

7. Badania foresightowe analizowanych technologii kształtowania warstwy powierzchniowej odlewniczych stopów magnezu

Badania foresightowe służą poszukiwaniu innowacyjnych obszarów zasługujących na wsparcie finansowe. Badania takie są prowadzone w ostatniej dekadzie na szeroką skalę w Europie i w Polsce, również w odniesieniu do inżynierii materiałowej [265-269]. Foresight technologiczny służący identyfikacji priorytetowych innowacyjnych technologii i określeniu kierunków ich rozwoju strategicznego został także przeprowadzony w odniesieniu do inżynierii powierzchni materiałów [264]. Badania foresightowe, są jednym z elementów planowania i realizacji wytyczonej w ostatnich latach priorytetowej strategii Unii Europejskiej o nazwie Europa 2020 [270], która zakłada że rozwój kontynentu powinien być inteligentny, sprzyjający włączeniu społecznemu i zrównoważony, którego ideę przedstawiono na rysunku 7.1. Zgodnie z tą koncepcją konieczne jest podjęcie kompleksowego działania na obszarze europejskim, krajowym i regionalnym, zmierzającego do wspierania bardziej efektywnej, konkurencyjnej i niskoemisyjnej gospodarki opartej na wiedzy i innowacyjności, zapewniającej wysoki poziom zatrudnienia oraz spójność społeczną i terytorialną. Pomocy finansowej dla poszczególnych regionów Unii służy Polityka Spójności promująca mikro-, małe i średnie przedsiębiorstwa, przykładowo stanowiące w Polsce 99,8% wszystkich istniejących podmiotów prowadzących działalność gospodarczą, wytwarzających 68% PKB. Dla realizacji strategii Europa 2020 wyznaczono pięć wyrażonych ilościowo celów strategicznych, które powinny być osiągnięte do 2020 roku. Cele te dotyczą odpowiednio: wzrostu poziomu zatrudnienia, wzrostu poziomu inwestycji na badania i rozwój oraz innowacje, ograniczenia negatywnych skutków zmian klimatu i lepszego wykorzystania źródeł energii, w tym odnawialnych, wzrostu poziomu edukacji oraz redukcji ubóstwa i wykluczenia społecznego. Jednym ze sposobów rozwiązania problemów społeczno-gospodarczych jest projekt dotyczący ustanowienia Unii Innowacji [271] koncentrujący się na innowacjach rozumianych jako cenne, nowatorskie pomysły. Kluczowe w tym kontekście staje się priorytetowe ukierunkowanie badań naukowych na najlepiej rokujące dziedziny i dyscypliny naukowe, mogące mieć duży wpływ na szybki rozwój cywilizacyjno-gospodarczy kraju w oparciu o społeczeństwo informacyjne.



Rysunek 7.1. Zrównoważony rozwój [272]

W zrealizowanym w ramach prac własnych foresightcie technologicznym FORSURF [264] na różnych etapach prac uczestniczyło ogółem ok. 400 niezależnych ekspertów krajowych i zagranicznych, reprezentujących środowiska naukowe, biznesowe i administrację publiczną, którzy wypełnili ok. 800 wielopytaniowych kwestionariuszy ankietowych i przeprowadzili dyskusje tematyczne podczas 10 Workshopów i międzynarodowej konferencji. W początkowej fazie badań przeprowadzono analizę perspektyw rozwojowych ok. 500 grup technologii szczegółowych, obejmującą ocenę stanu zagadnienia, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi. W tym celu zastosowano następujące metody naukowo-badawcze: ekstrapolację trendów, skanowanie środowiska, analizę STEEP, analizę SWOT, panele eksperckie, burze mózgów, benchmarking, analizę wielokryterialną, symulacje i modelowanie komputerowe, analizę ekonometryczną i statystyczną. W wyniku przeprowadzonych prac wyłoniono w ramach 14 obszarów tematycznych po 10 technologii krytycznych. Zbiór 140 technologii krytycznych poddano szczegółowej analizie w ramach trzech iteracji metody e-Delphix zrealizowanej zgodnie z ideą e-foresightu [273] z wykorzystaniem technologii informacyjnej obejmującej organizację wirtualną, platformę internetową i sieci neuronowe.

