żywotności i możliwości recyklingu oraz C13 – Znaczenie technologii podwyższających własności mechaniczne, trybologiczne i antykorozyjne warstw wierzchnich.

Uzupełnieniem i potwierdzeniem badań symulacyjnych są wyniki badań heurystycznych (liczebność próby: 227) (rys. 127) przeprowadzonych metodą e-Delphix, zgodnie z którymi za najistotniejsze mezoczynniki, determinujące możliwość zaistnienia w ciągu najbliższych 20 lat optymistycznego scenariusza rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, eksperci uznali: poziom współpracy pomiędzy środowiskami naukowymi i przemysłowymi (90%), liczbę specjalistycznych laboratoriów i placówek badawczo-rozwojowych (76%), wzrost znaczenia technologii wytwarzania nanomateriałów (75%) i materiałów gradientowych (70%), a także dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnienie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia priorytetowych innowacyjnych technologii w małych i średnich przedsiębiorstwach (68%).

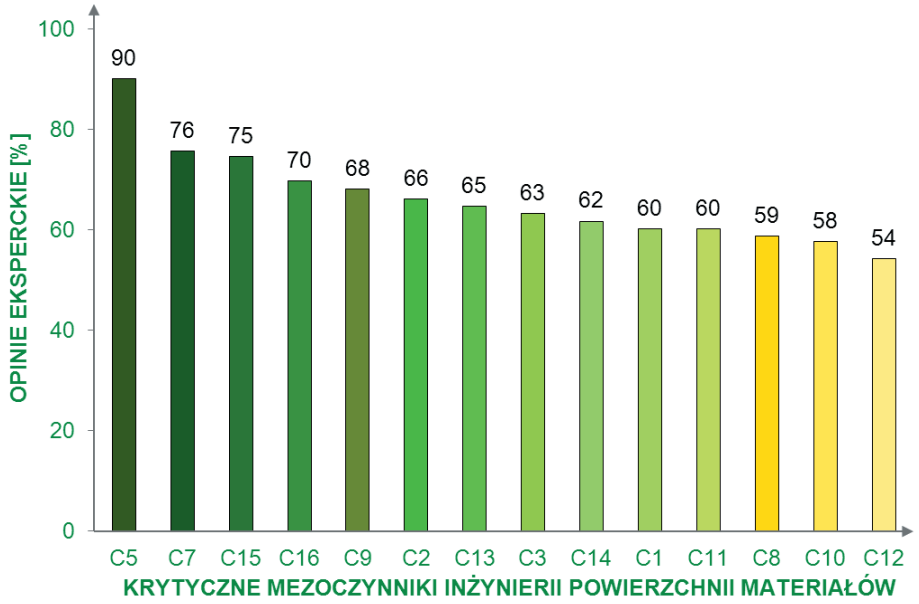
Tablica 21. *Minimalna kombinacja mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroscenariusza z neutralnego na pesymistyczny*

Lp.	Trend mezoczynników analizy	Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza pesymistycznego, %
1.		94,1
2.		92,7
3.		80,3
4.		66,5
5.		52,0

Legenda:
Trend neutralny
Trend spadkowy

Spośród analizowanych mezoczynników najniżej oceniono wpływ znaczenia technologii alternatywnych, w tym hybrydowych na zaistnienie w przyszłości optymistycznego scenariusza wydarzeń, natomiast należy zauważyć, że pomimo przyznania oceny najniższej, ponad połowa (54%) respondentów potwierdziło tezę, że czynnik ten jest kluczowy i istotny dla przyszłości inżynierii powierzchni materiałów.

Przeprowadzone eksperymenty symulacyjne, opisane w podrozdziałach 7.1 i 7.2 niniejszej pracy, stanowiące reprezentatywne przykłady dużo szerszych badań, wykazują, że zasadne jest stosowanie sieci neuronowych do analizy wzajemnych oddziaływań pomiędzy zdarzeniami w ramach kreowania wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń. Zastosowanie tego narzędzia sztucznej inteligencji pozwala na określenie zależności pomiędzy



Rysunek 127. *Wyniki badań heurystycznych przedstawiające wyrażoną w procentach liczbę odpowiedzi potwierdzających prawdziwość tezy, że dany czynnik jest kluczowy i jego znaczenie powinno bezwzględnie wzrastać, aby w ciągu najbliższych 20 lat miał szansę zaistnieć optymistyczny scenariusz rozwoju inżynierii powierzchni materiałów*

zaistnieniem z określonym prawdopodobieństwem każdego z rozpatrywanych alternatywnych makroscenariuszy a wariantami zmiany poszczególnych obszarów tematycznych lub mezoczynników, biorąc pod uwagę fakt, że ich znaczenie może w założonym horyzoncie czasowym rosnąć, pozostawać na ustabilizowanym poziomie lub maleć. Eksperymentalny i nowatorski pomysł implementacji sieci neuronowych do kreowania scenariuszy przyszłych wydarzeń wiązał się z napotkaniem wszystkich trudności, które spotykają pionierów. Główne wyzwanie stanowiła specyfika danych wejściowych w postaci wyrażonych ilościowo (w procentach) opinii ekspertów. Spotykana rozbieżność oceny zjawisk wynikała z jej subiektywności, wpisanej w specyfikę badań eksperckich. W szczególności eksperci, zapewne w sposób niezamierzony, z jednej strony starali się reprezentować interesy własnych środowisk, a z drugiej strony na zagadnienia o dużym poziomie ogólności (skala makro i mezo) niejednokrotnie spoglądali przez pryzmat swojej znacznie węższej specjalizacji.

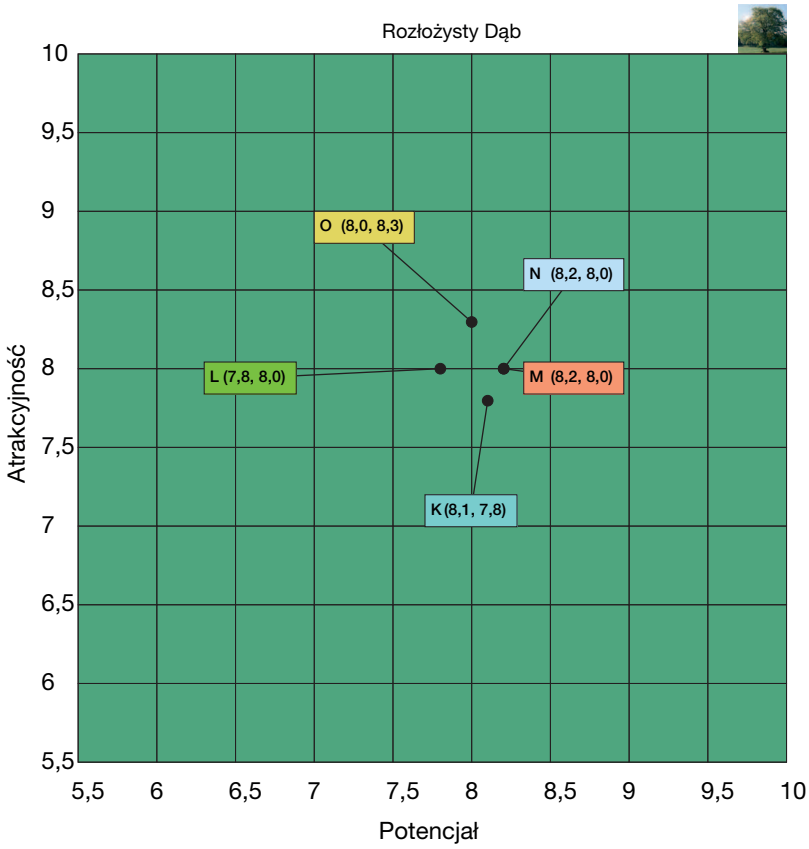
8. Utylitarne znaczenie wyników wykonanych prac naukowo-badawczych i nowo opracowanej metodologii

Mając na uwadze utylitarne znaczenie wykonanych badań, należy podkreślić możliwość, potrzebę i konieczność ich implementacji w rzeczywistości gospodarczej, co analogicznie jak same badania może odbywać się na różnych poziomach ogólności. Na poziomie **makro** wyniki badań mogą być wykorzystane przez decydentów w procesie strategicznego długofalowego planowania rozwoju kraju i gospodarki, z uwzględnieniem znaczącej roli inżynierii materiałowej, w tym zwłaszcza inżynierii powierzchni materiałów. Metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju, cechująca się uniwersalnością i oryginalną formułą, może zostać z powodzeniem zaimplementowana na poziomie **mezo** do realizacji innych foresightów technologicznych, tematycznych i środowiskowych, jak i w innych obszarach zarządzania wiedzą i informacją, w których zastosowanie nowoczesnych systemów informacyjnych stanowi perspektywiczne, nowoczesne i efektywne podejście, służące do wykorzystania aktualnie dostępnego potencjału gospodarczego, systemowego, technologicznego, finansowego i społecznego, podczas urzeczywistniania strategicznych celów rozwojowych. Praktycznej implementacji wyselekcjonowanych nowoczesnych technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich i generalnie technologii procesów materiałowych oraz przetwórstwa materiałów inżynierskich na poziomie **mikro**, wpisującej się w komputerowo wspomagane zarządzanie wiedzą, służy natomiast nowo opracowana koncepcja **e-transferu technologii** [99, 161, 175], obejmująca e-doradztwo, e-szkolenie i e-informację, stanowiąca rozwinięcie idei e-foresightu [180-183]. E-transfer technologii ma być realizowany na bieżąco, bez żadnych ograniczeń i bezpłatnie, z wykorzystaniem ogólnodostępnej platformy internetowej. Nowe centrum transferu technologii, stanowiące grupę Pracowni i Zespołów Tematycznych, ma wykonywać zadania polegające na transferze technologii, jednak bez świadczenia usług, udostępniając na odpowiednio opracowanej platformie internetowej informacje i wiedzę dotyczącą materiałów inżynierskich oraz technologii procesów materiałowych i obróbki powierzchni, wynikające z wykonanych badań e-foresightowych oraz bieżącego monitorowania problemów materiałoznawczych, bez dedykowania oferty konkretnym odbiorcom. Ma to przyczynić się do szerokiego rozpowszechnienia otrzymanych wyników badań e-foresightowych i kontynuacji debaty publicznej, dotyczącej tej tematyki. Długoterminowe efekty prawidłowo wykonanych, rozpowszechnionych

na szeroką skalę i zaimplementowanych w przemyśle badań e-foresightowych powinny przyczynić się do przyspieszenia zrównoważonego rozwoju kraju i Europy, wzmocnienia gospodarki opartej na wiedzy i innowacji oraz statystycznego wzrostu jakości technologii stosowanych w przemyśle [185].

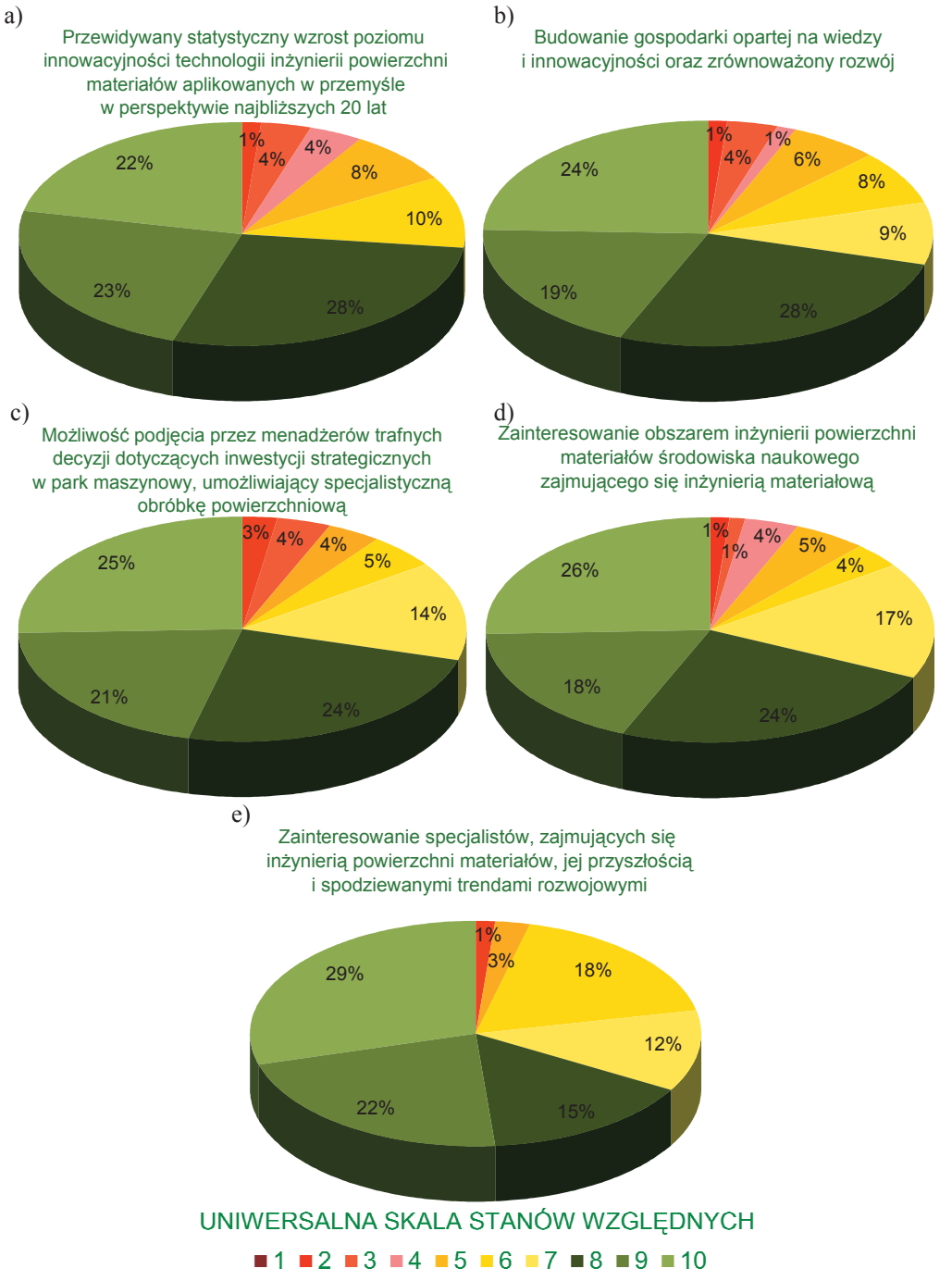
Nowo opracowane metody służące prognozowaniu rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, wpływ wykonanych badań na wyselekcjonowane makroczynniki i ich utylitarne znaczenie, jak również przydatność nowoczesnej technologii informacyjnej i Internetu do realizacji zakrojonych na szeroką skalę badań foresightowych poddano ocenie heurystycznej, poprzedzonej prezentacją podczas panelu eksperckiego, metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów i wyników badań materiałoznawczo-heurystycznych wykonanych z jej zastosowaniem. W panelu tym uczestniczyło ogółem 78 krajowych i zagranicznych przedstawicieli Świata Nauki, specjalistów zajmujących się inżynierią powierzchni materiałów, w tym 35 Profesorów i 43 Doktorów nauk technicznych [159].

