

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

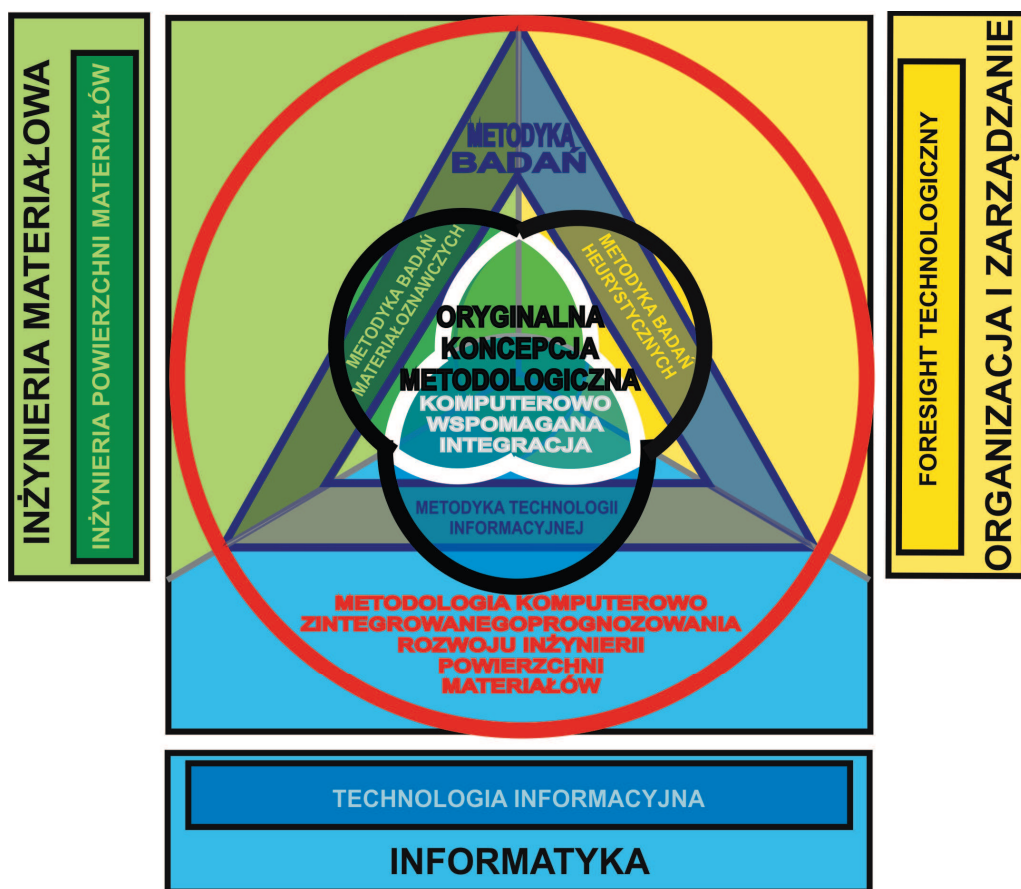
Tezę pracy sformułowano następująco:

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.

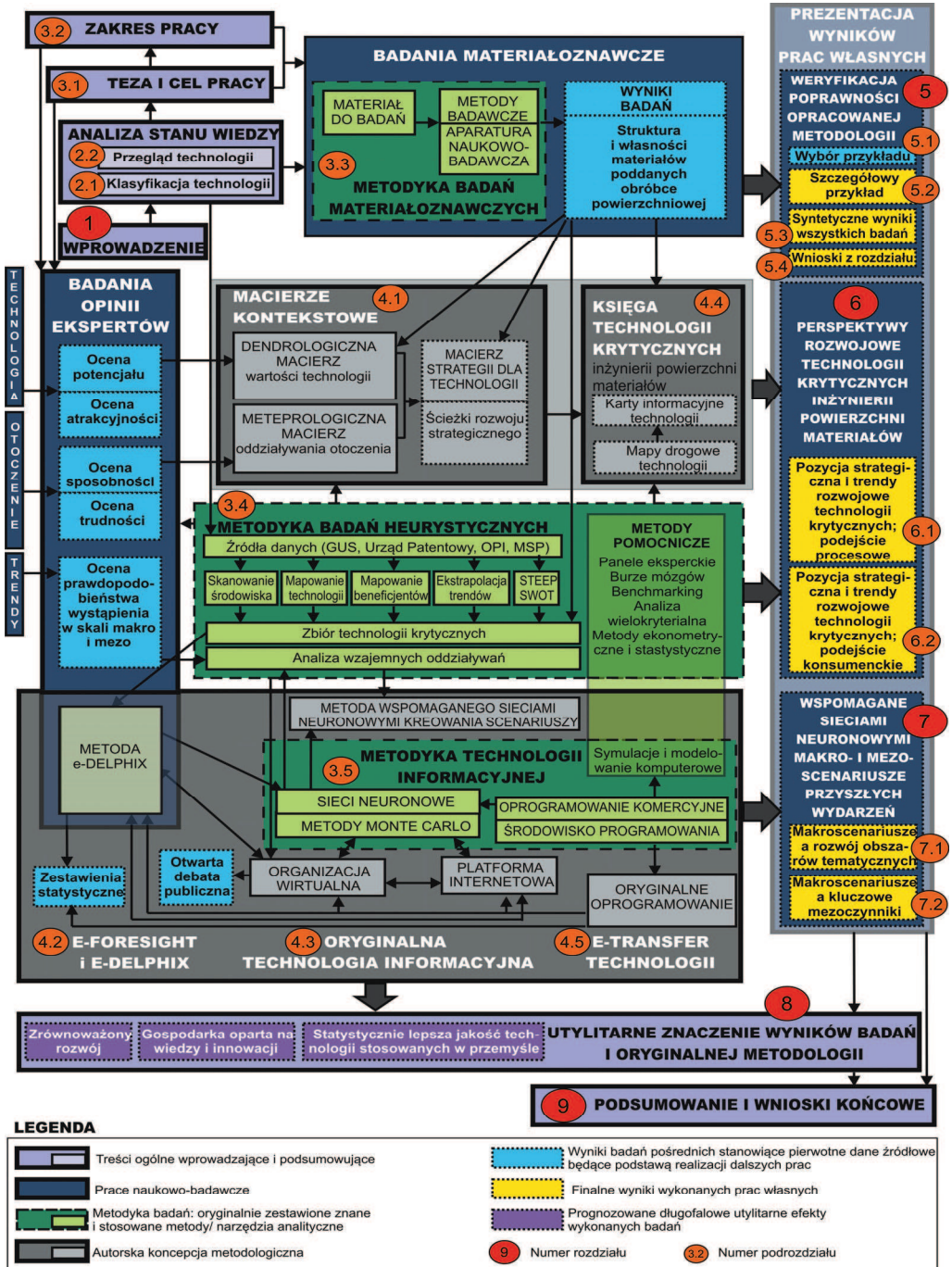
Celem poznawczym rozprawy jest opracowanie oryginalnej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, z wykorzystaniem badań strukturalnych oraz własności mechanicznych i innych własności fizykochemicznych materiałów obrobionych z użyciem różnych technologii 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 wspomaganých 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 szerszej rozumianej dziedziny organizacji i zarządzania oraz technologii informacyjnej, wywodzącej się z informatyki (rys. 2).