W niniejszym rozdziale przedstawiono oparte na danych źródłowych wyniki badań foresightowych [264] dotyczących pozycji, na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem,

technologii fizycznego (PVD) i chemicznego (CVD) osadzania powłok z fazy gazowej oraz technologii laserowego kształtowania warstwy powierzchniowej odlewniczych stopów magnezu. Szczególną uwagę w prowadzonych rozważaniach poświęcono: katodowemu odparowywaniu lukowemu (CAD), będącemu metodą fizycznego osadzania powłok z fazy gazowej, chemicznemu osadzaniu powłok z fazy gazowej ze wspomaganie plazmowym (PACVD) oraz stopowaniu/wtapieniu cząstek węglików lub tlenku w powierzchnię podłoża, które to technologie zastosowano podczas wykonanych eksperymentów materiałoznawczych. Zaprezentowano także wyniki badań materiałoznawczo-heurystycznych dotyczących jedenastu grup technologii szczegółowych obróbki powierzchniowej odlewniczych stopów magnezu $MCMgAl_{12}Zn_1$, $MCMgAl_{19}Zn_1$, $MCMgAl_{16}Zn_1$, $MCMgAl_{13}Zn_1$ stosując jako kryterium podziału procesy fizyczne, w wyniku których ma miejsce zmiana własności warstwy powierzchniowej, typ naniesionych powłok i/lub rodzaj proszku nanoszonego na podłoże. W szczególności technologie te obejmują: nanoszenie powłok $Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N$ (*A*), $Ti/Ti(C,N)/CrN$ (*B*), $Cr/CrN/CrN$ (*C*), $Cr/CrN/TiN$ (*D*) i $Ti/(Ti,Si)N/(Ti,Si)N$ (*E*) w procesach fizycznego osadzania z fazy gazowej oraz powłok $Ti/DLC/DLC$ (*F*) w procesach chemicznego osadzania z fazy gazowej, a także laserową obróbkę powierzchniową węglikiem tytanu (*G*), węglikiem wolframu (*H*), węglikiem wanadu (*I*), węglikiem krzemu (*J*) i tlenkiem aluminium Al_2O_3 (*K*). Przedmiotem analizy porównawczej są zarówno wyniki badań struktury i własności analizowanych materiałów przeprowadzone z użyciem specjalistycznej aparatury badawczej, jak i określona w drodze badań eksperckich zgodnie z autorską metodologią [274] wartość poszczególnych technologii na tle otoczenia i ich długoterminowe perspektywy rozwojowe wraz z zalecanymi strategiami postępowania i prognozowanymi wielowariantowymi ścieżkami rozwoju. Synergiczne oddziaływanie i wzajemne uzupełnianie się metod badań materiałoznawczych i heurystycznych jest gwarantem trafności i adekwatności dokonywanych ocen. Na ostatnim etapie prac sporządzono mapy drogowe technologii będące narzędziem analizy porównawczej przydatnym zwłaszcza dla małych i średnich przedsiębiorstw nie posiadających funduszy na przeprowadzenie badań własnych w tym zakresie. W niniejszym rozdziale przedstawiono jedynie heurystyczną część wyników badań, ponieważ szczegóły dotyczące wpływu procesów fizycznego i chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej na strukturę i własności odlewniczych stopów magnezu zostały przedstawione w rozdziale 5., a obróbki z użyciem lasera diodowego dużej mocy – w rozdziale 6. niniejszej książki.