Nowo opracowane metody prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów zostały ocenione według dwóch kryteriów: przydatności do identyfikacji priorytetowych innowacyjnych technologii oraz kierunków badań strategicznych, a także poziomu ich nowości i innowacyjności, w odniesieniu do innych metod stosowanych dotychczas w trakcie realizacji tego typu badań. Wyniki badań ankietowych naniesiono na macierz dendrologiczną, która, zgodnie z wyjaśnieniem znajdującym się w podrozdziale 5.1 niniejszej pracy, doskonale nadaje się do prezentacji tego rodzaju wyników. W rozpatrywanym przypadku przyjęto, że przydatność nowo opracowanych metod jest miarą ich potencjału (oś x), natomiast poziom nowości i innowacyjności tych metod to miara ich atrakcyjności (oś y). Zarówno potencjał, jak i atrakcyjność metod służących prognozowaniu rozwoju oceniono wysoko w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, każdorazowo na ok. 8 punktów, stąd zostały one umieszczone w najbardziej obiecującej ćwiartce macierzy dendrologicznej, zwanej rozłożystym dębem (rys. 128). Zdaniem ankietowanych ekspertów największym potencjałem charakteryzują się: macierz strategii dla technologii wraz ze ścieżkami rozwoju strategicznego N (8,2, 8,0) oraz Księga Technologii Krytycznych obejmująca mapy drogowe i karty informacyjne technologii M (8,2, 8,0). Za najbardziej atrakcyjną metodę uznano natomiast wspomagane sieciami neuronowymi kreowanie alternatywnych scenariuszy przyszłych wydarzeń O (8,0, 8,3).

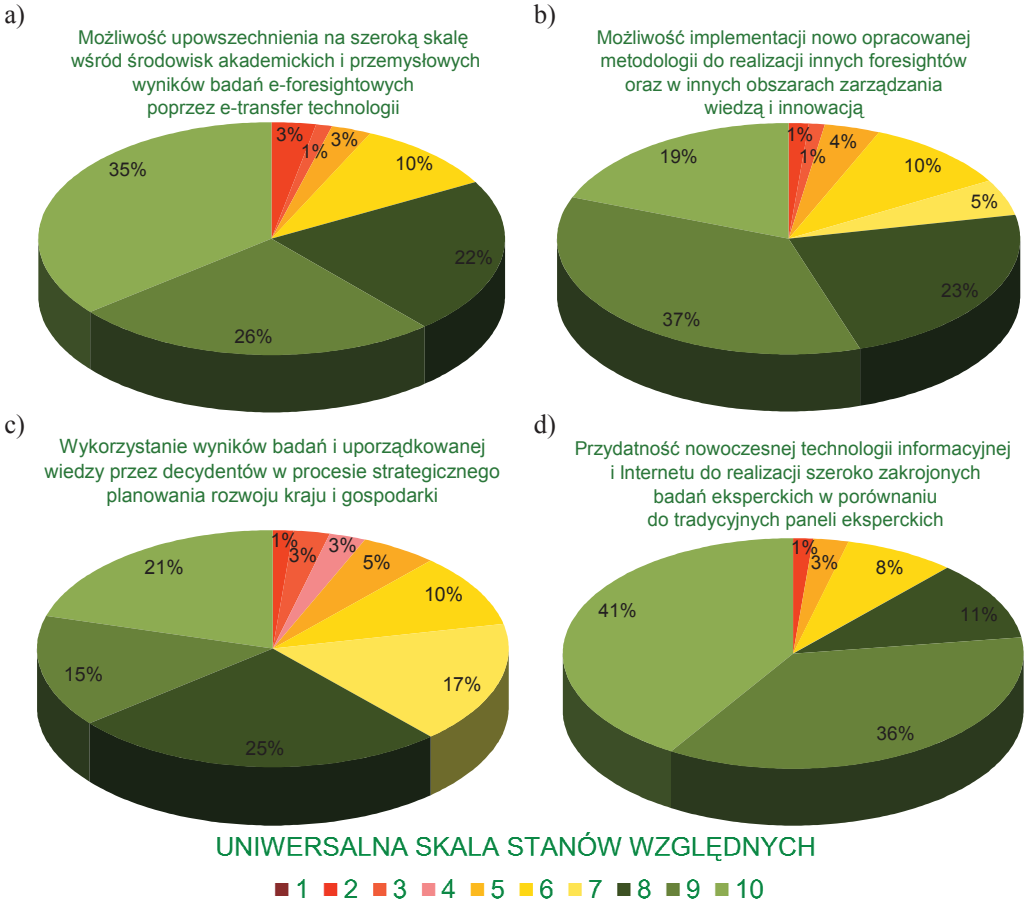


Rysunek 128. *Wyniki oceny eksperckiej nowo opracowanych metod prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów; oznaczenia: (K) e-Delphix, (L) Macierze dendrologiczna i meteorologiczna, (M) Macierz strategii dla technologii wraz ze ścieżkami rozwoju strategicznego, (N) Księga Technologii Krytycznych, (O) Wspomagane sieciami neuronowymi kreowanie alternatywnych scenariuszy przyszłych wydarzeń*

Ocenie poddano również wpływ badań służących prognozowaniu rozwoju inżynierii powierzchni materiałów na wyselekcjonowane makroczynniki. Zgodnie z wynikami ankiet wykonane badania materiałoznawczo-heurystyczne najistotniej wpływają pozytywnie na statystyczny wzrost poziomu innowacyjności technologii inżynierii powierzchni materiałów implementowanych w przemyśle (73% ocen z przedziału ⟨8, 10⟩) (rys. 129a). Obserwowane jest także ich pozytywne oddziaływanie na budowanie gospodarki opartej na wiedzy i innowacji oraz zrównoważony rozwój (70%) (rys. 129b), możliwość podjęcia przez menadżerów trafnych decyzji inwestycyjnych (70%) (rys. 129c), zainteresowanie inżynierią powierzchni wśród specjalistów reprezentujących dyscyplinę inżynieria materiałowa (68%)



Rysunek 129. *Wyniki badań eksperckich dotyczących oceny wpływu badań służących prognozowaniu rozwoju na analizowany czynnik*



Rysunek 130. *Wyniki badań eksperckich dotyczących oceny utylitarnego znaczenia wykonanych badań i zgromadzonej w wyniku ich realizacji szerokiej wiedzy oraz przydatności nowoczesnej technologii informacyjnej i Internetu do realizacji tych badań*

(rys. 129d), jak również specjalistów zajmujących się inżynierią powierzchni materiałów – jej przyszłością i spodziewanymi trendami rozwojowymi (66%) (rys 129e).

Ocenie eksperckiej poddano także utylitarne znaczenie wykonanych badań oraz zgromadzonej w wyniku ich realizacji uporządkowanej i przedstawionej w ujednoliconej, przejrzystej formie szerokiej wiedzy dotyczącej technologii inżynierii powierzchni materiałów. Ankietowani eksperci najwyżej ocenili możliwość upowszechnienia na szeroką skalę wśród środowisk akademickich i przemysłowych wyników badań e-foresightowych poprzez e-transfer technologii (83% ocen z przedziału ⟨8, 10⟩) (rys. 130a). Podobnie wysoko oceniono możliwość implementacji nowo opracowanej metodologii do realizacji innych foresightów

technologicznych, tematycznych i środowiskowych oraz w innych obszarach zarządzania wiedzą i informacją (78%) (rys. 130b). Najbardziej sceptycznie (61%) eksperci odnieśli się do możliwości wykorzystania wyników badań i uporządkowanej wiedzy przez decydentów w procesie strategicznego planowania rozwoju kraju i gospodarki (rys. 130c), co świadczy o ograniczonym zaufaniu Środowiska Naukowego do przedstawicieli Świata Polityki, a w kontekście koncepcji naukowego prognozowania, zarządzania i kształtowania przyszłości, wymagającej współpracy na linii Nauka-Polityka, powinno to w przyszłości ulec zmianie.

Ocena ekspercka wykazała ponadto jednoznacznie pozytywną ocenę przydatności nowoczesnej technologii informacyjnej i Internetu do realizacji szeroko zakrojonych badań eksperckich, w porównaniu do tradycyjnych paneli eksperckich (88% ocen z przedziału $\langle 8, 10\rangle$) (rys. 130d), co świadczy o rozpowszechnionym nowoczesnym spojrzeniu i szerokiej świadomości, że w dzisiejszych czasach postęp jest nierozłącznie związany z komputeryzacją coraz to nowszych dziedzin życia i obszarów wiedzy.

Udana aplikacja metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju w obszarze inżynierii powierzchni materiałów, zachęca do jej rozwoju i rozszerzenia badań na inne obszary inżynierii materiałowej i nauki o materiałach, jak również na zupełnie inne dziedziny wiedzy szczegółowej, co wymaga jednak uprzedniego zebrania odpowiednio licznych i wartościowych danych źródłowych od szerokiego grona ekspertów. O zasadności realizacji badań, służących prognozowaniu rozwoju w odniesieniu do kolejnych pól badawczych, decydują przesłanki ekonomiczne, bowiem nowo opracowana metodologia, wsparta rozbudowaną technologią informacyjną, jest możliwa do bezpośredniej aplikacji w innym obszarze, a koszt nawet pełnego trzyetapowego cyklu badań heurystycznych, obejmujący jedynie wynagrodzenia wiodących, kluczowych i branżowych ekspertów, jest nieporównywalnie niższy niż koszt klasycznych badań materiałoznawczych pozwalających na osiągnięcie tożsamych wyników. Nakłady na eksperymenty materiałoznawcze obejmują bowiem, w minimalnym wariancie, wynagrodzenia pracowników naukowo-badawczych, materiał do badań i eksploatację aparatury naukowo-badawczej, natomiast często rosną wykładniczo, gdy badania wymagają zakupu nowej lub uzupełnienia o dodatkowe moduły funkcjonalne istniejącej aparatury, wykonania całości lub części prac w zagranicznych uczelniach, konieczności powtórzenia lub poszerzenia zakresu eksperymentów w celu uzyskania jednoznacznych wyników, jak również testowania wyników badań w warunkach przemysłowych.

9. Podsumowanie i wnioski końcowe

Niniejsza praca własna dedykowana jest opracowaniu metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów. U podstaw zainteresowania tą tematyką stoi, uzasadnione wieloma praktycznymi przykładami, przekonanie o możliwości osiągania zasadniczych obecnie celów cywilizacyjnych dzięki rozwojowi inżynierii materiałowej, stawiającej do dyspozycji producentów dóbr zaspokajających ludzkie potrzeby, praktycznie nieograniczoną liczbę nowoczesnych materiałów inżynierskich oraz związanych z tym technologii procesów materiałowych. Zaspokojenie potrzeb klienta wymaga zaprojektowania i zastosowania materiałów inżynierskich, które, poddane odpowiednim procesom technologicznym kształtowania postaci geometrycznej, a szczególnie struktury, zapewniającym odpowiednie własności fizykochemiczne materiału, zagwarantują tym samym oczekiwane funkcje użytkowe wytworzonych z nich produktów (por. rozdział 1.). Należy zauważyć, że w ostatnich latach zasadniczej zmianie uległy relacje producent-klient, o czym świadczy wymagane dostarczanie materiałów o żądanej strukturze i własnościach fizykochemicznych, spełniających wymagania funkcjonalne, zdeterminowane przez oczekiwania klienta i funkcje użytkowe produktów (ang.: *materials on demand*). A zatem reguły rynku producentów materiałów wyraźnie ustąpiły miejsca rynkowi klienta, pomimo że jeszcze kilka lat wstecz produkty rynkowe były wytwarzane wyłącznie z materiałów inżynierskich o składzie chemicznym, strukturze i własnościach, a nawet wymiarach narzuconych bezwzględnie przez harmonogramy i plany produkcyjne wytwórców ograniczonej – z natury rzeczy – liczby materiałów inżynierskich. W tymże samym okresie oczywiste stało się, że bardzo często projektowanie, a w konsekwencji wytwarzanie produktów użytkowych, nie jest związane z wymaganiami stawianymi składowi chemicznemu, strukturze i własnościom rdzenia materiału, a właściwie produktu lub jego elementu, lecz ich powierzchni, a właściwie warstwie powierzchniowej. Zapewnienie oczekiwanych własności w równym stopniu na całym przekroju produktu nie znajduje bowiem racjonalnego uzasadnienia w obliczeniach inżynierskich i rzeczywistych wymaganiach (por. rozdział 2.). Najbardziej ogólnym celem tych działań, coraz częściej stosowanych w wielu gałęziach przemysłu, jest uzyskanie w strefie okołopowierzchniowej struktury zbliżonej do kompozytowej, co w wyniku wielodziesięcioletnich doświadczeń badawczych i technologicznych doprowadziło do rozwoju licznych technologii kształtowania struktury warstwy powierzchniowej, nanoszenia

powłok, w tym wielo-, a nawet kilkusetwarstwowych, a także wytwarzania materiałów powierzchniowo gradientowych (por. rozdział 2.). Dostosowywanie własności (ang.: *tailoring*) różnych elementów do wymogów eksploatacyjnych uzyskuje się zatem poprzez odpowiedni dobór materiału rdzenia i technologii zapewniających jego własności (np. obróbki cieplnej lub cieplno-plastycznej) i przez równoczesny wybór technologii obróbki warstwy powierzchniowej. Problematyka ta stanowi także przedmiot stałego i coraz większego zainteresowania ośrodków naukowych w całym świecie. Pełny przegląd współczesnych technologii obróbki, decydujących o kształtowaniu struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich, również tych wykazujących strukturę nanometryczną, dokonany syntetycznie w ramach niniejszej pracy (por. rozdział 2.) i szczegółowo we własnej publikacji książkowej [99], wskazuje, że dotychczas opracowano ponad 500 szczegółowych technologii obróbki powierzchniowej, i ich liczne odmiany technologiczne, w odniesieniu do wszystkich podstawowych grup materiałów inżynierskich. O ile klasyczne z tych technologii są szeroko i systematycznie opisane w literaturze przedmiotu, o tyle wiele nowoczesnych i szczegółowych metod technologicznych inżynierii powierzchni wymaga takiego usystematyzowania i hierarchizacji. Problem ma ważne znaczenie poznawcze, ale nade wszystko gospodarcze, gdyż jego praktyczne aspekty dotyczą zarówno stosunkowo mało licznych dużych przedsiębiorstw, jak i większości producentów przemysłowych, skupionych w mikro-, małych i średnich przedsiębiorstwach.

Wybór konkretnej technologii pociąga za sobą każdorazowo odpowiedni dobór, na ogół kosztownej, aparatury technologicznej i niezbędnej infrastruktury przemysłowej, o przeciętnym czasie amortyzacji sięgającym ok. 20 lat. Trafność wyboru technologii, wraz z właściwymi decyzjami dotyczącymi poczynionych inwestycji czyni bardzo odpowiedzialnymi decyzje menadżera, które w długiej perspektywie czasowej przesądzają o sukcesie lub porażce kierowanego przez niego przedsiębiorstwa. W związku z tym, identyfikacja priorytetowych innowacyjnych technologii i pożądanego ich rozwoju, wraz ze wskazaniem produktów, dla których należy je zastosować, oraz ustalenie trendów rozwojowych tych technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich, a także kierunków badań strategicznych w tym zakresie, w długookresowej perspektywie co najmniej przyszłego 20-lecia, ma kluczowe znaczenie dla długofalowego rozwoju gospodarczego i decyduje o konkurencyjności gospodarki krajowej (por. rozdział 1.).

Metoda prób i błędów nie może być stosowana przy podejmowaniu tak ważnych decyzji, co stwarza konieczność opcjonalnej aplikacji w tym obszarze metody wiarygodnych badań naukowych nad perspektywami rozwoju nauki i technologii. Szerokie spektrum metod wspomaganego naukowo prognozowania, kształtowania i zarządzania przyszłością, stosowanych praktycznie w różnorodnych obszarach, pomimo że obarczone ryzykiem, stanowi korzystną alternatywę dla metody prób i błędów w podejmowaniu omawianych decyzji, z tego względu krótko-, średnio- i długoterminowe prognozowanie jest współcześnie obecne w wielu dziedzinach życia, nauki i gospodarki (por. rozdział 2.).