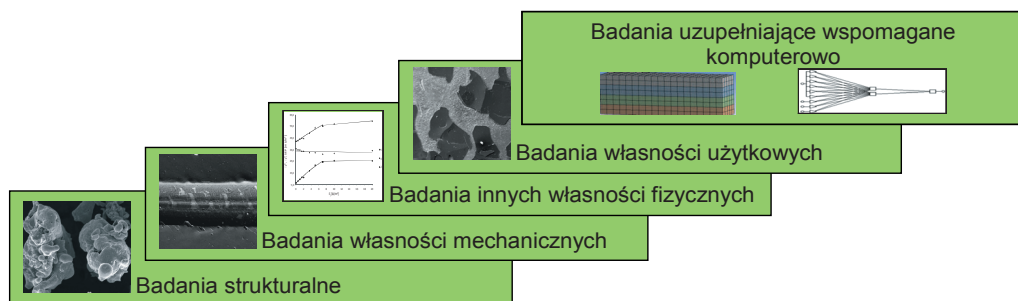
Rysunek 2. Interdyscyplinarna metodologia komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów na tle dziedzin wiedzy i metodyki badań



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 (S1 do S8) [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 mezczynników natury ogólnej, do czego zastosowano sztuczne sieci neuronowe wykorzystane we własnym programie komputerowym.

