

# 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](mailto: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](mailto: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, osiągnięcie 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 użytkowemu 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 produktowi lub jego elementowi, 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 pokryw, 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 obciążona 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 nadstatkiem.

Zrealizowane własne badania materiałoznawczo-heurystyczne [159] miały na celu: identyfikację i ujednoczoną 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 towarzyszącą 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.: *Social Technological Economic Ecological Political and legal*), analizę SWOT (ang.: *Strengths Weaknesses Opportunities Threats*), 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 cieplnochemicznej 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 ujednoczonych 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.