Złożony aparat metodologiczny – służący do diagnozowania kluczowych problemów naukowych, technologicznych, gospodarczych i ekologicznych w obszarze inżynierii powierzchni materiałów inżynierskich, określenia kierunków jej rozwoju strategicznego oraz wspomagania procesu podejmowania decyzji – zasadniczo dotyczy trzech wzajemnie przenikających się dziedzin wiedzy: inżynierii powierzchni materiałów, wchodzącej w skład inżynierii materiałowej; foresightu technologicznego, jako ogółu działań zmierzających do wybrania najkorzystniejszej wizji przyszłości oraz wskazania dróg jej realizacji, należącego do dziedziny organizacji i zarządzania, a także technologii informacyjnej, wywodzącej się z informatyki. Niektóre etapy badań wymagały jednak znacznie szerszego spojrzenia na rozpatrywane zagadnienia, i sięgnięcie do aparatu metodologicznego innych dyscyplin nauki, jak choćby statystyki, ekonometrii, badań operacyjnych bądź też zarządzania strategicznego. Jako cel pracy postawiono zatem opracowanie oryginalnej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, z wykorzystaniem badań strukturalnych oraz własności mechanicznych i innych własności fizykochemicznych materiałów obrobionych z użyciem różnych technologii kształtowania struktury i własności warstw wierzchnich i powłok różnych materiałów inżynierskich oraz badań heurystycznych strategicznego zarządzania wiedzą, w tym macierzy kontekstowych, mapowania drogowego technologii, wieloetapowego badania opinii ekspertów i oceny wzajemnych oddziaływań wspomaganych technologią informacyjną obejmującą organizację wirtualną, platformę internetową oraz sztuczne sieci neuronowe w powiązaniu z modelowaniem metodą Monte Carlo (por. rozdział 3.). Przyjęto założenie, że perspektywy rozwojowe poszczególnych technologii można określić klasycznymi metodami inżynierii materiałowej poprzez serię komplementarnych badań materiałoznawczych z wykorzystaniem wielu specjalistycznych metod

badawczych, stosując wnioskowanie przyjęte w tej dyscyplinie nauki (por. rozdział 5.). Wykazano przez analizę 8 szczegółowych studiów przypadku [161], że równie wartościowe wnioski, dotyczące perspektyw rozwojowych, można wyciągnąć na podstawie nowo opracowanej autorskiej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów (por. rozdział 5.) z użyciem, dedykowanych temu zadaniu, macierzy kontekstowych (plansze 1-3). Dokonując wyboru technologii do analizy, w ramach poszczególnych studiów przypadku, celowo je zróżnicowano pod kątem fazy cyklu życia, aktualnego zakresu zastosowań przemysłowych, jak i materiału do badań. W grupie analizowanych technologii są zatem zarówno technologie młode (embrionalne, eksperymentalne, prototypowe, wzrostowe), jak i znajdujące się na różnych etapach dojrzałości lub nawet schyłkowe, które jak dotychczas w przemyśle stosuje się jedynie w skali laboratoryjnej lub półtechnicznej, a także takie, które, wręcz przeciwnie – znajdują szerokie zastosowanie praktyczne. Wyniki serii własnych badań materiałoznawczo-heurystycznych umożliwiły pozytywną weryfikację poprawności nowo opracowanej metodologii (por. rozdział 5.), która jest przydatnym i efektywnym narzędziem prognozowania rozwoju, nadającym się do zastosowania w obszarze inżynierii powierzchni materiałów, co w pełni uzasadnia jej wykorzystywanie w toku dalszych badań. Upewniwszy się drogą doświadczalną, że badania heurystyczne pozwalają na otrzymanie wiarygodnych wyników, umożliwiających wytyczenie prognozowanych trendów rozwojowych analizowanych grup technologii i określenie ich pozycji strategicznej na tle innych grup technologii i inżynierii powierzchni materiałów, bez konieczności wspierania ich klasycznymi badaniami materiałoznawczymi, zastosowano je, w celu określenia pozycji strategicznej i kierunków rozwojowych, w odniesieniu do 140 technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów, rozumianych jako priorytetowe technologie o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w założonym horyzoncie czasowym 20 lat.

Wygenerowany zbiór technologii krytycznych poddano badaniom eksperckim według koncepcji e-foresightu z użyciem metody e-Delphix, zapożyczającej ogólny zamysł kilkuetapowego ankietowania ekspertów z klasycznej metody delfickiej, lecz znacznie odbiegającej od niej zarówno metodologicznie, jak i z uwagi na towarzyszącą jej rozbudowaną technologię informacyjną, umożliwiającą wykonanie w cyberprzestrzeni wielowątkowych, wielopoziomowych i wieloetapowych badań heurystycznych (por. rozdział 4.). Elektroniczna

ankietyzacja obejmowała grupę blisko 400 ekspertów wywodzących się ze środowisk akademickich, przemysłowych i administracji publicznej, którzy wypełnili ogółem ok. 800 złożonych wielopytaniowych kwestionariuszy ankietowych, utworzonych każdorazowo i elektronicznie wyedytowanych *on-line* w kilkunastu wersjach, dotyczących odrębnie każdego z analizowanych obszarów tematycznych w trzech kolejnych iteracjach badań. Nowoczesnym badaniom eksperckim, prowadzonym drogą elektroniczną, towarzyszyły tradycyjne dyskusje tematyczne podczas 10 paneli eksperckich z udziałem krajowych i zagranicznych uczestników, jak i międzynarodowej konferencji poświęconej w całości wyłącznie temu zagadnieniu (por. rozdział 4.).

W wyniku wykonania licznych interdyscyplinarnych badań o charakterze materiałoznawczym, heurystycznym i informatycznym, a także na styku tych dziedzin oraz przeprowadzenia licznych analiz i studiów przypadku z użyciem szerokiego wachlarza metod, zarówno już wcześniej znanych i jedynie oryginalnie zestawionych (por. rozdział 3.), jak i opracowanych w ramach prac własnych (por. rozdział 4.), udowodniono tezę naukową postawioną w pracy, że w celu ograniczenia ryzyka prognozowania przyszłościowych kierunków rozwoju technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich uzasadnione jest zastosowanie komputerowo zintegrowanej metodologii badań materiałoznawczych i heurystycznych strategicznego zarządzania wiedzą (por. rozdział 3.). Oryginalną koncepcję metodologiczną, której poprawność uprzednio zweryfikowano (por. rozdział 5.), zastosowano do określania pozycji strategicznej 140 grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów zgrupowanych w dwóch polach badawczych reprezentujących alternatywne spojrzenia producenta i klienta – potencjalnego użytkownika produktów (por. rozdział 6.). Podstawę wytypowania tych technologii stanowiła analiza stanu zagadnienia, obejmująca ocenę tego stanu, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi, przeprowadzona w odniesieniu do ok. 500 technologii z wykorzystaniem różnorodnych metod organizacji, pracy i zarządzania, tj. przeglądu piśmiennictwa, analizy danych źródłowych, skanowania środowiska, mapowania technologii i beneficjentów, ekstrapolacji trendów, analizy STEEP, analizy SWOT i innych metod pomocniczych (por. rozdział 3.). Pozyskane drogą elektronicznej ankietyzacji ilościowe dane źródłowe, wyrażone w dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, zostały naniesione na macierze kontekstowe. Dendrologiczna macierz wartości

technologii pozwala na pozycjonowanie danej grupy technologii na tle pozostałych technologii z uwzględnieniem ich potencjału i atrakcyjności (plansza 4). Meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia umożliwia graficzne przedstawienie miejsca każdej z grup technologii z uwzględnieniem pozytywnego i negatywnego oddziaływania na nie czynników bliższego i dalszego otoczenia (plansza 5). Najbardziej złożona szesnastopolowa macierz strategii dla technologii stanowi wypadkową macierzy dendrologicznej i meteorologicznej, pozwalając na określenie, w zależności od wartości technologii i otoczenia, w jakim się ona znajduje, rekomendowanej długofalowej strategii postępowania i przyszłych kierunków rozwoju strategicznego (plansza 6).

Przeprowadzone prace własne dotyczą analizy zbioru różnorodnych czynników, które zakwalifikowano jako: makroczynniki krytyczne o naturze ogólnej, mezoczynniki, oddziałujące umiarkowanie i mikroczynniki szczegółowe, charakteryzujące się wrażliwością na oddziaływanie innych czynników. Na poziomie makro rozpatrzono 3 alternatywne scenariusze przyszłych wydarzeń: optymistyczny, neutralny i pesymistyczny, a w celu ostatecznego wygenerowania wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wariantów wydarzeń, zależnych od określonych warunków lub czynników szczegółowych, wykorzystano siedem, spośród pierwotnie utworzonych dziewięciu, modeli sztucznych sieci neuronowych (por. rozdział 7.). Wykonane eksperymenty symulacyjne wykazały, że zasadne jest stosowanie sieci neuronowych do analizy wzajemnych oddziaływań pomiędzy zdarzeniami w skali makro i mezo, w ramach kreowania wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń, co sprowadza się do określenia zależności pomiędzy zaistnieniem, z określonym prawdopodobieństwem, każdego z rozpatrywanych alternatywnych makroscenariuszy a wariantami zmiany poszczególnych obszarów tematycznych lub mezoczynników (por. rozdział 7.). Podstawę opracowania alternatywnych scenariuszy przyszłych wydarzeń, zależnych od rozwoju poszczególnych obszarów tematycznych oraz wpływu kluczowych mezoczynników, stanowiły wyniki badań eksperckich, które jako zmienne zależne wykorzystano do trenowania sieci neuronowych. Wśród 16 wytypowanych mezoczynników wyróżnić można m.in.: skuteczność działań państwa służących umożliwieniu szerokiego dostępu do informacji dotyczących kluczowych technologii i wyników foresightów technologicznych; przejrzystość i przyjazność przepisów prawnych; strategiczne priorytety zjednoczonej Europy określone poziomem współpracy międzynarodowej i kwotą

przekazywanych funduszy; poziom wpływu potrzeb klienta na funkcje użytkowe i estetyczne produktów oraz produkcję na zlecenie; poziom współpracy pomiędzy środowiskami naukowymi i przemysłowymi; poziom społeczeństwa informacyjnego kształtowany poprzez politykę edukacyjną państwa; liczbę specjalistycznych laboratoriów i placówek badawczo-rozwojowych; dążenie do integracji z wykorzystaniem wiedzy z wielu dziedzin nauki i technologii; dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnienie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach; redukcję kosztów wytwarzania i poprawę własności użytkowych produktów oraz relatywne znaczenie poszczególnych technologii i ich grup. Poziom mikro jest natomiast reprezentowany przez 140 grup technologii krytycznych, których pozycję strategiczną określono poprzez opracowanie zbioru macierzy kontekstowych i wytyczenie ich ścieżek rozwoju strategicznego (por. rozdział 6.). Końcowym efektem wykonanych badań jest także Księga Technologii Krytycznych, na którą składa się zbiór kilkuset map drogowych i kart informacyjnych technologii, stanowiących wygodne narzędzie ich analizy porównawczej pod względem wybranego kryterium materiałoznawczego, technologicznego lub ekonomicznego (por. rozdział 4.).

Utylitarne znaczenie wykonanych badań wiąże się z możliwościami, potrzebą i koniecznością ich implementacji w rzeczywistości gospodarczej, m.in. poprzez nowo opracowaną koncepcję e-transferu technologii, obejmującą e-doradztwo, e-szkolenie i e-informację, stanowiącą rozwinięcie idei e-foresightu. Służy to rozpowszechnieniu otrzymanych wyników badań e-foresightowych i kontynuacji debaty publicznej, a długoterminowe efekty badań e-foresightowych zaimplementowanych w przemyśle na szeroką skalę powinny przyczynić się do przyspieszenia zrównoważonego rozwoju Kraju i Europy, wzmocnienia gospodarki opartej na wiedzy i innowacji oraz statystycznego wzrostu jakości technologii stosowanych w przemyśle (por. rozdział 8.). Utylitarne znaczenie wykonanych badań oraz zgromadzonej tym sposobem wiedzy, dotyczącej technologii inżynierii powierzchni materiałów, także poddano badaniu eksperckiemu. Eksperci najwyżej ocenili możliwość upowszechnienia na szeroką skalę, wśród środowisk akademickich i przemysłowych, wyników badań e-foresightowych poprzez e-transfer technologii oraz możliwość implementacji nowo opracowanej metodologii do realizacji innych foresightów, bądź w innych obszarach zarządzania wiedzą i informacją, natomiast najbardziej sceptycznie odnieśli się do możliwości wykorzystania wyników badań i uporządkowanej wiedzy przez decydentów

w procesie strategicznego planowania rozwoju kraju i gospodarki. Jednoznacznie pozytywnie oceniono natomiast przydatność nowoczesnej technologii informacyjnej i Internetu do realizacji szeroko zakrojonych badań eksperckich, w porównaniu do tradycyjnych paneli eksperckich, co jest dodatkowym potwierdzeniem udowodnionej tezy naukowej niniejszej pracy, dotyczącej zasadności stosowania metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów (por. rozdział 8.). Udana aplikacja metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju w obszarze inżynierii powierzchni materiałów zachęca do jej rozwoju i rozszerzenia badań na inne obszary inżynierii materiałowej i nauki o materiałach, jak również na zupełnie inne dziedziny wiedzy szczegółowej. Koszt pełnego cyklu badań heurystycznych jest przy tym nieporównywalnie niższy niż koszt klasycznych badań materiałoznawczych (por. rozdział 8.).

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz udowodniono tezę postawioną w pracy i sformułowano następujące **wnioski końcowe**:

1. Zasadne jest zastosowanie komputerowo zintegrowanej metodologii badań materiałoznawczych i heurystycznych strategicznego zarządzania wiedzą w celu ograniczenia ryzyka prognozowania przyszłościowych kierunków rozwoju technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich.
2. Badania heurystyczne pozwalają otrzymać wiarygodne wyniki dotyczące prognozowanego rozwoju technologii, bez konieczności każdorazowego wspierania ich wynikami badań materiałoznawczych, co potwierdzono w procesie weryfikacji doświadczalnej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju, przeprowadzonym w odniesieniu do 35 grup technologii rozpatrzonych w ramach wykonanych 8 studiów przypadku, stosując jako punkt odniesienia wyniki szczegółowych eksperymentalnych badań struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich.
3. Metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, obejmując zwarty opis metodologiczny ciągu działań i czynności ukierunkowanych na wyłonienie i przejrzystą ujednoliconą charakterystykę technologii krytycznych, wytyczenie strategicznych kierunków rozwojowych oraz opracowanie wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń, porządkuje proces prognozowania, a także usprawnia go i unowocześnia, dzięki zastosowaniu technologii informacyjnej obejmującej organizację wirtualną, platformę internetową i sztuczne sieci neuronowe.

4. Zasadne jest stosowanie sztucznych sieci neuronowych do kreowania wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń, ponieważ umożliwiają one błyskawiczne wygenerowanie alternatywnych prognoz, w postaci wartości prawdopodobieństwa zaistnienia alternatywnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń zależnych od wystąpienia – rozpatrywanych na poziomie mezo – warunków lub czynników szczegółowych.
5. Istnieje możliwość, potrzeba i konieczność implementacji wyników wykonanych badań w rzeczywistości gospodarczej na poziomie makro, mezo i mikro, a metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju wsparta rozbudowaną technologią informacyjną nadaje się do bezpośredniej aplikacji w innych obszarach wiedzy przy zachowaniu kosztów ekonomicznie uzasadnionych.
6. Długoterminowe efekty wykonanych badań e-foresightowych, szeroko rozpowszechnionych z użyciem Internetu, zgodnie z koncepcją e-transferu technologii, stanowią jeden z zasadniczych czynników przyczyniających się do przyspieszenia zrównoważonego rozwoju Kraju i Europy, wzmocnienia gospodarki opartej na wiedzy i innowacji oraz statystycznego wzrostu jakości technologii stosowanych w przemyśle.