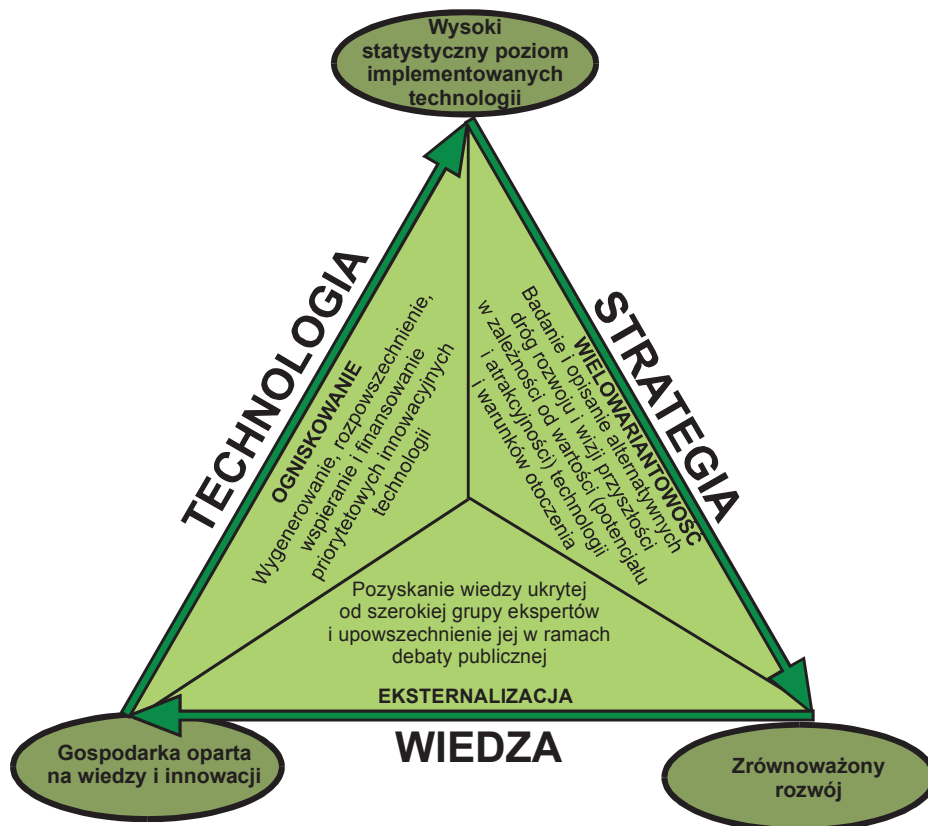


Rysunek 4. Ogólny zakres badań materiałoznawczych



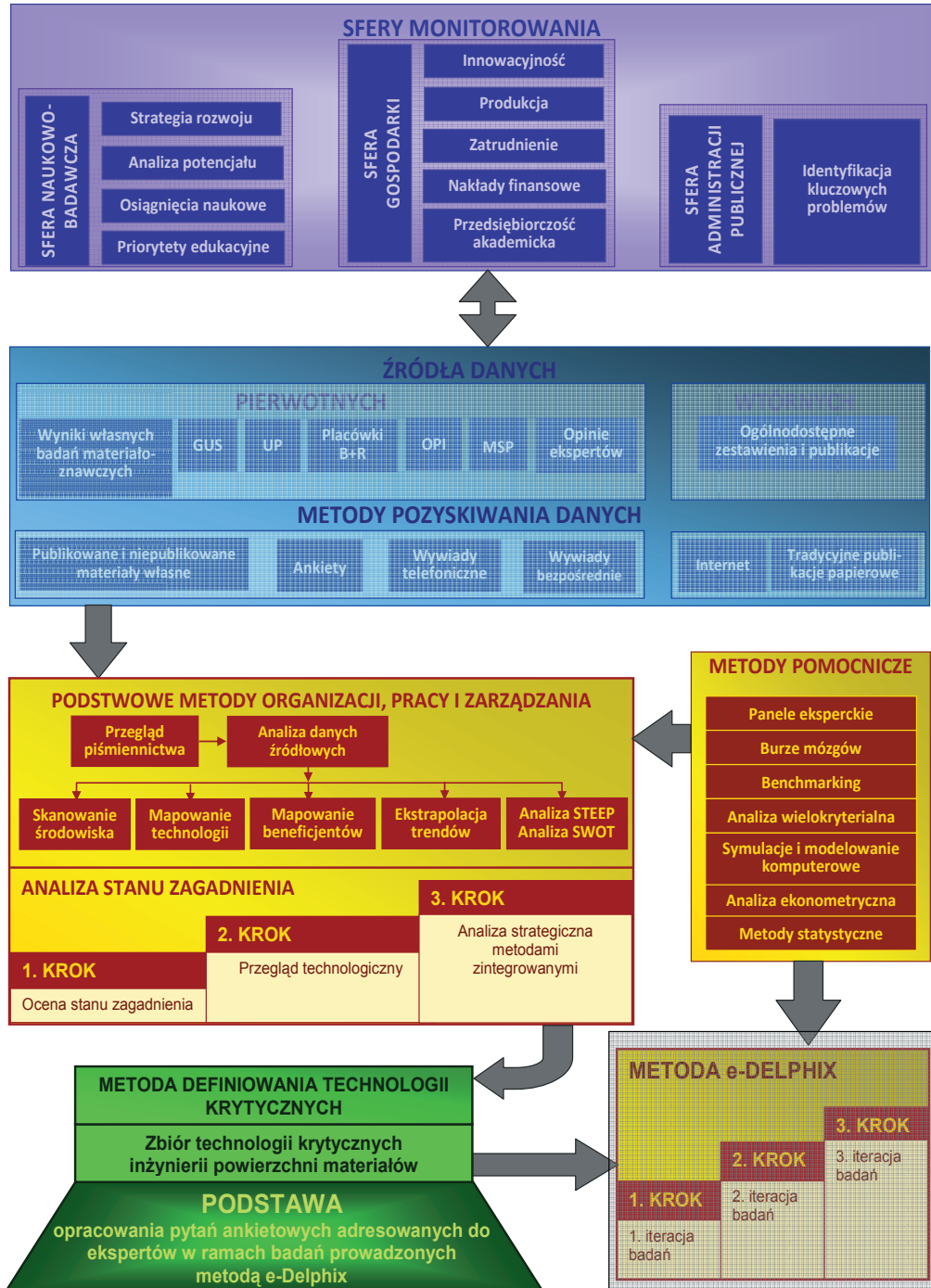
Rysunek 5. Technologie szczegółowe poddane analizie w celu weryfikacji poprawności metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów

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 powiązaniem 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

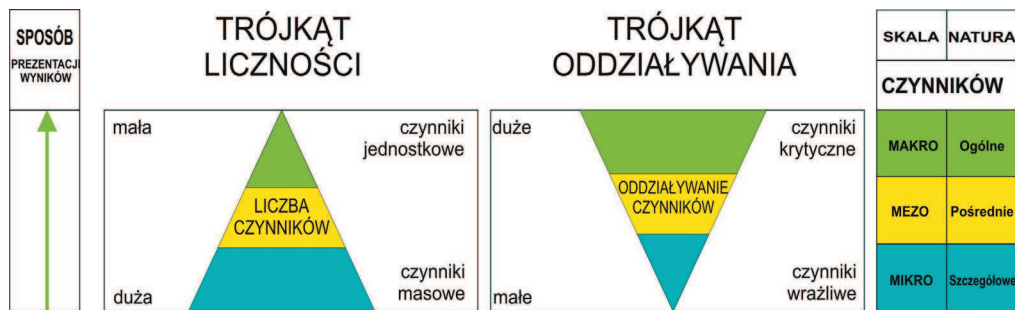


Rysunek 6. Trójkąt foresightu technologicznego [302]

[180-183] z użyciem metody e-Delphix [161, 175, 301] zapożyczającej ogólny zamysł kilkunastuetapowego 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

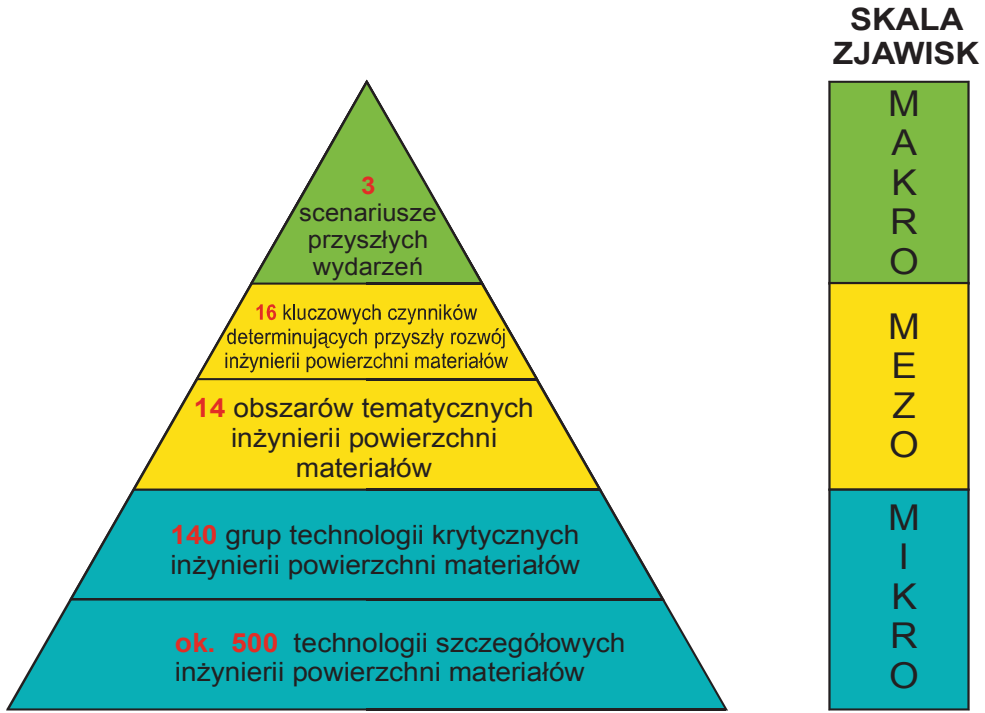
Skala i stopień skomplikowania badań, prowadzonych równoległe w odniesieniu do 14 obszarów tematycznych na różnych poziomach szczegółowości, zdeterminowały konieczność zastosowania nowoczesnej technologii informacyjnej, bez użycia której nie byłoby możliwe ani zebranie tak dużej liczby danych, ani – 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,
- **mezocynniki**, 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.

