

## 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 osiągnięcia 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 obciążone 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 wspomaganie 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 wspomaganym 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 kilkustopniowego ankietywania 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, mezocynniki, 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. Eksperti 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.