Literatura

1. European Commission, Communication from the Commission EUROPE 2020, A strategy for smart, sustainable and inclusive growth, Brussels, 3.3.2010, http://ec.europa.eu/europe2020/priorities/sustainable-growth/index_en.htm, 2011.
2. European Commission, Research & Innovation, Horizon 2020 thematic workshops, http://ec.europa.eu/research/horizon2020/index_en.cfm?pg=workshops&workshop=all, 2012.
3. European Commission, Research and Innovation, Innovation Union, turning ideas into jobs, green growth and social progress, http://ec.europa.eu/research/innovation-union/index_en.cfm?pg=home, 2012.
4. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, WNT, Warszawa, 2002.
5. M.W. Grabski, Istota inżynierii materiałowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1995.
6. M. Hetmańczyk (red.), Postępy nauki o materiałach i inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002.
7. The Future of Manufacturing in Europe 2015-2020, The Challenge for Sustainability, Materials, Final Report, Groupe CM International, 2003, http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/pro-futman-doc3a.pdf, 2012.
8. F. Brandes, A. Lejour, G. Verweij, F. van der Zee, The Future of Manufacturing in Europe, Final Report, 2007, http://ec.europa.eu/enterprise/policies/industrial-competitiveness/files/industry/doc/future_manufacturing_europe_final_report_en.pdf, 2012.
9. Z. Gawroński, R. Łażewski, Wpływ synergizmu obróbki cieplno-chemicznej i ubytkowej na wytrzymałość zmęczeniowo stykową rolek łożyskowych, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 407-412.
10. J. Pacyna (red.), Metaloznawstwo. Wybrane zagadnienia, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2005.
11. P. Kula, E. Wołowiec, A. Rzepkowski, B. Januszewicz, M. Wentlandt, Możliwości azotowania stali narzędziowych w uniwersalnym piecu próżniowym, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 506-509.
12. J. Michalski, O. Wach, K. Burdyński, Z. Łataś, J. Tacikowski, Perspektywy wykorzystania rozporządzalności azotu jako parametru atmosfery azotującej, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 592-596.
13. J. Ratajski, R. Olik, T. Suszko, J. Dobrodziej, J. Michalski, Design, Control and in Situ Visualisation of Gas Nitriding Processes, Sensors 10/1 (2010) 218-240.
14. T. Frączek, L. Jeziorski, J. Jasiński, K. Sadurski, J. Michalski, Kształtowanie struktury i własności stali EJ961 w procesie azotowania jarzeniowego w porównaniu z azotowaniem gazowym i fluidalnym, Hutnik – Wiadomości Hutnicze 7/8 (2004) 347-351.
15. J.R. Sobiecki, J.J. Kazior, T. Wierzchoń, Niskotemperaturowe azotowanie jarzeniowe spiekanej stali austenitycznej, Inżynieria Materiałowa 26/5 (2005) 434-436.
16. Z. Łataś, J. Michalski, T. Żółciak, M. Betiuk, P. Wach, B. Bogdański, Azotowanie rur grubościennych o małych średnicach otworów, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 541-544.
17. A.H. Deutchman, R.J. Partyka, Practical applications of ion nitiding: a new surface treatment technique, Industrial Heating 55/2 (1988) 30-31.
18. C. Mitterer, F. Holler, D. Reitberger, E. Badisch, M. Stoiber, C. Lugmair, R. Nobauer, T. Muller, R. Kullmer, Industrial applications of PACVD hard coatings, Surface and Coatings Technology 163-164 (2003) 716-722.
19. S. Veprek, M.J.G. Veprek-Heijman, Industrial applications of superhard nanocomposite coatings, Surface and Coatings Technology 202 (2008) 5063-5073.
20. J.M. Lackner, Industrially-scaled large-area and high-rate tribological coating by Pulsed Laser Deposition, Surface and Coatings Technology 200 (2005) 1439-1444.
21. J. Schulte, Nanotechnology: global strategies, industry trends and applications, John Wiley and Sons, 2005.

22. J. Smolik, A. Mazurkiewicz, Rozwój hybrydowych technologii powierzchniowych w oparciu o praktyczne zastosowania przemysłowe, Problemy Eksploatacji 3 (2010) 105-114.
23. S. Borkowski, R. Ulewicz, J. Selejdak, Materiałoznawstwo dla ekonomistów, WNT, Warszawa, 2005.
24. M.M. Szczerek, R. Michalczewski, The problems of application of PVD/CVD thin hard coatings for heavy-loaded machine components, Inżynieria Materiałowa 29/6 (2008) 711-713.
25. J. Nowacki, Spieki metali w budowie maszyn, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1997.
26. Z. Gawroński, Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2006.
27. M. Kupczyk, Inżynieria powierzchni. Powłoki przeciwzużyciowe na ostrza skrawające, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2004.
28. A. Barbacki, M. Kawalec, A. Hamrol, Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel, Journal of Materials Processing Technology 133/1-2 (2003) 21-25.
29. M. Wysiecki, Nowoczesne materiały narzędziowe stosowane w obróbce skrawaniem, WNT, Warszawa, 1997.
30. A.A. Aliev, A.Yu. Ampilogov, A.A. Aliev, Carburizing and nitrocarburizing of auto¬motive part in a fluidized bed, Metal Science and Heat Treatment 51/3-4 (2009) 181-183.
31. A.M. Merlo, The contribution of surface engineering to the product performance in the automotive industry, Surface and Coatings Technology 174-175 (2003) 21-26.
32. J.M. Baek, Y.R. Cho, D.J. Kim, K.H. Lee, Plasma carburizing process for the low distortion of automobile gears, Surface and Coatings Technology 131 (2000) 568-573.
33. J. Jasiński, W. Droś, G. Bartela, J. Jasiński, Warstwa wierzchnia stali węgloutwardzonej po testach zmęczenia mechanicznego, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 442-445.
34. W. Napadłek, W. Przetakiewicz, Laserowe teksturowanie płaszcza tłoka silnika spalinowego, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 637-640.
35. A. Wróbel, B. Kucharska, Optymalizacja obróbki cieplnej powłoki Al-Si na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego, w: J. Pacyna (red.), Prace XXXVIII Szkoły Inżynierii Materiałowej, Krynica – Kraków, 2010, 200-205.
36. B. Mendla, L. Swadźba, M. Hetmańczyk, Kształtowanie struktury kompozytowych powłok Al-AlN na stali martenzytycznej metodą Arc-PVD, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 571-575.
37. M. Yavorska, J. Sieniawski, T. Gancarczyk, Wpływ grubości powłoki platyny na trwałość warstwy alumnidkowej wytworzonej w procesie CVD na podłożu nadstopów niklu Inconel 713 LC i CMSX 4, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 801-806.
38. J. Sieniawski, Kryteria i sposoby oceny materiałów na elementy lotniczych silników turbinowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1995.
39. T. Śleboda, J. Krawczyk, M. Madej, Wpływ umocnienia dyspersyjnego tlenkiem itru stopu FeAl na jego własności tribologiczne, w: J. Pacyna (red.), Prace XXXVIII Szkoły Inżynierii Materiałowej, Krynica – Kraków, 2010, 211-215.
40. E. Krasicka-Cydzik, A. Kaczmarek, K. Arkusz, Rola fosforanów w ulepszaniu warstwy powierzchniowej stopów tytanu stosowanych do celów medycznych, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 485-489.
41. R. Major, J.M. Lackner, P. Wilczek, M. Sanak, M. Sobota, M. Kowalczuk, J. Marczak, K. Maksymow, B. Major, Funkcjonalizacja powierzchniowa pod analogi tkankowe biomateriałów do kontaktu z krwią, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 545-548.
42. S. Mitura, P. Niedzielski, B. Walkowiak, Nanodiam. New technologies for medical applications: studying and production of carbon surfaces allowing for controllable bioactivity, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2006.
43. K. Migacz, J. Chłopek, Analiza wytrzymałościowa i odkształceniowa biomateriałów gradientowych przeznaczonych na implanty, Inżynieria biomateriałów 12/89-91 (2009) 175-178.
44. J. Chłopek, Biomateriały: naśladowanie budowy i odtwarzania funkcji naturalnych struktur biologicznych, w: R. Tadeusiewicz, P. Augustyniak, Podstawy inżynierii biomedycznej, Wydawnictwa AHG, Kraków, 2009, 207-225.

45. J. Sidun, J.R. Dąbrowski, Bone Ingrowth Processes on Porous Metalic Implant, Solid State Phenomena 147-149 (2009) 776-781.
46. M.S. Lubas, L. Jeziorski, J. Jasiński, K. Mendzik, Zmiana odporności korozyjnej materiałów po obróbce powierzchniowej dla zastosowań biomedycznych, Inżynieria Biomateriałów 67-68 (2007) 42-44.
47. K. Pielichowska, S. Błażewicz, Bioactive Polymer/Hydroxyapatite (Nano)composites for Bone Tissue Regeneration, Advances in Polymer Science 232 (2010) 97-207.
48. L. Wojnar, K.J. Kurzydłowski, J. Szala, Quantitative image analysis, w: ASM Handbook, Vol. 9 Metallography and Microstructures, ASM International, Materials Park, Ohio, 2004, 403-427.
49. R. Pampuch, Współczesne materiały ceramiczne, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2005.
50. M. Karolu, E. Rówiński, E. Łągiewka, Structure Studies of Electrodeposited Ni-Mo Alloys with Polymers after Annealing, Solid State Phenomena 130 (2007) 97-100.
51. J. Dobrzański, Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki, Open Access Library 3 (2011) 1-228.
52. B. Formanek, K. Szymański, A. Hernas, Natryskiwane cieplnie powłoki odporne na zużycie erozyjne i korozyjne dla kotłów energetycznych, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 399-402.
53. P. Zięba, J. Wojewoda-Budka: Formation and growth of intermetallic phases in diffusion-soldered Cu/In-Bi/Cu interconnections, Journal of Alloys and Compounds 476 (2009) 164-171.
54. R. Pampuch, S. Błażewicz, G. Górny, Materiały ceramiczne dla elektroniki, Wydawnictwa AGH, Kraków, 1993.
55. J. Ciosek, J.A. Dobrowolski, G.A. Clarke, G. Laframboise, Design and Manufacture of All-Dielectric Nonpolarizing Beam Splitters, Applied Optics 38/7 (1999) 1244-1250.
56. Z. Łataś, T. Żółciak, A. Dębski, J. Michalski, B. Bogdański, Metody obróbki cieplno-chemicznej przewodów luf broni strzeleckiej, Inżynieria Materiałowa 31/4 (2010) 1077-1080.
57. W. Napadłek, T. Burakowski, Wybrane przykłady powierzchniowego teksturowania laserowego, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 633-636.
58. Z. Fang, G. Lockwood, A. Griffo, A dual composite of WC-Co, Metallurgical and Materials Transactions A 30 (1999) 3231-3238.
59. K. Narasihmhan, S.P. Boppana, D.G. Bhat, Development of a graded TiCN coating for cemented carbide cutting tools – a design approach, Wear 188 (1995) 123-129.
60. M. Riabkina-Fishman, E. Rabkin, P. Levin, N. Frage, M.P. Dariel, A. Weisheit, R. Galun, B.L. Mordike, Laser produced functionally graded tungsten carbide coatings on M2 high-speed tool steel, Materials Science and Engineering A 302/1 (2001) 106-114.
61. Y.P. Zhang, Z.R. Zhou, J.M. Cheng, Y.L. Ge, H. Ma, Laser remelting of NiCoCrAlY clad coating on superalloy, Surface and Coatings Technology 79 (1996) 131-134.
62. T. Dümmer, B. Eigenmann, M. Stüber, H. Leiste, D. Löhe, H. Müller, O. Vöhringer, Depth-resolved X-ray analysis of residual stresses in graded PVD coatings of Ti(C,N), Zeitschrift für Metallkunde 90/10 (1999) 780-787.
63. B.A. Movchan, K.Yu. Yakovchuk, Graded thermal barrier coatings, deposited by EB-PVD, Surface and Coatings Technology 188-189 (2004) 85-92.
64. E. Marin, L. Guzman, A. Lanzutti, L. Fedrizzi, M. Saikkonen, Chemical and electrochemical characterization of hybrid PVD + ALD hard coatings on tool steel, Electrochemistry Communications 11 (2009) 2060-2063.
65. T.A. Panaioti, Ion nitriding of tantalum and niobium alloys, Metal Science and Heat Treatment 44/9-10 (2002) 437.
66. M.R. Bayati, R. Molaei, K. Janghorban, Surface alloying of carbon steels from electrolytic plasma, Metal Science and Heat Treatment 53/1-2 (2011) 91-94.
67. S.G. Walton, C. Muratore, D. Leonhardt, R.F. Fernsler, D.D. Blackwell, R.A. Meger, Electron-beam-generated plasmas for materials processing, Surface and Coatings Technology 186 (2004) 40-46.
68. H. Griffiths, C. Xu, T. Barrass, M. Cooke, F. Iacopi, P. Vereecken, S. Esconjauregui, Plasma assisted growth of nanotubes and nanowires, Surface and Coatings Technology 201 (2007) 9215-9220.

69. L.M. Apátiga, E. Rubio, E. Rivera, V.M. Castaño, Surface morphology of nanostructured anatase thin films prepared by pulsed liquid injection MOCVD, Surface and Coatings Technology 201 (2006) 4136-4138.
70. T. Genevès, L. Imhoff, B. Domenichini, P.M. Peterlé, S. Bourgeois, CVD elaboration and in situ characterization of barium silicate thin films, Journal of the European Ceramic Society 30 (2010) 441-446.
71. W. Diehl, V. Sittinger, B. Szyszka, Thin film solar cell technology in Germany, Surface and Coatings Technology 193 (2005) 329-334.
72. M. Langlet, A. Kim, M. Audier, C. Guillard, J.M. Herrmann, Transparent photocatalytic films deposited on polymer substrates from sol-gel processed titania sols, Thin Solid Films 429/1-2 (2003) 13-21.
73. L.A. Dobrzański, Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydanie II zmienione i uzupełnione, WNT, Warszawa, 2006.
74. L.A. Dobrzański, Wprowadzenie do nauki o materiałach, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2007.
75. L.A. Dobrzański, E. Hajduczek, J. Marciniak, R. Nowosielski, Metaloznawstwo i obróbka cieplna materiałów narzędziowych, WNT, Warszawa, 1990.
76. L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz (red.), Analiza istniejącej sytuacji w zakresie rozwoju technologii oraz uwarunkowań społeczno-gospodarczych w odniesieniu do przedmiotu foresightu, Raport z realizacji zadania 2. projektu FORSURF, Gliwice, 2010.
77. L.A. Dobrzański, Kształtowanie struktury i własności materiałów inżynierskich i biomedycznych, International OCSCO World Press, Gliwice, 2009.
78. L. Jeziorski, S. Borkowski (red.), Zarządzanie, doskonalenie, zmiany, Oficyna Wydawnicza Humanitas, Sosnowiec, 2008.
79. B. Bogdański, E. Kasprzycka, J. Tacikowski, J. Senatorski, Z. Łataś, Budowa i właściwości warstwy typu duplex typu CrC+(Ni-W) wytwarzanych w procesie chromowania próżniowego, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 344-347.
80. C.A. Harper, Handbook of Plastics, Elastomers and Composites, McGraw-Hill, New York, 1992.
81. B.G. Wendler, Functional Coatings by PVD or CVD methods, Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute, Radom – Łódź, 2011.
82. H. Wiśniewska-Weinert, N. Sobczak, Application of industrial composite materials designer for upper layers of parts working in difficult operationing conditions, Proceedings of 17th International Scientific and Technical Conference Design and Drawpieces and Die Stampings, Poznań – Wąsowo 2008, http://www.cd.inop.poznan.pl/news/download/weinert-2.pdf.
83. B. Ślusarek, M. Przybylski, Hard and soft magnetic composites with modified magnetic properties, World Journal of Engineering 8 (2011) 87-92.
84. J.J. Wysłocki, Od rudy magnetytu do współczesnych magnesów. Wybrane zagadnienia z inżynierii materiałowej i fizyki magnetyków, Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2004.
85. B. Dytkowicz, J. Bystrzycki, A. Hernas, Z. Bojar, W. Przetakiewicz, Wpływ składu chemicznego stopów na osnowie fazy międzymetalicznej Fe_3Al na odporność korozyjną w środowisku N_2-O_2-SO_2-HCl, Inżynieria Materiałowa 24/4-5 (2003) 218-222.
86. M. Jurczyk, K. Niespodziana, K. Jurczyk, Mechanical and corrosion properties of titanium – hydroxyapatite nanocomposites, Solid State Phenomena 151 (2009) 217-221.
87. M. Danielewski, A. Gusak, B. Wierzba, Korozja w nanoskali: granice międzyfazowe i kinetyka procesu, Ochrona przed korozją 11 (2009) 434-442.
88. A. Czyrska-Filemonowicz, B. Dubiel, A. Wasilkowska, Żaroodporne i żarowytrzymałe stopy ODS umocnione nanocząstkami tlenków, FOTOBIT, Kraków, 2004.
89. L. Swadźba, G. Moskal, B. Mendla, T. Gancarczyk, Characterization of APS TBC system during isothermal oxidation at 1100°C, Archives of Materials Science and Engineering 28/12 (2007) 757-764.

90. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, T. Tański, S. Malara, J. Domagała-Dubiel, Assessment of strategic development perspectives of laser treatment of casting magnesium alloys, Archives of Materials Science and Engineering 45/1 (2010) 5-39.
91. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, K. Lukaszkowicz, Technology validation of coatings deposition onto the brass substrate, Archives of Materials Science Engineering 46/1 (2010) 5-38.
92. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, E. Jonda, K. Labisz, Foresight methods application for evaluating laser treatment of hot-work steels, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 43/2 (2010) 750-773.
93. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, E. Hajduczek, M. Polok-Rubiniec, M. Przybył, K. Adamaszek, Evaluation of selected steel thermochemical treatment technology using foresight methods, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 46/2 (2011) 115-146.
94. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, K. Gołombek, D. Pakuła, J. Mikuła, M. Staszuk, L.W. Żukowska, Long-term development directions of PVD/CVD coatings deposited onto sintered tool materials, Archives of Materials Science and Engineering 49/2 (2011) 69-96.
95. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, A. Drygała, Strategic development perspectives of laser processing on polycrystalline silicon surface, Archives of Materials Science and Engineering 50/1 (2011) 5-20.
96. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, A. Kloc-Ptaszna, B. Dołżańska, Manufacturing technologies of sintered graded tool materials evaluated according to foresight methodology, Archives of Materials Science and Engineering 50/2 (2011) 69-96.
97. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, J. Trzaska, A. Jagiełło, E. Jonda, K. Labisz, Neural networks aided future events scenarios presented on the example of laser surface treatment, Archives of Materials Science and Engineering 51/2 (2011) 69-96.
98. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, P. Rytlewski, K. Moraczewski, M. Stepczyńska, Development perspectives of selected technologies of polymer surface layers modification, Archives of Materials Science and Engineering 52/1 (2011) 23-46.
99. L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich, Open Access Library 5 (2011) 1-480.
100. T. Burakowski, T. Wierzchoń, Inżynieria powierzchni metali, WNT, Warszawa, 1995.
101. J. Łaskawiec, Inżynieria powierzchni, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.
102. M. Blicharski, Inżynieria powierzchni, WNT, Warszawa, 2009.
103. K. Przybyłowicz, J. Przybyłowicz, Metaloznawstwo w pytaniach i odpowiedziach, WNT, Warszawa, 2004.
104. S. Tkaczyk (red.), Powłoki ochronne, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.
105. P. Kula, Inżynieria warstwy wierzchniej, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2000.
106. R.F. Bunshah (ed.), Handbook of Hard Coatings, William Andrew Publishing, Noyes, 2001.
107. R.F. Bunshah (ed.), Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Technology and Applications, second edition, Materials science and process technology series, Noyes Publications, Park Ridge, N.J., 1994.
108. A.A. Tracton (ed.), Coatings Technology Handbook, 3rd edition, Diversified Enterprises, 2005.
109. R.L. Boxman, D.M. Sanders, P.J. Martin (eds.), Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, Noyes Publications, Park Ridge, N.J., 1997.
110. C.P. Poole, F.J. Owens, Introduction to nanotechnology, Wiley-IEEE, 2003.
111. K.H.J. Buschow, R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilschner, E.J. Kramer, S. Mahajan (eds.), Encyclopedia of Materials Science and Technology, Elsevier, Oxford, UK, 2001.
112. T. Burakowski, Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, 2004.
113. W. Schatt, Sintervorgänge-Grundlagen, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, Germany, 1992 (w j. niemieckim).
114. J. Pacyna (red.), Prace XXXVIII Szkoły Inżynierii Materiałowej, Krynica – Kraków, 2010.
115. D.M. Mattox, The foundations of vacuum coating technology, Noyes Publications/William Andrew Publishing, Norwich, New York, 2003.

116. A. Klimpel, Technologie laserowe w spawalnictwie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2011.
117. D. Chrisey, G.K. Hubler (eds.), Pulsed Laser Deposition of Thin Films, John Wiley and Son, 1994.
118. M. Żenkiewicz, Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych, WNT, Warszawa 2000.
119. H.J. Saechtling, Tworzywa sztuczne. Poradnik, WNT, Warszawa, 2000.
120. G. Hunt, M.D. Mehta, Nanotechnology: risk, ethics and law, Earthscan, 2006.
121. E. Knystautas (ed.), Engineering Thin Films and Nanostructures with Ion Beams, Taylors & Francis, BocaRaton – London – New York – Singapore, 2005.
122. H. Brune, H. Ernst, G. Schmid, Nanotechnology: assessment and perspectives, Springer, 2006.
123. Z. Rdzawski, Miedź stopowa, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009.
124. Z. Zinowicz, Powłoki organiczne w technice antykorozyjnej, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2003.
125. J. Kusiński, Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków, 2000.
126. A.J. Michalski, Fizykochemiczne podstawy otrzymywania powłok z fazy gazowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
127. J. Sobczak, Kompozyty metalowe, Wydawnictwo Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego, Kraków – Warszawa, 2001.
128. E. Guzik, Procesy uszlachetniania żeliwa- wybrane zagadnienia, Archiwum Odlewnictwa PAN, Katowice 2001.
129. P. Niedzielski, Wytwarzanie i zastosowanie proszków diamentowych, Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź 2011.
130. R.M. Souza, M. Ignat, C.E. Pinedo, A.P. Tschiptschin, Structure and properties of low temperature plasma carburized austenitic stainless steels, Surface and Coatings Technology 204/6-7 (2009) 1102-1105.
131. T. Babul, N. Kucharieva, A. Nakonieczny, J. Senatorski, Structure and Properties of Nitrocarburized Diffusion Layers Generated on High-Speed Steels, Journal of Materials Engineering and Performance 12/6 (2003) 696-700.
132. Z. Nitkiewicz, M. Gwoździk, D. Dyja, Odporność na ścieranie stali martenzytycznej po procesie azotowania jarzeniowego, Acta Metallurgica Slovaca 13/5 (2007) 439-443.
133. J. Kmiński, A. Brojanowska, J.J. Kazior, T. Wierzchoń, Odporność korozyjna warstw azotowanych wytworzonych w procesach niskotemperaturowych obróbek jarzeniowych na spiekach stali AISI 316L, Ochrona przed Korozją 52/4-5 (2009) 177-182.
134. M. Szota, J. Jasiński, L. Jeziorski, R. Torbus, G. Walczak, K. Kaczmarek, Fluidalna obróbka cieplna stali narzędziowej, Inżynieria Powierzchni 3 (2007) 26-29.
135. S. Veprek, M.J.G. Veprek-Heijman, Industrial applications of superhard nanocomposite coatings, Surface and Coatings Technology 202 (2008) 5063-5073.
136. P. Kula, P. Olejnik, J. Kowalewski, A new vacuum carburizing technology, Heat Treatment Progress 2-3 (2001) 57-60.
137. L.A. Dobrzański, K. Gołombek, E. Hajduczek, Structure of the nanocrystalline coatings obtained on the CAE process on the sintered tool materials, Journal of Materials Processing Technology 175 (2006) 157-162.
138. L.A. Dobrzański, K. Lukaszkowicz, K. Labisz, Structure, texture and chemical composition of coatings deposited by PVD techniques, Archives of Materials Science and Engineering 37/1 (2009) 45-52.
139. T.P. Martin, K.K.S. Lau, K. Chan, Y. Mao, M. Gupta, W.S. O'Shaughnessy, K.K. Gleason, Initiated chemical vapor deposition (iCVD) of polymeric nanocoatings, Surface and Coatings Technology 201 (2007) 9400-9405.
140. C.J. Chung, T.H. Chung, Y.M. Shin, Y. Kim, Characteristics of nitrogen-incorporated silicon oxycarbide films and plasmas for plasma enhanced chemical vapor deposition with TMOS/N_2/NH_3, Current Applied Physics 10 (2010) 428-435.

141. L.A. Dobrzański, B. Dołżańska, K. Gołombek, G. Matula, Characteristics of structure and properties of a sintered graded tool materials with cobalt matrix, Archives of Materials Science and Engineering 47/2 (2011) 69-76.
142. W. Lengauer, K. Dreyer, Functionally graded hardmetals, Journal of Alloys and Compounds 338 (2002) 194-212.
143. Y.T. Pei, T.C. Zuo, Gradient microstructure in laser clad TiC-reinforced Ni-alloy com¬posite coating, Materials Science and Engineering A 241/1-2 (1998) 259-263.
144. J. Kusiński, Wear properties of T15 PM HSS made indexable inserts after laser surface melting, Journal of Materials Processing Technology 64 (1997) 239-246.
145. B. Major, R. Ebner, Konstytuowanie warstwy wierzchniej tworzyw metalowych na drodze obróbki laserowej, Inżynieria Powierzchni 1 (1996) 53-65.
146. M. Bonek, L.A. Dobrzański, E. Hajduczek, A. Klimpel, Laser modification of surface layer properties of a hot-work tool steel, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 14 (2006) 152-156.
147. L.A. Dobrzański, M. Musztyfaga, A. Drygała, Selective laser sintering method of manufacturing front electrode of silicon solar cell, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 42 (2010) 111-119.
148. J.F. Pollock, K.E. Healy, Mechanical and swelling characterization of poly(N-isopropyl acrylamide-co-methoxy poly(ethylen glycol) methacrylate) sol-gels, Acta Biomaterialia 6 (2010) 1307-1318.
149. D.M. Bieliński, P. Lipiński, J. Jagielski, W. Okrój, L. Klimek, Wybrane przykłady modyfikacji warstwy wierzchniej polimerów za pomocą bombardowania jonowego, Inżynieria Materiałowa 27/6 (2006) 1337-1342.
150. Z. Bojar, W. Przetakiewicz (red.), Materiały metalowe z udziałem faz międzymetalicznych, BEL Studio Sp. z o.o., Warszawa, 2006.
151. A. Mazurkiewicz, J. Smolik, B. Poteralska, Nowoczesna inżynieria powierzchni-stan wiedzy i kierunki rozwoju, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 562-565.
152. H. Dosch, M.H. Van de Voorde (eds.), Gennesys, White Paper, A New European Partnership between Nanomaterials Science & Nanotechnology and Synchrotron Radiation and Neuron Facilities, Max-Planck-Insititut für Metalforschung, Stuttgart, 2009.
153. NANOMAT, Wykorzystanie nanotechnologii w nowoczesnych materiałach, www.nanomat.eitplus.pl, 2012.
154. K. Czaplicka-Kolarz (ed.), Foresight technologiczny materiałów polimerowych w Polsce. Analiza stanu zagadnienia, Drukarnia Cyfrowa Totem, Poznań, 2008.
155. Zaawansowane technologie przemysłowe i technologiczne dla zrównoważonego rozwoju kraju, www.portaltechnologii.pl/2index/index.html, 2011.
156. B. Gambin, W. Łojkowski, A. Świderska-Środa (ed.) FOREMAT. Scenariusze rozwoju technologii nowoczesnych materiałów metalicznych, ceramicznych i kompozytowych, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji- PIB, Radom, 2010.
157. ROTMED, System Monitorowania i Scenariusze Rozwoju Technologii Medycznych w Polsce, http://biomed.eti.pg.gda.pl/rotmed/, 2012.
158. Foresight technologiczny odlewnictwa polskiego, http://www.iod.krakow.pl/foresight/htm4/index2.htm, 2012.
159. FORSURF, Foresight wiodących technologii kształtowania własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych, www.forsurf.pl, 2012.
160. J. Kisielnicki, MIS. Systemy informatyczne zarządzania, Placet, Warszawa, 2008.
161. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz (ed.), Materials surface engineering development trends, Open Access Library 6 (2011) 1-596.
162. Narodowy Program Foresight Polska 2020, http://foresight.polska2020.pl/cms/pl/, 2012.
163. Foresight technologiczny. Organizacja i metody. Tom 1. Podręcznik, Wydawnictwo Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości, Warszawa, 2007.
164. L.A. Costanzo, R.B. Mackay, Handbook of Research on Strategy and Foresight, Edward Elgar Publishing 2009.