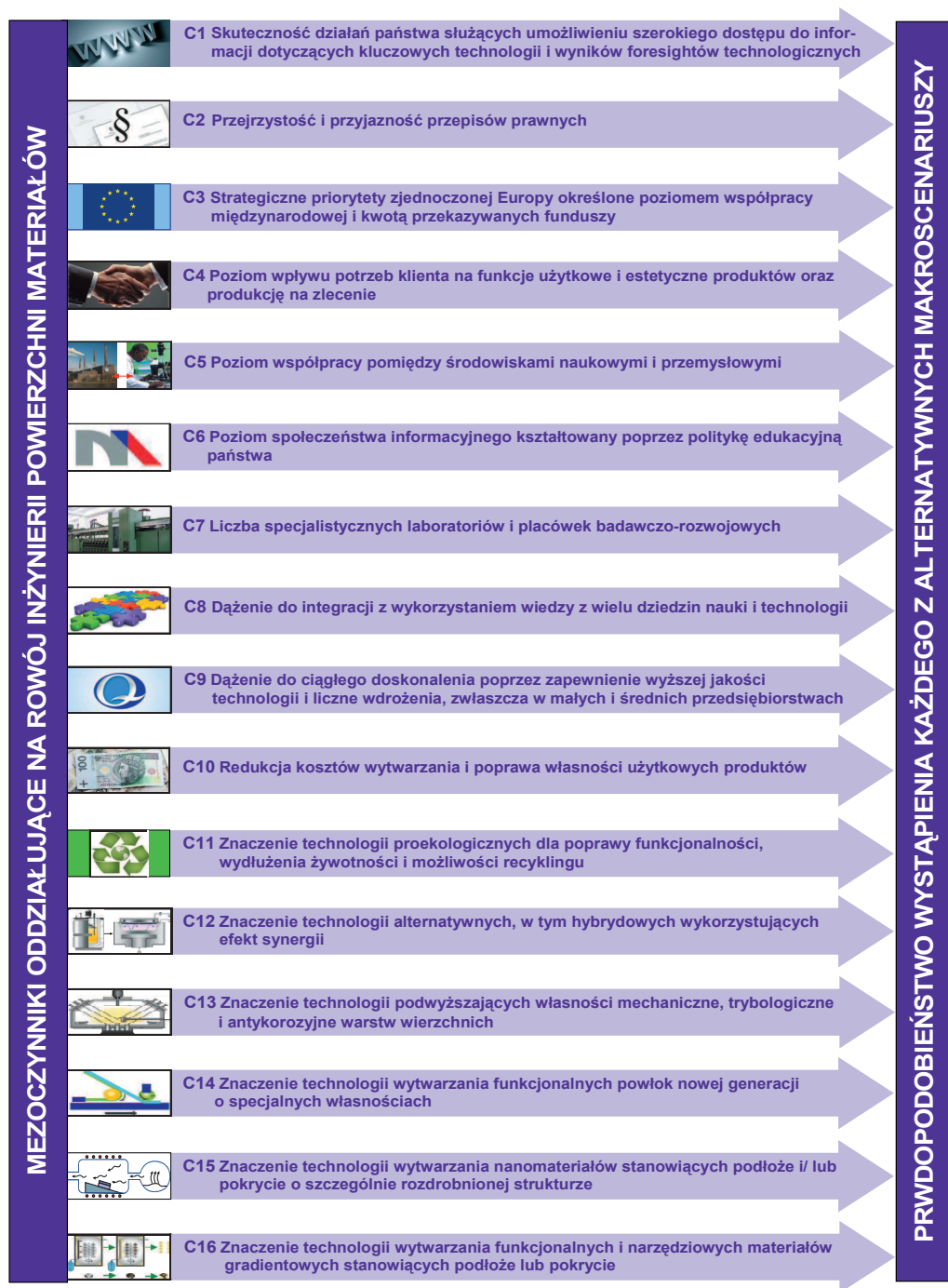
Na **poziomie makro** rozpatrywane są 3 alternatywne scenariusze przyszłych wydarzeń: optymistyczny, neutralny i pesymistyczny, które utworzono na podstawie wyników badań ankietowych przeprowadzonych drogą elektroniczną wśród kilkuset ekspertów. Wyniki badań eksperckich zaimplementowano jako dane wejściowe 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 produkcji 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