165. K. Borodako, Foresight w zarządzaniu strategicznym, Wydawnictwo C.H. Beck, Warszawa 2009.
166. D. Loveridge, Foresight: The Art and Science of Anticipating the Future, Taylor & Francis, NY, 2009.
167. R.A. Slauhgter, E. Masini, J. Dator, Ch. Jones, O. Markley, Eds: J. McBrewster, F.P. Miller, A.F. Vandome, Futurology: Delphi method, Causal layered analysis, Patrick Dixon, Scenario planning, Future history, Failure mode and effects analysis, Social network, systems engineering, reference class forecasting, Forecasting, Prediction, Alphascript Publishing, 2009.
168. L. Georghiou, J.C. Harper, M. Keenan, I. Miles, R. Popper, The handbook of technology foresight. Concepts and Practice, Edward Elgar Publishing Ltd., UK, 2008.
169. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, T. Tański, S. Malara, J. Domagała-Dubiel, Technology foresight results concerning laser surface treatment of casting magnesium alloys, in: W.A. Monteiro (ed.), Magnesium Alloys, InTech, Brasil, 2012, w druku.
170. L.A. Dobrzański, T. Tański, A. Dobrzańska-Danikiewicz, M. Król, J. Domagała-Dubiel, S. Malara, Struktura i własności stopów Mg-Al-Zn, Open Access Library 2(8) (2012) w druku.
171. A. Dobrzańska-Danikiewicz, K. Lukaszkowicz, Strategiczne kierunki rozwojowe technologii nakładania powłok PVD na stop miedzi z cynkiem, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 558-561.
172. A. Dobrzańska-Danikiewicz, The PVD technologies development directions determined on the base of foresight research results, Journal of Materials Science and Engineering (2012) w druku.
173. A. Dobrzańska-Danikiewicz, K. Gołombek, D. Pakuła, J. Mikuła, M. Staszuk, L.W. Żukowska, Assessment of PVD/CVD onto sintered tool materials according to foresight methodology, Journal of Materials Science and Engineering (2012) w druku.
174. A. Dobrzańska-Danikiewicz, A. Drygała, Foresight methodology application for laser texturing of silicon surface, Proceedings of Ukrainian-Polish Scientific Conference, Mechanics and Computer Science, Chmielnicki, Ukraine (2011) 156-157.
175. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, L.A. Dobrzański, J. Mazurkiewicz, B. Tomiczek, Ł. Reimann, E-transfer of materials surface engineering e-foresight results, Journal of Achievements in Materials and Manu¬facturing Engineering 52/2 (2011) 87-100.
176. R.C. Savaskan, S. Bhattacharya, L.N van Wassenhove, Closed Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing, Management Science 50/2 (2004) 239-252.
177. J.W. Wyrzykowski, E. Pleszakow, J. Sieniawski, Odkształcanie i pękanie metali, WNT, Warszawa, 1999.
178. A. Zieliński, Hydrogen-assisted degradation of some non-ferrous metals and alloys, Journal of Materials Processing Technology 109/1-2 (2001) 206–214.
179. .K. Lenik, Przeciwzużyciowe eutektyczne pokrycia systemami Fe-Mn-C-B, Ewroswit, Lwów, 2004, (w j. ukraińskim).
180. A. Dobrzańska-Danikiewicz, E-foresight of materials surface engineering, Archives of Materials Science Engineering 44/1 (2010) 43-50.
181. A. Dobrzańska-Danikiewicz, E-foresight technologiczny dla walidacji, prognozowania rozwoju i mapowania technologii, w: W. Kieżun, A. Letkiewicz, J. Wołejszo (ed.), Kooperacje organizacji publicznych, Wydział Wydawnictw i Poligrafii Wyższej Szkoły Policji w Szczytnie, Szczytno, 2011, T. II, 507-518.
182. A. Dobrzańska-Danikiewicz, Komputerowo wspomagane metody foresightowe w zastosowaniu do inżynierii powierzchni, Czasopismo Techniczne 108/7/4-M (2011)49-56.
183. A. Dobrzańska-Danikiewicz, E-foresight inżynierii powierzchni materiałów, Problemy jakości 11 (2011) 45-49.
184. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, Foresight methods for technology validation, roadmapping and development in the surface engineering area, Archives of Materials Science Engineering 44/2 (2010) 69-86.
185. A. Dobrzańska-Danikiewicz, Foresight of material surface engineering as a tool building a knowledge-based economy, Materials Science Forum 706-709 (2012) 2511-2516.
186. A. Dobrzańska-Danikiewicz, Foresight of materials surface engineering as a tool stimulating sustainable development and to increase the quality of technology, Journal of Machine Engineering 10/3 (2010) 48-59.

187. A. Dobrzańska-Danikiewicz, The methodological fundaments of development state analysis of surface engineering technologies, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 40/2 (2010) 203-210.
188. A. Dobrzańska-Danikiewicz, Main assumption of the foresight of surface properties formation leading technologies of engineering materials and biomaterials, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 34/2 (2009) 165-171.
189. A. Mortensen, S. Suresh, Functionally graded metals and metal-ceramic composites: Part I Processing, International Materials Review 40/6 (1995) 239-265.
190. Y. Miyamoto, W.A. Kaysser, B.H. Rabin, A. Kawasaki, R.G. Ford, Functionally Graded Materials, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
191. B. Major, T. Wierzchoń, E. Reinhold, W. Wołczyński, J. Bojarski, G. Krużel, Graded materials on titanium matrix, Material Engineering 6 (2000) 340-343.
192. T. Hejwowski, Wear resistance of graded coatings, Vacuum 65 (2002) 515-520.
193. L.A. Dobrzański, Design and manufacturing functional gradient tool materials – dependence properties on technology and thickness of surface layers with a gradient of both chemical and phase composition manufactured on tool from different applications. Design and manufacturing functional gradient materials, The Polish Academy of Science, Cracow, 2007.
194. L.A. Dobrzański, A. Kloc-Ptaszna, G. Matula, J.M. Torralba, Characteristics of structure and properties of a sintered graded tool materials, Inżynieria Materiałowa 28/3-4 (2007) 138-142.
195. L.A. Dobrzański, K. Gołombek, Structure and properties of the cutting tools made from cemented carbides and cermets with the TiN + mono-, gradient- or multi(Ti,Al,Si)N + TiN nanocrystalline coatings, Journal of Materials Processing Technology 164-165 (2005) 805-815
196. M. Richert, Inżynieria nanomateriałów i materiałów ultradrobnoziarnistych, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2006.
197. A. Mazurkiewicz (red.), Nanonauki i nanotechnologie. Stan i perspektywy rozwoju, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu, Radom, 2007.
198. S. Mitura, A. Mitura, P. Niedzielski, P. Couvrat, Nanoctrystalline Diamond Coatings, Chaos, Solitons & Fractals 10/12 (1999) 2165-2176.
199. J. Borowski, H. Wiśniewska-Weinert, M. Lewandowska, Kształtowanie plastyczne stopu aluminium 2017 o strukturze nanometrycznej, Rudy i Metale Nieżelazne 55/7 (2010) 486-491.
200. A. Boczkowska, J. Kapuściński, K. Puciłowski, S. Wojciechowski, Kompozyty, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
201. W. Przygocki, A. Włochowicz, Fizyka polimerów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001.
202. L.A. Dobrzański, R. Nowosielski, A. Przybył, J. Konieczny, Soft magnetic nano¬composite with powdered metallic ribbon based on cobalt and polymer matrix, Journal of Materials Processing Technology 162-163 (2005) 20-26.
203. M. Żenkiewicz, J. Richert, P. Rytlewski, K. Moraczewski, Some effects of corona plasma treatment of polylactide/ montmorillonite nanocomposite films, Plasma Processes and Polymers 6 (2009) S387-S391.
204. J. Blazevska-Gilev, J. Kupcık, J. Subrt, Z. Bastl, V. Vorlıcek, A. Galıkova, D. Spaseska, IR laser ablation of poly(vinyl chloride): Formation of monomer and deposition of nanofibres of chlorinated polyhydrocarbon, Polymer Degradation and Stability 91 (2006) 213-220.
205. F. Hanus, K. Kolev, A. Jadin, L.A. Laude, Excimer laser – induced copper nanocluster formation in mixed PMMA/copper acetyloacetonate films, Applied Surface Science 154-155 (2000) 320-323.
206. J. Smolik, M. Gulde, J. Walkowicz, J. Suchanek, Influence of the structure of the composite: `nitrided layer/PVD coating' on the durability of forging dies made of steel DIN-1.2367, Surface and Coatings Technology 180-181 (2004) 506-511.
207. M. Polok-Rubiniec, L.A. Dobrzański, M, Adamiak, Comparison of the PVD coatings deposited onto plasma nitrided steel, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 42/1-2 (2010) 172-179.

208. K. Dybowski, Ł. Kaczmarek, R. Pietrasik, J. Smolik, Ł. Kołodziejczyk, D. Batory, M. Gzik, M. Stegliński, Influence of chemical heat treatment on the mechanical properties of paper knife-edge die, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 37/2 (2009) 422-427.
209. B. Podgornik, S. Hogmark, O. Sandberg, V. Leskovsek, Wear resistance and anti-sticking properties of duplex treated forming tool steel, Wear 254/11 (2003) 1113-1121.
210. A. Mazurkiewicz, J. Smolik, Development of Novel Nano-Structures Functional Coatings with the Use of the Original Hybryd Decise, w: M. Richert (red), Novel Materials, Coats and Nanoengineering, Materials Science Forum 674 (2011) 1-9.
211. E. Kasprzycka, B. Bogdański, J. Jasiński, J. Smolik, Właściwości warstw duplex wytwarzanych w procesie tytanowania próżniowego na stali pokrytej stopem niklu, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 437-476.
212. J. Baranowska, B. Arnold, Corrosion resistance of nitrided layers on austenitic steel, Surface and Coatings Technology 200/22-23 (2006) 6623-6628.
213. M. Gwoździk, Z. Nitkiewicz, T. Frączek, M. Basiaga, Wpływ sterylizacji na twardość stali X39Cr13 po procesie azotowania jarzeniowego, Produkcja i zarządzanie w hutnictwie, XV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Częstochowa, 2007, Cz. 1, 235-238.
214. A. Pertek, M. Kulka, M. Jankowiak, Badania struktury i właściwości borowanej stali konstrukcyjnej 41Cr4 i narzędziowej 102Cr6, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji 26/1 (2006) 167-176.
215. B. Kucharska, M. Trzaska, Struktura i właściwości trybologiczne warstw kompozytowych Ni-P/MOS, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 503-505.
216. M.W. Richert, A. Mazurkiewicz, M. Książek, J.A. Smolik, R. Grzelka, P. Pałka, Badania warstw nanoszonych metodą natrysku termicznego, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 691-694.
217. P. Wu, C.Z. Zhou, X.N. Tang, Laser alloying of a gradient metal-ceramic laser to enhance wear properties, Surface and Coatings Technology 73/1-2 (1995) 111-114.
218. J.H. Abboud, Functionally gradient titanium-aluminide composites produced by laser cladding, Journal of Materials Science 29/13 (1994).
219. L.A. Dobrzański, A. Drygała, Laser texturisation in technology of multicrystalline silicon solar cells, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 29/1 (2008) 7-14.
220. K.E. Oczoś, Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1996.
221. B. Surowska, J. Bieniaś, M. Walczak, K. Sangwal, A. Stoch, Microstructure and mechanical properties of ceramic coatings on Ti and Ti-based alloy, Applied Surface Science 238/1-4 (2004) 288-294.
222. M. Shen, M.B. Bever, Gradients in polymeric materials, Journal of Materials Science 7/7 (1972) 741-746.
223. A. Neubrand, J. Rödel, Gradient materials: an overview of a novel concept, Zeitschrift für Metallkunde 88/5 (1997) 358-371.
224. A. Kawasaki, R. Watanabe, Concept and P/M fabrication of Functionally Gradient Materials, Ceramics International 23 (1997) 73-83.
225. B. Kieback, A. Neubrand, H. Riedel, Processing techniques for functionally graded materials, Materials Science and Engineering A 362/1-2 (2003) 81-106.
226. L.A. Dobrzański, J. Mikuła, The structure and functional properties of PVD and CVD coated Al_2O_3+ZrO_2 oxide tool ceramics, Journal of Materials Processing Technology 167 (2005) 438-446.
227. L.A. Dobrzański, S. Skrzypek, D. Pakuła, J. Mikuła, A. Křiž, Influence of the PVD and CVD technologies on the residual macro-stresses and functional properties of the coated tool ceramics, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 35/2 (2009) 162-168.
228. L.A. Dobrzański, L.W. Żukowska, J. Mikuła, K. Gołombek, P. Podstawski, Functional properties of the sintered tool materials with (Ti,Al)N coating, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 36/2 (2009) 134-141.
229. H. Kimura, K. Toda, Design and development of graded materials by pulse discharge resistance consolidation, Metal Powder Report 51/1 (1997) 34.

230. Y. Miyamoto, Development of Functionally Graded Materials by HIP, Materials Science Research International 6/1 (2000) 3-8.
231. I.Y. Konyashin, A technique for fabrication of coated TiCN-based cermets with functionally graded structure, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 19 (2001) 523-526.
232. J. Łabanowski, Stress corrosion cracking susceptibility of dissimilar stainless steels welded joints, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 20/1-2 (2007) 255-258.
233. U. Schulz, M. Peters, F.W. Bach, G. Tegeder, Graded coatings for thermal, wear and corrosion barriers, Materials Science and Engineering A 362 (2003) 61-80.
234. J. Richter, M. Hetmańczyk, J. Cwajna, Characterization of carbide phase in nonledeburitic high-speed steel containing Ti and Nb, Journal of Materials Processing Technology 53/1-2 (1995) 341-348.
235. H. Leiste, M. Stüber, V. Schier, H. Holleck, Microstructural Characterisation of TiC-TiN Gradient Coatings Deposited by Non-Reactive Magnetron Sputtering, Materials Science Forum 308-311 (1999) 467-475.
236. L.A. Dobrzański, L.W. Żukowska, J. Mikuła, K. Gołombek, D. Pakuła, M. Pancielejko, Structure and mechanical properties of gradient PVD coatings, Journal of Materials Processing Technology 201 (2008) 310-314.
237. K. Lukaszkowicz, L.A. Dobrzański, Structure and mechanical properties of gradient coatings deposite by PVD technology onto the X40CrMoV5-1 steel substrate, Journal of Materials Science 43 (2008) 3400-3407.
238. W. Kwaśny, M.J. Woźniak, J. Mikuła, L.A. Dobrzański, Structure, physical properties and multi-fractal characteristics of the PVD and CVD coatings deposition onto the Al2O3+TiC ceramics, International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering 1/1 (2007) 97-113.
239. L.A. Dobrzański, D. Pakuła, A. Křiž, M. Soković, J. Kopač, Tribological properties of the PVD and CVD coatings deposited onto the nitride tool ceramics, Journal of Materials Processing Technology 175 (2006) 179-185.
240. M. Adamiak, L.A. Dobrzański, Microstructure and selected properties of hot-work tool steel with PVD coatings after laser surface treatment, Applied Surface Science 254/15 (2008) 4552-4556.
241. L.A. Dobrzański, M. Staszuk, K. Gołombek, A. Śliwa, M. Pancielejko, Structure and properties PVD and CVD coatings deposited onto edges of sintered cutting tools, Archives of Metallurgy and Materials 55/1 (2010) 187-193.
242. R.A. Antunes, A.C.D. Rodas, N.B. Lima, O.Z. Higa, I. Costa, Study of the corrosion resistance and in vitro biocompatibility of PVD TiCN-coated AISI 316L austenitic stainless steel for orthopedic applications, Surface and Coatings Technology 205 (2011) 2074-2081.
243. L.A. Dobrzański, K. Lukaszkowicz, A. Zarychta, L. Cunha, Corrosion resistance of multilayer coatings deposited by PVD techniques onto the brass substrate, Journal of Materials Processing Technology 164-165 (2005) 816-821.
244. L.A. Dobrzański, K. Lukaszkowicz, J. Mikuła, D. Pakuła: Structure and corrosion resistance of gradient and multilayer coatings, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 18 (2006) 75-78.
245. K. Lukaszkowicz, J. Sondor, A. Kriz, M. Pancielejko, Structure, mechanical properties and corrosion resistance of nanocomposite coatings deposited by PVD technology onto the X6CrNiMoTi17-12-2 and X40CrMoV5-1 steel substrates, Journal of Materials Science 45 (2010) 1629-1637.
246. L.A. Dobrzański, K. Gołombek, J. Mikuła, D. Pakuła, Multilayer and gradient PVD coatings on the sintered tool materials, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 31/2 (2008) 170-190.
247. W. Kwaśny, Predicting properties of PVD and CVD coatings based on fractal quantities describing their surface, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 37/2 (2009) 125-192.
248. M. Soković, L.A. Dobrzański, J. Kopač, L. Kosec, Cutting Properties of PVD and CVD Coated Al_2O_3 + TiC Tool Ceramic, Materials Science Forum 539-543 (2007) 1159-1164.