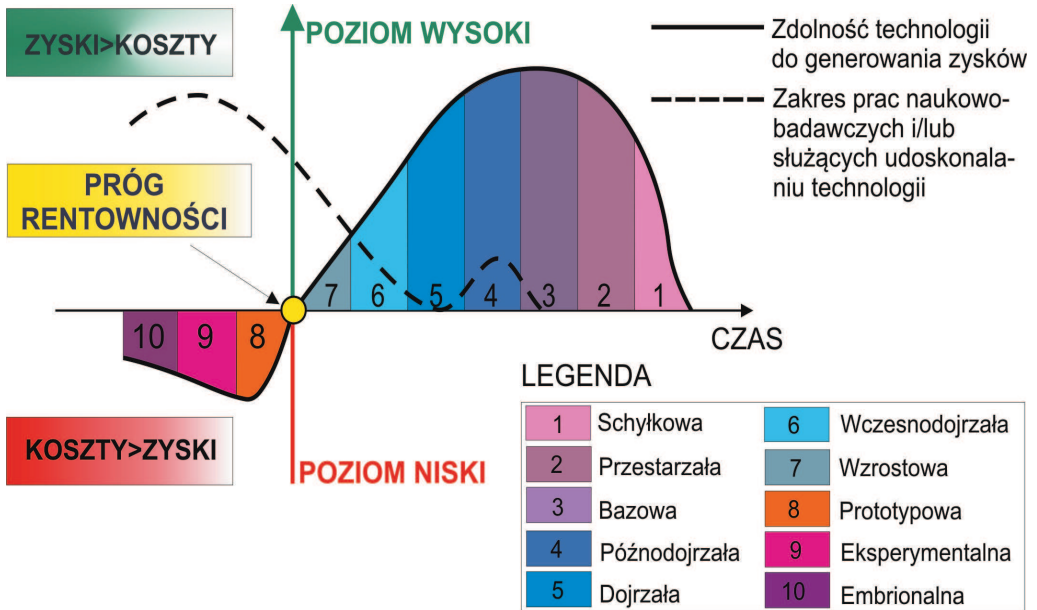
Poziom mikro jest natomiast reprezentowany przez 140 grup technologii krytycznych, obejmujących po 10 grup technologii, wyłonionych w ramach każdego z czternastu obszarów tematycznych. Grupy technologii krytycznych wyselekcjonowano spośród rozpatrywanych w początkowej fazie badań ok. 500 grup technologii 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

WARTOŚĆ LICZBOWA	WYRÓŻNIKI KLAS	POZIOM	
10	0,95 ←	WYBITNIE WYSOKI	doskonałość
9	0,85 ←	BARDZO WYSOKI	
8	0,75 ←	WYSOKI	normalność
7	0,65 ←	DOŚĆ WYSOKI	
6	0,55 ←	UMIARKOWANY	
5	0,45 ←	ŚREDNI	
4	0,35 ←	DOŚĆ NISKI	przeciętność
3	0,25 ←	NISKI	
2	0,15 ←	BARDZO NISKI	
1	0,05 ←	MINIMALNY	

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. Kończącym 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 ujednoczonych 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 S1 do S8. **Materiały do badań** poddano różnym rodzajom **obróbki powierzchniowej** (S1-S6, S8) lub wytworzono z nich próbki, których warstwę powierzchniową charakteryzują odmienne własności niż własności pozostałych warstw (S7). Podjęcie badań materiałoznawczo-heurystycznych wymaga przyjęcia w ramach każdej grupy technologii ze zbioru S1-S8 indywidualnego kryterium podziału, pozwalającego na wyodrębnienie homogenicznych technologii lub ich grup, stanowiących podstawę analizy porównawczej. Wyodrębnione, w ramach każdej grupy technologii ze zbioru S1-S8, technologie szczegółowe lub ich grupy oznaczono symbolami alfanumerycznymi, używając kolejnych wielkich liter alfabetu z dolnym indeksem, wskazującym na reprezentowaną grupę technologii. W tabelicy 2 przedstawiono materiał do badań oraz kryterium podziału grup technologii szczegółowych S1-S8 wraz z wyróżnionymi w ich ramach technologiami/ grupami technologii poddanych badaniom eksperymentalno-porównawczym.

Materiały obrobione powierzchniowo, z użyciem różnych technologii (S1-S6, S8) lub wytworzone klasyczną metodą metalurgii proszków (S7), poddano w różnym zakresie badaniom strukturalnym, badaniom własności mechanicznych i innych własności fizycznych¹⁾, własności użytkowych oraz badaniom uzupełniającym wspomaganym komputerowo. W tabelicy 3 zestawiono rodzaje wykonanych badań i użytą do tego celu aparaturę naukowo-badawczą, oznaczając symbolami S1-S8 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 (S1), poprzedzony krótką analizą wskazującą kryteria wyboru tego właśnie przykładu oraz syntetyczne wyniki badań, odnoszące się do pozostałych siedmiu grup technologii (S2-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 technologiami/ grupami technologii poddanych badaniom eksperymentalno-porównawczym

Grupa technologii	Materiał do badań	Kryterium podziału	Wyodrębnione technologie/ grupy technologii poddane badaniom eksperymentalno-porównawczym				
			Symbol	Opis			
S1	Stopowe stale narzędziowe do pracy na gorąco X40CrMoV5-1 i 32CrMoV12-28 obrabione cieplnie i mechanicznie; proszki węglików niobu, tantal, 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		
S2	Odlewnicze stopy magnezu MCMgAl12Zn1, MCMgAl9Zn, MCMgAl6Zn1, MCMgAl3Zn obrabione cieplnie i mechanicznie; proszki węglików tytanu, wolframu, wanadu i krzemu oraz tlenku aluminium	Rodzaj proszku naniesionego na podłoże	A _{S2}	Laserowe przetapianie i wtapienie 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 ₂ O ₃		
S3	Stop miedzi z cynkiem CuZn40Pb2	Liczba warstw tworzących powłokę	A _{S3}	Fizyczne osadzanie z fazy gazowej	jednowarstwowych, n=1	powłok metodą reaktywnego rozpylania magnetronego (ang.: <i>Reactive Magnetron Sputtering</i> – RMS)	
			B _{S3}		kilkunastowarstwowych, n=15		
			C _{S3}		multiwarstwowych, n=150		
S4	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 szybko tnące 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 elektrożużłowo 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			
S5	Spiekane materiały narzędziowe na bazie węglików spiekanych, cermetali, ceramiki tlenkowej i azotkowej oraz szalony	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				
S5			E_{S5}		wielowarstwowych, $n < 10$ powłok CVD metodą klasycznego wysokotemperaturowego chemicznego osadzania z fazy gazowej (HFCVD)			
S6	Płytki krzemu polikrystalicznego domieszkowanego borem	Typ teksturowania	A_{S6}	Teksturowanie	alkaliczne		krzemu polikrystalicznego	
			B_{S6}		laserowe			
			C_{S6}		laserowe z chemicznym trawieniem			
S7	Proszki stali szybko tnącej HS6-5-2, kobaltu i węgla 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 szybko tnącej	10%	udziału objętościowego fazy WC w warstwie powierzchniowej
			B_{S7}		MG-75HSS- /25WC	HS6-5-2 zawierających	25%	
			C_{S7}		MG-3Co /97WC	o osnowie Co zawierających	97%	
S8	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 prekursorzy 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 Plock; HDPE – polietylen dużej gęstości Hostalen ACP 5831 D, Basell Orlen Polyolefins Plock; PP – polipropylen izotaktyczny Malen P F 401, Basell Orlen Polyolefins Plock; PS – polistyren Owispol 945 E, Dwory SA; PET – poli(tereftalan etylenu) amorficzny Elpet-A, Boryszew SA; TMPTA – kompatybilizator: triakrylan trimetylopropanu, Sigma Aldrich.	Procesy fizyczne powodujące modyfikację warstwy powierzchniowej materiału polimerowego	A_{S8}	Modyfikacja warstwy wierzchniej wybranych materiałów polimerowych	modyfikacja warstwy wierzchniej PLA metodą wylądowań 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 metalograficzne (zglądów nietrawionych i trawionych, powierzchni materiałów przed obróbką i/lub po obróbce powierzchniowej, próbków do badań, powierzchni uszkodzonej/zarysowanej)		Mikroskopy świetlne: Leica MEF4A; MeF, Reichert; Neophot 2, Carl Zeiss Jena; Axiovert 405M, Opton			S1-S4, S5, S7	
		SEM: DSM-940, Opton; SUPRA 35, ZEISS; XL-30, Philips; JXA-50A, JEOL			S1-S8	
		Mikroskop konfokalny: CLSM 5 Exciter, ZEISS			S5	
Badania fraktograficzne (przełomy próbek)		SEM: XL-30, Philips, SUPRA 35, ZEISS			S3, S5, S7, S8	
Pomiary w mikroskali: głębokości strefy przetopienia i wpływu ciepła, szerokości lica ścięgu, 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			S1, S2, S3, S4, S5, S7, S8	
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			S1-S3, S5, S7-S8	
Analiza rozkładu powierzchniowego pierwiastków stopowych (po obróbce powierzchniowej, po badaniu odporności erozyjnej)					S1-S4, S7	
Analiza składu fazowego i/lub struktury krystalograficznej		Dyfraktometr rentgenowski: X'Pert PRO firmy Panalytical, Dron 2.0, FPM Seifert, Siemens-Halske Kristalloflex-4			S2-S5, S7	
Badania tekstury	metodą figur biegunowych odwrotnych				S3	
	metodą refleksyjną				S4	
Badania dyfrakcyjne i/lub obserwacje struktury cienkich folii		TEM: JEM 3010UHR firmy JEOL, Tesla BS 540, JEOL 200CX			S1, S4-S5, S7	
Badania zmiany stężenia pierwiastków w warstwie powierzchniowej, materiale podłoża i/lub w strefie przejściowej		Spektrometr optyczny wyładowania jarzeniowego GDOS-75 QDP, Leco Instruments			S3, S4, S5	
Badania grubości powłok metodą kalotestu		Stanowisko do utworzenia krateru w badanym materiale			S3, S5	
Badania dylatometryczne w celu wyznaczenia współczynnika rozszerzalności liniowej i temperatury przemian fazowych		Dylatometr różnicowy firmy Adamel; dylatometry bezwzględne: DI-4 i Linceis			S4	
Badania stopnia utlenienia warstwy powierzchniowej		Spektrometr elektronowy Escalab 210, VG Scientific			S8	
Badania własności mechanicznych						
Badania twardości metodą Rockwella w skali		A	C	F	Twardościomierz firmy Zwick ZHR 4150TK	S7 S1, S4, S7 S2
Badania mikrotwardości	statyczną, HV	metodą Vickersa		Ultramikrotwardościomierz DUH 202, Shimadzu, mikrotwardościomierz Future Tech		S1, S2, S7
	dynamiczną, DHV					S3, S5
Badania sztywności/ naprężeń wewnętrznych / modułu Younga		Program Hardness 4.2 sprzężony z urządzeniem DUH 202, Shimadzu			S3	
Badania przyczepności powłok do podłoża metodą zarysowania (ang.: <i>scratch test</i>) dla wyznaczenia obciążenia krytycznego L_{C2}		Sterowane komputerowo urządzenie Sebastian 5A, Quad Group; urządzenie REVETEST, CSEM			S3, S5	
Badania pracy łamania (udarność)		Młot udarowościowy Charpy'ego			S4	
Badania wytrzymałości na rozciąganie i zginanie		Maszyna wytrzymałościowa Instron 1195 z przystawką wysokotemperaturową			S4	
Badania wytrzymałości zmęczeniowej		Maszyna wytrzymałościowa PWY firmy Schenck			S4	