249. L.A. Dobrzański, J. Mikuła, Structure and properties of PVD and CVD coated Al2O3+TiC mixed oxide tool ceramics for dry on high speed cutting processes, Journal of Materials Processing Technology 164-165 (2005) 822-831.
250. M. Bonek, L.A. Dobrzański, E. Hajduczek, A. Klimpel, Structure and properties of laser alloyed surface layers on the hot-work tool steel, Journal of Materials Processing Technology 175 (2006) 45-54.
251. L.A. Dobrzański, K. Labisz, M. Piec, J. Lelątko, A. Klimpel, Structure and Properties of the 32CrMoV12-28 Steel Alloyed with WC Powder using HPDL Laser, Materials Science Forum 530-531 (2006) 334-339.
252. L.A. Dobrzański, K. Labisz, E. Jonda, A. Klimpel, Comparison of the surface alloying of the 32CrMoV12-28 tool steel using TiC and WC powder, Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 321-325.
253. L.A. Dobrzański, M. Bonek, E. Hajduczek, A. Klimpel, A. Lisiecki, Comparison of the structures of the hot-work tool steels laser modified surface layers, Journal of Materials Processing Technology 164-165 (2005) 1014-1024.
254. L.A. Dobrzański, J. Domagała, T. Tański, A. Klimpel, D. Janicki, Laser surface treatment of magnesium alloy with WC and TiC powders using HPDL, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 28/2 (2008) 179-186.
255. L.A. Dobrzański, T. Tański, L. Čížek, Z. Brytan, Structure and properties of the magnesium casting alloys, Journal of Materials Processing Technology 192-193 (2007) 567-574.
256. L.A. Dobrzański, T. Tański, S. Malara, M. Król, Structure and Properties Investigation of a Magnesium Alloy Processed by Heat Treatment and Laser Surface Treatment, w: M. Richert (red), Novel Materials, Coats and Nanoengineering, Materials Science Forum 674 (2011) 11-18.
257. L.A. Dobrzański, A. Drygała, Laser processing of multicrystalline silicon for texturization of solar cells, Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 228-231.
258. L.A. Dobrzański, A. Drygała, K. Gołombek, P. Panek, E. Bielańska, P. Zięba, Laser surface treatment of multicrystalline silicon for enhancing optical properties, Journal of Materials Processing Technology 201 (2008) 291-296.
259. D. Chen, Anti-reflection (AR) coatings made by sol-gel processes: A review, Solar Energy Materials and Solar Cells 68 (2001) 313-336.
260. PACVD/PECVD Plasma Assisted (Enhanced) CVD, http://www.plazma.efuturo.pl/cvd.htm, 2012.
261. J. Nowacki, Stal dupleks i jej spawalność, WNT, Warszawa, 2009.
262. J. Pilarczyk, Spawalnictwo 1. Poradnik inżyniera, WNT, Warszawa, 2003.
263. Y.-G. Jung, S.-C. Choi, C.-S. Oh, U.-G. Paik, Residual stress and thermal properties of zirconia/metal (nickel, stainless steel 304) functionally graded materials fabricated by hot pressing, Journal of Material Science 32 (1997) 3841-3850.
264. T. Babul, S.J. Skrzypek, A. Nakonieczny, J. Jeleńkowski, Z. Obuchowicz, Technologia aluminiowania stali i stopów niklu w złożu fluidalnym - AluTermoFluid®, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 309-311.
265. C. Senderowski, K. Łodziński, Z. Bojar, Ocena wytrzymałości adhezyjnej powłok detonacyjnych typu Fe-Al w teście na odrywanie, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 729-733.
266. J. Jeleńkowski, T. Borowski, T. Babul, Zmiany w strukturze strefy pośredniej podczas natryskiwania detonacyjnego, Inżynieria Materiałowa 29/6 (2008) 595-598.
267. J. Lis, R. Pampuch, Spiekanie, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2000.
268. M. Szutkowska, Advances in strength properties testing of sintered tool materials, Proceedings of the European Congress and Exhibition on Powder Metallurgy PM 2001, Testing, Measurements and Controls, Vol. 2, Nicea, France, 2001, 454-460.
269. A. Várez, B. Levenfeld, J.M. Torralba, G. Matula, L.A. Dobrzański, Sintering in different atmospheres of T15 and M2 high speed steels produced by modified metal injection moulding process, Materials Science and Engineering A 366/2 (2004) 318-324
270. B. Piekarski, J. Kubicki, Al-Cu coating applied on austenitic cast steels used in carburising atmospheres, Physico-Chemical Mechanics of Materials 5 (2006) 564-567.

271. P. Wróbel, Uszlachetnianie powierzchni odlewów staliwnych kompozytową warstwą stopową w procesie odlewania, Praca doktorska, Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.
272. B. Kusznir, Opracowanie technologii wytwarzania warstw stopowych na odlewach żeliwnych przy zastosowaniu pola magnetycznego, Praca doktorska, Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1979.
273. L.A. Dobrzański, M. Kremzer, A. Nagel, Structure and properties of ceramic preforms based on Al_2O_3 particles, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 35/1 (2009) 7-13.
274. L.M. Peng, J.W. Cao, K. Noda, K.S. Han, Mechanical properties of ceramic-metal composites by pressure infiltration of metal into porous ceramics, Materials Science and Engineering A 374 (2004) 1-9.
275. S. Jonas, K. Tkacz-Śmiech, A. Małek, J. Konefał, S. Kluska, S. Zimowski, M. Kot, T. Borowski, T. Wierzchoń, Modyfikacja właściwości polimerów metodą PACVD, Inżynieria Materiałowa 32/4 (2011) 450-453.
276. L.A. Dobrzański Metaloznawstwo opisowe stopów metali nieżelaznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
277. H. Kaczmarek, Efekty przyspieszenia fotochemicznego rozkładu polimerów przez substancje mało- i wielkocząsteczkowe, Wydawnictwo UMK, Toruń, 1998.
278. P. Rytlewski, M. Żenkiewicz, Effects of laser irradiation on surface properties of poly(ethylene terephthalate), Journal of Adhesion Science and Technology 24 (2010) 685-697.
279. M.L Shofner, F.J. Rodríguez-Macías, R. Vaidyanathan, E.V. Barrera, Single wall nanotube and vapor grown carbon fiber reinforced polymers processed by extrusion freeform fabrication, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 34/12 (2003) 1207-1217.
280. C. Li, E.T. Thostenson, T.W. Chou, Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites: A review, Composites Science and Technology 68 (2008) 1227-1249.
281. Q. Cao, J.A. Rogers, Ultrathin Films of Single-Walled Carbon Nanotubes for Electronics and Sensors: A Review of Fundamental and Applied Aspects, Advanced Materials 21/1 (2009) 29-53.
282. D.R. Kauffman, D.C. Sorescu, D.P. Schofield, B.L. Allen, K.D. Jordan, A. Star, Understanding the Sensor Response of Metal-Decorated Carbon Nanotubes, Nano Letters 10 (2010) 958–963.
283. N. Sinha, J. Ma, J.T.W. Yeow, Carbon Nanotube-Based Sensors, Journal of Nanoscience and Nanotechnology 6 (2006) 573-590.
284. Q. Zhao, H.D. Wagner, Raman spectroscopy of carbon–nanotube–based composites. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 362 (2004) 2407-2424.
285. P. Sureeyatanapas, R.J. Young, SWNT composite coatings as a strain sensor on glass fibres in model epoxy composites, Composites Science and Technology 69/10 (2009) 1547-1552.
286. K. Rege, N.R. Raravikar, D.-Y. Kim, L.S. Schadler, P.M. Ajayan, J.S. Dordick, Enzyme-Polymer-Single Walled Carbon Nanotube Composites as Biocatalytic Films, Nano Letters 3/6 (2003) 829-832.
287. Q.C. Shi, T.Z. Peng, A novel cholesterol oxidase biosensor based on Pt-nanoparticle/carbon nanotube modified electrode, Chinese Chemical Letters 16/8 (2005) 1081-1084.
288. H.F. Cui, J.S. Ye, X. Liu, W.D. Zhang, F.S. Sheu, Pt-Pb alloy nanoparticle/carbon nanotube nanocomposite: a strong electrocatalyst for glucose oxidation, Nanotechnology 17 (2006) 2334-2339.
289. H. Ago, K. Petritsch, M.S.P. Shaffer, A.H. Windle, R.H. Friend, Composites of Carbon Nanotubes and Conjugated Polymers for Photovoltaic Devices, Advanced Materials 11/15 (1999) 1281-1285.
290. J. Kong, N.R. Franklin, C. Zhou, M.G. Chapline, S. Peng, K. Cho, H. Dai, Nanotube molecular wires as chemical sensors, Science 287/5453 (2000) 622-625.
291. R. Sarder, A.M. Funston, P. Mulvaney, R.W. Murray, Gold Nanoparticles: Past, Present, and Future, Langmuir 25/24 (2009) 13840-13851.
292. A. Star, V. Joshi, S. Skarupo, D. Thomas, J.C.P Gabriel, Gas sensor array based on metal-decorated carbon nanotubes, The Journal of Physical Chemistry B 110/42 (2006) 21014-21020.

293. H. Han, S.H. Choi, T.Y. Lee, J. Yoo, Ch. Park, T. Jung, S. Yu, W. Yi, I.T. Han, J.M. Kim, Growth characteristics of carbon nanotubes using platinum catalyst by plasma enhanced chemical vapor deposition, Diamond and Related Materials 12 (2003) 878-883.
294. K. Lee, J. Zhang, H. Wang, D.P. Wilkinson, Progress in the synthesis of carbon nanotube - and nanofiber - supported Pt electrocatalysts for PEM fuel cell catalysis, Journal of Applied Electrochemistry 36 (2006) 507-522.
295. L.A. Dobrzański, M. Pawlyta, A. Krztoń, B. Liszka, K. Labisz, Synthesis and characterization of carbon nanotubes decorated with platinum nanoparticles, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 39 (2010) 184-189.
296. L.A. Dobrzański, M. Pawlyta, A. Krztoń, B. Liszka, C.W. Tai, W. Kwaśny, Synthesis and characterization of carbon nanotubes decorated with gold nanoparticles, Acta Physica Polonica A 118 (2010) 483-486.
297. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, Badania i poznanie mechanizmu zmian konduktywności elektrycznej nanorurek węglowych pokrytych nanokryształami metali szlachetnych w atmosferze gazów uciążliwych dla środowiska, Projekt badawczy w toku.
298. Q. Xiao, X. Zhou, The study of multiwalled carbon nanotube deposited with conducting polymer for supercapacitor, Electrochimica Acta 48/5 (2003) 575-580.
299. K. Hedicke-Höchstötter, G.T. Lick, V. Altstädt, Novel polyamide nanocomposites based on silicate nanotubes of the mineral halloysite, Composites Science and Technology 69/3-4 (2009) 330-334.
300. A. Govindaraj, B.C. Satishkumar, M. Nath, C.N.R. Rao, Metal Nanowires and Intercalated Metal Layers in Single-Walled Carbon Nanotube Bundles, Chemistry of Materials 12/1 (2000) 202-205.
301. A. Dobrzańska-Danikiewicz, The state of the art analysis and methodological assumptions of evaluation and development prediction for materials surface technologies, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 49/2 (2011) 121-141.
302. A. Dobrzańska-Danikiewicz, Practical application of foresight research methodology to selected surface engineering technologies, Proceedings of 8th International Conference on Industrial Tools and Mechanical Processing Technologies, Slovenia, Ljubljana, 2011, 217-220.
303. A.A. Thompson, A.J. Strickland, Strategic Management. Concepts and Cases, R.D. Irwin, Homewood, Ill. Boston, 1987.
304. A.D. Little, Stratégie et technologie, Document ADL, Davos, 1981.
305. C.W. Hofer, Conceptual Constructions for Formulating Corporate and Business Strategies, Inercollegiate Case Clearing House, Boston, 1977.
306. W.F. Glueck, Strategic Management and Business Policy, McGraw-Hill Book Co., New York, 1980.
307. B.D. Henderson, The Product Portfolio, The Boston Consulting Group, Perspectives 66 (1970).
308. L.A. Dobrzański, J. Trzaska, Application of Neural Networks for Prediction of Hardness and Volume Fractions of Structural Components in Constructional Steels Cooled from the Austenitizing Temperature, Materials Science Forum 437-438 (2003) 359-362.
309. J. Trzaska, L.A. Dobrzański, Application of neural networks for designing the chemical composition of steel with the assumed hardness after cooling from the austenitising temperature, Journal of Materials Processing Technology 164-165 (2005) 1637-1643.
310. L. Rutkowski, Metody i techniki sztucznej inteligencji, PWN, Warszawa, 2006.
311. S. Osowski, Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym, WNT, Warszawa, 1996.
312. L.A. Dobrzański, J. Trzaska, Application of neural networks for the prediction of continuous cooling transformation diagrams, Computational Materials Science 30/3-4 (2004) 251-259.
313. R. Tadeusiewicz, Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1998.
314. L.A. Dobrzański, J. Trzaska, Application of neural networks to forecasting the CCT diagram, Journal of Materials Processing Technology 157-158 (2004) 107-113.
315. T. Wieczorek, Neuronowe modelowanie procesów technologicznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
316. R. Zieliński, Metody Monte Carlo, WNT, Warszawa, 1970.

317. L.A. Dobrzański, J. Trzaska, Application of neural networks for prediction of critical values of temperatures and time of the supercooled austenite transformations, Journal of Materials Processing Technology 155-156 (2004) 1950-1955.
318. J. Trzaska, L.A. Dobrzański, Modelling of CCT diagrams for engineering and constructional steels, Journal of Materials Processing Technology 192-193 (2007) 504-510.
319. A. Janicki, A. Izydorczyk, Komputerowe metody w modelowaniu stochastycznym, WNT, Warszawa, 2001.
320. J. Papińska-Kacperek (red.), Społeczeństwo informacyjne, PWN, Warszawa, 2008, 409-470.
321. M. Hasan, Harris E., Entrepreneurship and innovation in e-commerce, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 32/1 (2009) 92-97.
322. J.A.F. Stoner, C. Wankel, Kierowanie, PWE, Warszawa, 1994.
323. G. Gierszewska, M. Romanowska, Analiza strategiczna, PWE, Warszawa, 1995.
324. P. Kotler, Marketing. Analiza, planowanie, wdrażanie i kontrola, Prentice-Hall International, Inc., Wydanie polskie: Gebethner & Ska, Warszawa, 1994.
325. P. Hauge, Badania marketingowe. Planowanie, metodologia i ocena wyników, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2006.
326. A.N. Oppenheim, Kwestionariusze, wywiady, pomiary postaw, Wydawnictwo Zysk i S-ka, Poznań, 2004.
327. A. Kaniewska-Sępa, G. Leszczyński, B. Pilarczyk, Badania marketingowe na rynku business-to-business, Oficyna Ekonomiczna, Kraków, 2006.
328. W. Dawidow, M. Malone, The Virtual Corporation, Harper Business, New York, 1992.
329. W. Saabeel, T.M. Verduijn, K. Kumar, A Model of Virtual Organization- A Structure and Process Perspective, www.virtualorganization.net, 2011.
330. K. Perechuda, Organizacja wirtualna, Ossolineum, Wrocław, 1997.
331. W. Grudzewski, I. Hejduk, Przedsiębiorstwo wirtualne, Difin, Warszawa, 2002.
332. W. Werther, Structure-Driven Strategy and Virtual Organization Design, Business Horizons, 42/2 (1999) 13-19.
333. J. Burn, P. Marshall, M. Burnett, E-Business and the Virtual Organisation, Butterworth-Heinneman, Oxford, 2001.
334. G. DeSanctis, N. Staudenmayer, S.S. Wong, Interdependence in Virtual Organisations, w: C. Cooper & D. Rousseau (eds.), The Virtual Organization, vol. 6, Wiley & Sons, New York, 1999.
335. A. Wilmańska (red.), Raport o stanie sektora małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce w latach 2008-2009 Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, PIB, Warszawa, 2010.
336. N. Gerdsri, R.S. Vatananan, S. Dansamasatid, Dealing with the dynamics of technology road-mapping implementation: A case study, Technical Forecasting & Social Change 76 (2009) 50-60.
337. Y. Yasunaga, M. Watanabe, M. Korenaga, Application of technology roadmaps to govermental innovation Policy for promoting technology convergence, Technical Forecasting & Social Change 76 (2009) 61-79.
338. R. Phaal, G. Muller, An architectural framework for roadmapping: Towards visual strategy, Technological Forecasting & Social Change 76 (2009) 39-49.
339. A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, T. Tański, J. Domagała-Dubiel, Unique properties, development perspectives and expected applications of laser treated casting magnesium alloys, Archives of Civil and Mechanical Engineering (2012), w druku.
340. K. Obłój, Strategia sukcesu firmy, PWE, Warszawa, 1994.
341. J. Żmudzki, Materiałowe uwarunkowania wydolności czynnościowej osiadających protez zębowych, Open Access Library (2012), w druku.
342. A.J. Nowak, Struktura i własności nowo opracowanego materiału kompozytowego na wewnątrzustrojową protezę przełyku, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Gliwice, 2012.
343. J. Dobrzańska, Analiza szczelności wypełnienia kanałów korzeniowych, Praca doktorska, Śląski Uniwersytet Medyczny, Wydział Lekarski z Oddziałem Lekarsko-Dentystycznym, Zabrze, 2012.