Rodzaj badania		Aparatura naukowo-badawcza	Symbole grup technologii
Badania wytrzymałości zmęczeniowej stopy zębów Z_{gj}		Stanowisko badawcze: dwie przekładnie (obiekt badań-przekładnia zamykająca)	S4
Badania odporności na kruche pękanie K_{Ic} metodą Palmqvista		Twardościomierz firmy Zwick ZHR 4150TK	S7
Badania innych własności fizycznych			
Badania średniego arytmetycznego odchylenia profilu od linii średniej R_a (chropowatości)		Profilometr Sutronic 3+ firmy Taylor Hobson	S1, S2, S3, S5
Badania grawimetryczne w celu określenia zmian masy próbek podczas cyklicznych zmian temperatury		Waga analityczna WA-31	S4
Badanie współczynnika odbicia promieniowania elektromagnetycznego (własności optyczne)		Spektrometr Perkin-Elmer Lambda wyposażony w sferę całkującą	S6
Badanie własności elektrycznych wytworzonych ogniw solarnych		Stanowisko SOLAR-LAB do pomiaru charakterystyk I-V ogniw solarnych	S6
Pomiar gęstości	właściwej (rzeczywistej)	Piknometr gazowy AccuPyc 1330, Micromeritics	S7
	metodą densymetryczną	Stanowisko pomiarowe: pozorna strata masy próbki przy zanurzeniu w wodzie	S7
Badania stereologiczne w celu pomiaru porowatości		Komputerowa analiza obrazu Image-Pro Plus/ mikroskop: Axiovert 405M, Opton	S7
Badanie kąta zwilżania w celu obliczenia swobodnej energii powierzchniowej (SEP) metodą Owensa-Wendta		Goniometr, Akchem; tensometr, Sigma-Aldrich	S8
Badania własności użytkowych			
Badania odporności erozyjnej		Urządzenie strumieniowo powietrzne Falex Air Jet Eroder, Falex Corporation;	S3
Badania odporności korozyjnej		PGP 201 Potentiostat/ Galvanostat	S3
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	S1
	metodą <i>pin-on-disc</i>	Tribometr CSEM HTT (High Temperature Tribometer)	S3-S5, S7
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	S1, S4
Badania własności skrawnych	dla wyznaczenia szerokości pasma zużycia VB_{max}	Stanowisko do wiercenia otworów w normalizowanej stali o określonej twardości	S4
	dla wyznaczenia parametru trwałości ostrza i wzrostu trwałości ostrza	Tokarka do próby ciągłego toczenia bez użycia cieczy chodząco-smarujących	S5
Wspomagane komputerowo badania uzupełniające			
Weryfikacja poprawności badań twardości		z użyciem sztucznych sieci neuronowych	S2
Ocena wpływu własności powłok na ich trwałość eksploatacyjną			S5
Obliczenie udziału objętościowego austenitu szczałkowego w stalach metodą Averbacha-Cohena		Program komputerowy opracowany w Instytucie Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej	S7
Rozwiązanie dyfraktogramów z TEM		Program komputerowy Eldyf	S7
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 embryonalne. 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 Społeczno-Technologiczno-Ekologiczno-Politycznych i prawnych oddziałujących na analizowane zjawiska, umożliwiającą 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.: <i>Strengths Weaknesses Opportunities Threats</i>) 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 mózgow	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.	<i>Benchmarking</i>	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 postrzeżenie 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.

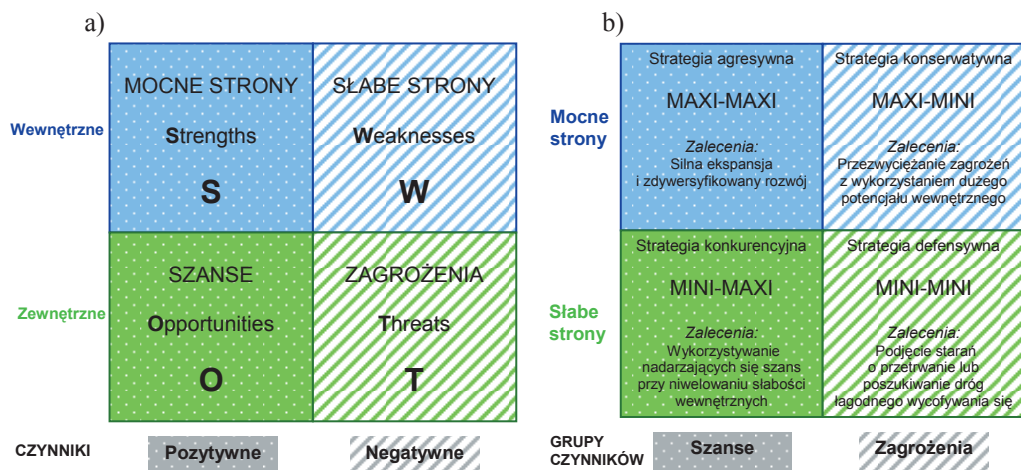
Zdefiniowane w ramach **analizy STEEP** kluczowe czynniki zewnętrzne z podziałem na pozytywne i negatywne, zwane odpowiednio szansami i zagrożeniami, zostały bezpośrednio zaimplementowane do dalszych badań prowadzonych z użyciem **analizy SWOT**, uwzględniającej ponadto wewnętrzne czynniki pozytywne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



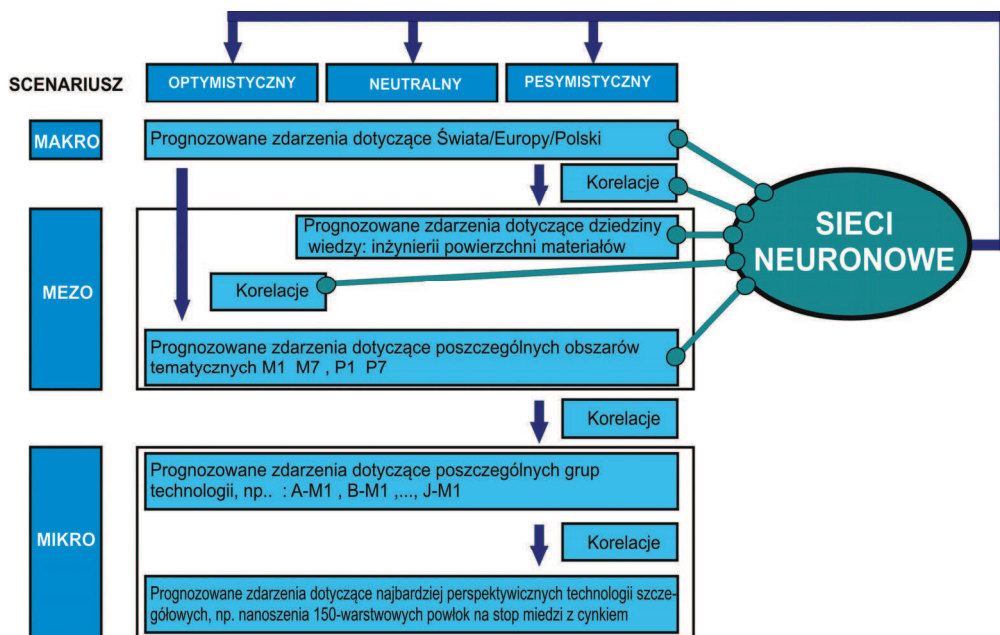
Rysunek 14. Grupy czynników rozpatrywanych podczas analizy SWOT (a) i rekomendowane strategie postępowania w odniesieniu do badanych grup technologii (b) [161, 188, 301]

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 4.0F, 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*). Eksperti 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 makroszenariuszy: 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 licznosci 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 tabelicy 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*)

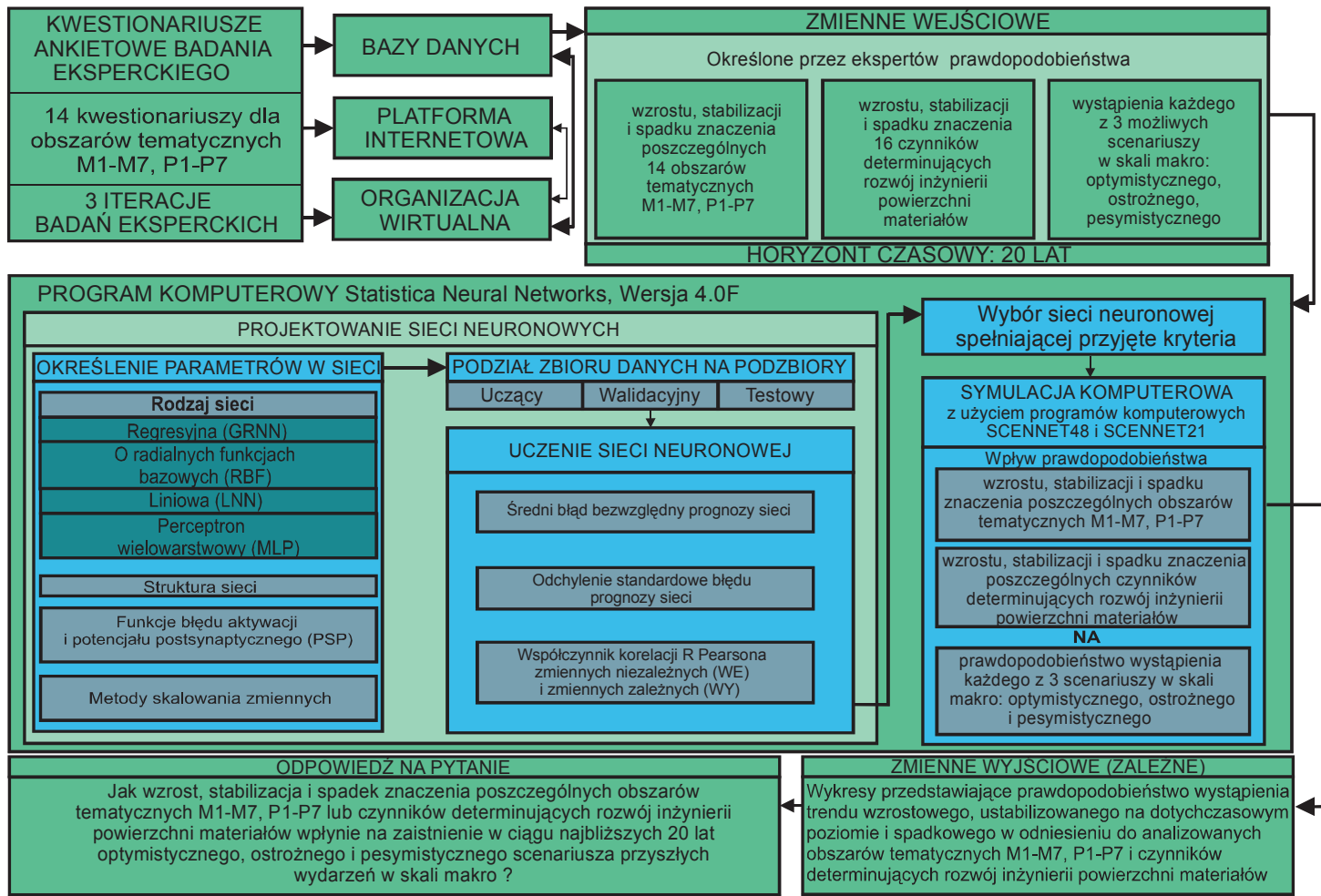
Oznaczenie sieci		3.2M_1	3.2M_2	3.2M_3	3.2M_4	3.2M_5
Rodzaj sieci/ liczba neuronów w warstwach: wejściowej-ukrytej-wyjściowej		MLP/ 21-2-1	MLP/ 21-4-1	MLP/ 21-5-1	MLP/ 21-9-1	MLP/ 21-11-1
Metoda uczenia/ liczba epok treningowych		BP/50, CG/116	BP/50, CG/188	BP/50, CG/67	BP/50, CG/199	BP/50, CG/147
Średni 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
Objasnienia: 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 wyjściowych²⁾, 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.: <i>General Regression Neural Network</i> – 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	próbkiwanie	wykładnicza, liniowa z nasyceniem	ilorazowa, radialna, liniowa/ suma kwadratów
2.	Sieci neuronowe o radialnych funkcjach bazowych (ang.: <i>Radial Base Functions</i> – 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.: <i>Linear Neural Networks</i> – 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.: <i>Multilayer Perceptron</i> – 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.