344. L.A. Dobrzański, M. Pawlyta, A. Hudecki, Conceptual study on a new generation of the high-innovative advanced porous and composite nanostructural functional materials with nanofibres, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 49/2 (2011) 550-565.
345. A. Stabryła, Zarządzanie strategiczne w teorii i praktyce, PWN, Warszawa, 2007.
346. Tajniki punktacji, Gazeta bankowa 1 (1999).
347. Z. Galas, I. Nykowski, Z. Żółkiewski, Programowanie wielokryterialne, PWE, Warszawa, 1997.
348. L.A. Dobrzański, M. Bonek, E. Hajduczek, K. Labisz, M. Piec, E. Jonda, A. Polok, Structure and properties laser alloyed gradient surface layers of the hot-work tool steels, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 31/2 (2008) 148-169.
349. L.A. Dobrzański, Projektowanie i wytwarzanie funkcjonalnych materiałów gradientowych narzędziowych – zależność własności od technologii i grubości warstw wierzchnich z gradientem składu chemicznego lub fazowego wytwarzanych na narzędziach do różnych zastosowań, Polska Akademia Nauk, Kraków, 2007.
350. J. Adamczyk, S. Griner, E. Hajduczek, L.A. Dobrzański, Sposób badania odporności materiałów, a w szczególności metali i ich stopów na zmęczenie cieplno-mechaniczne oraz urządzenie do badania odporności materiałów, Patent PRL Nr 106274, 1980.
351. W. Rogowski, A. Michalczewski, Zarządzanie ryzykiem w przedsięwzięciach inwestycyjnych, Oficyna ekonomiczna, Kraków, 2005.
352. M. Lindgren, H. Bandhold, Scenario Planning – Revised and Updated Edition: The Link Between Future and Strategy, Palgrave Macmillan, 2009.
353. R. Bradfield, G. Wright, G. Burt, G. Cairns, K. van der Heijden, The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning, Futures 37 (2005) 795-812.
354. P.W.F. van Notten, J. Rotmans, M.B.A. van Asselt, D.S. Rotman, An updated scenario typology, Futures 35 (2003) 423-443.
355. P. Heugens, J. van Oesterhout, To boldly go where no man has gone before: integrating cognitive and physical features in scenario studies, Futures 33 (2001) 861-872.
356. A. Martelli, Scenario building and planning: state of arts and prospects of evolution, Futures Research Quarterly Summer (2001) 55-70.
357. K. Czaplicka, N. Howaniec, A. Smoliński, Budowa scenariuszy dla potrzeb foresightu technologicznego. Przegląd literatury, Zintegrowany Instytut Naukowo-Technologiczny, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 2007, http://foresight.polska2020.pl/cms/pl/publications/files/budowa_scenariuszy.pdf, 2012.
358. CBP Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis, Globalization, International Transport and the Global Environment: four quantitative scenarios, Hague, The Netherlands, 1999.
359. L. Borjeson, M. Höjer, K.-H. Dreborg, T. Ekvall, G. Finnveden, Towards a user's Guide to Scenarios. A report on scenario types and scenario techniques, Royal Institute of Technology, Sweden, 2005, http://www.infra.kth.se/fms/pdf/ScenarioRapportVer1_1b.pdf, 2012.

Wykaz skrótów użytych w pracy

3D – *Three Dimensions* (trójwymiarowy)
AGD – artykuły gospodarstwa domowego
ALD – *Atomic Layer Deposition* (osadzanie pojedynczych warstw atomowych)
APCVD – *Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition* (chemiczne osadzanie z fazy gazowej pod ciśnieniem atmosferycznym)
ARC – *Anti-Reflective Coatings* (powłoki antyrefleksyjne)
ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów)
B+R – badawczo-rozwojowe, np. placówki, prace
BARE – *Biased Activated Reactive Evaporation* (aktywowane reaktywnie naparowanie przy użyciu działa elektronowego)
BCG matrix – *Boston Consulting Group matrix* (macierz BCG prezentująca graficznie wzrost rynku w funkcji względnego udziału w rynku poszczególnych składowych portfela produktów przedsiębiorstwa; najbardziej klasyczna metoda portfelowa)
BP – *Back Propagation* (metoda wstecznej propagacji błędu)
CAD – *Cathodic Arc Deposition* (katodowe odparowanie łukowe)
CG – *Conjugate Gradient* (metoda gradientów sprzężonych)
CLSM – *Confocal Laser Scanning Microscope* (konfokalny laserowy mikroskop skaningowy)
CSEM – *Confocal Scanning Electron Microscope* (konfokalny elektronowy mikroskop skaningowy)
CVD – *Chemical Vapour Deposition* (chemiczne osadzanie z fazy gazowej)
CVI – *Chemical Vapour Infiltration* (chemiczna infiltracja z fazy gazowej)
DHV – *Dynamic Hardness by Vickers* (jednostka twardości mierzonej dynamiczną metodą Vickersa)
DLC – *Diamond-Like Coatings* (diamentopodobne powłoki węglowe)
EBI – *Electron-Beam Irradiation* (obróbka wysokoenergetycznym promieniowaniem elektronowym)
EBL – *Electron Beam Lithography* (elektronolitografia)
EB-PVD – *Electron Beam Physical Vapour Deposition* (osadzanie warstw z odparowaniem wiązką elektronową z jonizacją par)
EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy/Spectrometer* (spektroskopia/spektroskop energii promieniowania rentgenowskiego)
EUV – *Extreme Ultraviolet* (wysokoenergetyczne promieniowanie ultrafioletowe o długości fali 1-120 nm)
FGM – *Functionally Graded Materials* (funkcjonalne materiały gradientowe)
GDO(E)S – *Glow Discharge Optical (Emission) Spectroscopy/Spectrometer* (spektroskopia/spektroskop optycznego wyładowania jarzeniowego)
GMA – *Gas Metal Arc* (napawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazowej)
GN – *Gas Nitriding* (azotowanie gazowe)
GRNN – *General Regression Neural Network* (regresyjne sieci neuronowe)
GTA – *Gas Tungsten Arc* (napawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej)
GTBC – *Gradient Thermal Barrier Coatings* (powłoki gradientowe będące barierą termiczną)

GUS – Główny Urząd Statystyczny
GWRC – *Gradient Wear-Resistant Coatings* (powłoki gradientowe odporne na zużycie ścierne)
HDPE – ***H**igh **D**ensity **P**oly**e**thylene* (polietylen dużej gęstości)
HFCVD – *Hot Filament Chemical Vapour Deposition* (wysokotemperaturowe chemiczne osadzanie z fazy gazowej)
HHCD – *Hot Hollow Cathode Deposition* (odparowanie metalu niskonapięciowym działem elektronowym)
HPDL – *High Power Diode Laser* (laser diodowy dużej mocy)
HRA – *Hardness by Rockwell's method in A scale* (jednostka twardości mierzonej metodą Rockwella w skali A)
HRC – *Hardness by Rockwell's method in C scale* (jednostka twardości mierzonej metodą Rockwella w skali C)
HRF – *Hardness by Rockwell's method in F scale* (jednostka twardości mierzonej metodą Rockwella w skali F)
HSS – *High Speed Steel* (stal szybkotnąca)
HTT – *High Temperature Tribometer* (wysokotemperaturowy tribometr)
HV – *Hardness by Vickers* (jednostka twardości mierzonej statyczną metodą Vickersa)
IBAD – *Ion Beam Assisted Deposition* (osadzanie warstw z wykorzystaniem wiązki jonowej)
ICB – *Ion Cluster Beam* (reaktywne nanoszenie ze zjonizowanych klastrów)
LAPVD – *Laser Assisted Chemical Vapour Deposition* (fizyczne osadzanie z fazy gazowej wspomagane laserowo)
LCVD – *Laser Chemical Vapour Deposition* (chemiczne osadzanie z fazy gazowej aktywowane laserowo)
LDPE – ***L**ow **D**ensity **P**oly**e**thylene* (polietylen małej gęstości)
LNN – *Linear Neural Networks* (sieci neuronowe liniowe)
LPCVD – *Low Pressure Chemical Vapour Deposition* (chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej pod obniżonym ciśnieniem)
LPPT – *Low Pressure Plasma Treatment* (obróbka plazmą niskotemperaturową w warunkach obniżonego ciśnienia)
MES – metoda elementów skończonych
MG – materiał gradientowy
MLP – ***M**ulti**l**ayer **P**erceptron* (perceptron wielowarstwowy)
MMA – *Manual Metal Arc* (ręczne napawanie łukowe)
MMCs – ***M**etal **M**atrix **C**omposite**s*** (kompozyty o osnowie metalowej)
MOCVD – *Metal Organic Chemical Vapour Deposition* (osadzanie powłok z fazy gazowej z użyciem prekursorów metaloorganicznych)
MSP – małe i średnie przedsiębiorstwa
MTO – *Make-to-Order* (wytwarzanie na zlecenie)
MWCVD – ***M**icro**w**ave **C**hemical **V**apour **D**eposition* (plazmochemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej z użyciem mikrofal)
NN FIRM – *Neural Network for Foresight Integrated Research Management* (sieci neuronowe do zarządzania zintegrowanymi badaniami foresightowymi)
OPI – Ośrodek Przetwarzania Informacji
OW – organizacja wirtualna

PC – ***Poly**carbonate* (poliwęglan)
PET – ***Poly**ethylene **t**erephthalate* (politereftalan etylenu)
PLA – ***Poly**l**a**ctide* (poliaktyd)
PACVD – *Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition* (plazmochemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej)
PECVD – *Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition* (plazmochemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej)
PI – platforma internetowa
PKB – produkt krajowy brutto
PKD – Polska Klasyfikacja Działalności
PLD – *Pulsed Laser Deposition* (ablacja laserowa)
PN – *Plasma Nitriding* (azotowanie plazmowe)
PP – ***Poly**propylene* (polipropylen)
PPM – *Pulse Plasma Method* (odparowanie metalu impulsowo-plazmowe)
PS – ***Poly**styrene* (polistyren)
PSP – ***Post**synaptic **P**otential* (funkcja potencjału postsynaptycznego)
PTA – *Plasma Transferred Arc* (napawanie łukiem plazmowym)
PVD – *Physical Vapour Deposition* (fizyczne osadzanie z fazy gazowej)
RAM – *Random Access Memory* (pamięć operacyjna komputera)
RBF – *Radial Base Functions* (radialne funkcje bazowe)
RFCVD – *Radio Frequency Chemical Vapour Deposition* (plazmochemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej z użyciem fal radiowych)
RIE – *Reactive Ion Etching* (reaktywne trawienie jonowe)
RMS – *Reactive Magnetron Sputtering* (reaktywne rozpylanie magnetronowe)
RPT – *Remote Plasma Treatment* (obróbka plazmą niskotemperaturową generowaną w powietrzu przez generator znajdujący się poza strefą modyfikowania materiału)
RSP – *Rapid Solidification Processing* (proces szybkiego krzepnięcia)
SE – *Second Electrons* (elektrony wtórne)
SEM – *Scanning Electron Microscope/Microscopy* (skaningow(y)/-a mikroskop/-ia elektronow(y)/-a)
SEP – swobodna energia powierzchniowa
SMA – *Shielded Metal Arc* (napawanie łukowe elektrodą otuloną)
SN – sieci neuronowe
SP – strefa przetopienia
SSA – *Speed Streamlined Arc* (napawanie łukowe drutem proszkowym samoosłonowym)
STEEP – ***S**ocial **T**echnological **E**conomic **E**cological **P**olitical and legal* (analiza czynników społeczno-technologiczno-ekonomiczno-ekologiczno-politycznych i prawnych)
SWC – strefa wpływu ciepła
SWOT – *Strengths Weaknesses Opportunities Threats* (analiza mocnych i słabych stron oraz szans i zagrożeń)
TAE – *Thermoionic Arc Evaporation* (odparowanie reaktywne łukiem elektrycznym)
TBC – *Thermal Barrier Coatings* (powłoki stanowiące barierę termiczną)

TEM – *Transmission Electron Microscope/Microscopy* (transmisyjn(y)/-a mikroskop/-ia elektronow(y)/-a)

TGM – *Tool Graded Materials* (narzędziowe materiały gradientowe)

TMPTA – ***Tri**methylol**p**ropane **Tria**crylate* (triakrylan trimetylolopropanu)

TRIP – ***Tr**ansformation **I**nduced **P**lasticity* (stale austenityczne wysokomanganowe, w których podczas odkształcenia plastycznego na zimno indukowana jest przemiana martenzytyczna)

TWIP – ***Tw**innig **I**nduced **P**lasticity* (stale austenityczne wysokomanganowe, w których podczas odkształcenia plastycznego na zimno ma miejsce intensywne bliźniakowanie mechaniczne)

TR – *Technology Roadmaps* (mapy drogowe technologii)

TRIPLEX – *steels consisted of **three p**hases: austenite, ferrite and nanosized carbides* (stale o strukturze trójfazowej: austenityczno-ferrytycznej z dyspersyjnymi węglikami)

UP – Urząd Patentowy

UV – promieniowanie ultrafioletowe

VO FIRM – *Virtual Organisation for Foresight Integrated Research Management* (organizacja wirtualna do zarządzania zintegrowanymi badaniami foresightowymi)

WE – wejściowe, np. dane, zmienne

WP FIRM – *Web Platform for Foresight Integrated Research Management* (platforma internetowa zarządzania zintegrowanymi badaniami foresightowymi)

WK – wyładowania koronowe

WW – warstwa wierzchnia

WY – wyjściowe, np. dane, zmienne

Pozostałe oznaczenia:

Na **rysunku 5** (str. 36) podano oznaczenia grup technologii szczegółowych *S*1-*S*8 poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym w celu weryfikacji poprawności metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów

Na **rysunku 10** (str. 41) podano oznaczenia mezoczynników *C*1-*C*16 najintensywniej oddziałujących na rozwój inżynierii powierzchni materiałów

Na **rysunku 11** (str. 42) podano oznaczenia obszarów tematycznych poddanych badaniom należących do pola badawczego odpowiadającego podejściu procesowemu (*M*): *M*1-*M*7 oraz podejściu konsumenckiemu (*P*): *P*1-*P*7

W **tablicy 2** (str. 47-48) podano oznaczenia technologii/grup technologii szczegółowych A_{S1}-F_{S1}, …, A_{S8}-E_{S8} wyodrębnionych w ramach grup technologii *S*1-*S*8 poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym w celu weryfikacji poprawności metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów

W **tablicy 18** (str. 200-201) podano oznaczenia poddanych badaniom heurystycznym 140 grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów: A_{M1}-J_{M1}, …, A_{M7}-J_{M7} wyodrębnionych w ramach pola badawczego *M* oraz A_{P1}-J_{P1}, …, A_{P7}-J_{P7} wyodrębnionych w ramach pola badawczego *P*

ISSN 2083-5191
ISBN 83-89728-98-2
EAN 9788389728982