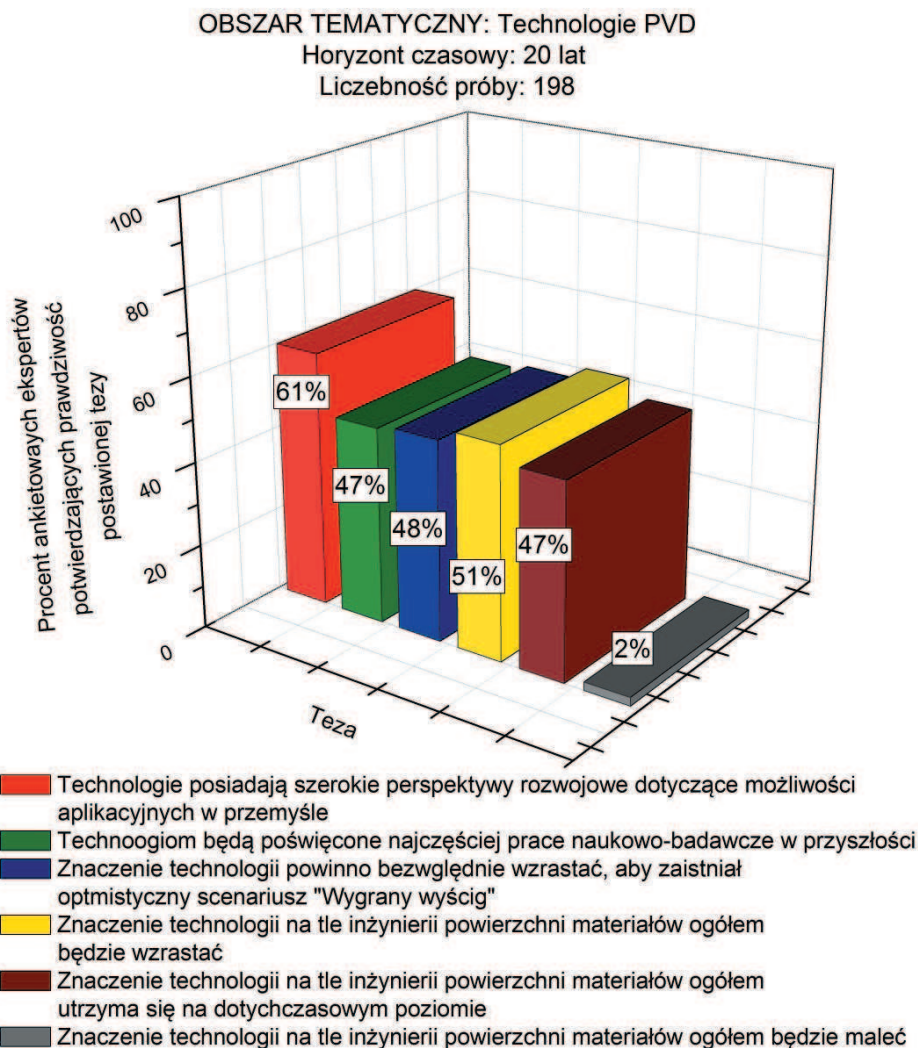
7.1. Prognoza rozwoju fizycznego i chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej oraz laserowej obróbki powierzchniowej

Pozycję strategiczną technologii fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej oraz laserowej obróbki powierzchniowej na tle inżynierii powierzchni materiałów określono z wykorzystaniem danych źródłowych pozyskanych w toku realizacji projektu dotyczącego wiodących technologii kształtowania własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych [264]. Badania o liczebności próby 198 wykonano drogą elektronicznej ankietyzacji ekspertów z użyciem metody e-Delphix.

Wykonane badania e-foresightowe wykazały istotne znaczenie rozwoju technologii PVD dla rozwoju inżynierii powierzchni materiałów ogółem (rys. 7.1.1). Zdaniem 61% respondentów technologii PVD znajdują się w grupie technologii o najlepszych perspektywach aplikacyjnych w przemyśle, a 47% uważa, że będą im poświęcane liczne prace naukowo-badawcze w ciągu najbliższych 20 lat. Ponadto blisko połowa ankietowanych (48%) jest zdania, że obszar tematyczny „Technologie PVD” jest kluczowy i jego znaczenie powinno bezwzględnie wzrastać, aby miał szansę sprawdzić się optymistyczny scenariusz rozwoju Kraju/Europy/Świata „Wygrany wyścig” zakładający, że dostępny potencjał jest należycie wykorzystywany dla realizacji strategicznych celów rozwojowych, statystycznie ludziom żyje się lepiej, nastroje społeczne są optymistyczne, a perspektywy na kolejne lata świetlane. Zdaniem 51% ankietowanych znaczenie technologii PVD w odniesieniu do pozostałych technologii inżynierii powierzchni materiałów będzie wzrastać, 47% uważa, że utrzyma się na dotychczasowym poziomie, a zaledwie 2% stwierdziło, że znaczenie to zmaleje w perspektywie najbliższych 20 lat. Uzyskane wyniki wskazują zatem na przewidywaną istotną rolę technologii PVD w realizacji optymistycznego scenariusza rozwoju polskiej gospodarki w skali makro i mezo. Wyniki badań ankietowych wskazują, że przyszłe znaczenie katodowego odparowywania łukowego (CAD) na tle technologii PVD będzie wzrastać (50%) lub utrzyma się na dotychczasowym poziomie (50%).

Prognozowana pozycja technologii CVD na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem jest stabilna i przewidywalna (rys. 7.1.2). Zdaniem 46% ankietowanych ekspertów technologie te mają szerokie perspektywy aplikacyjne w przemyśle, a 35% – będą im poświęcone liczne prace naukowo-badawcze w rozpatrywanym horyzoncie czasowym 20 lat. Spośród ankietowanych respondentów 37% uważa, że znaczenie technologii CVD powinno wzrastać, aby miał

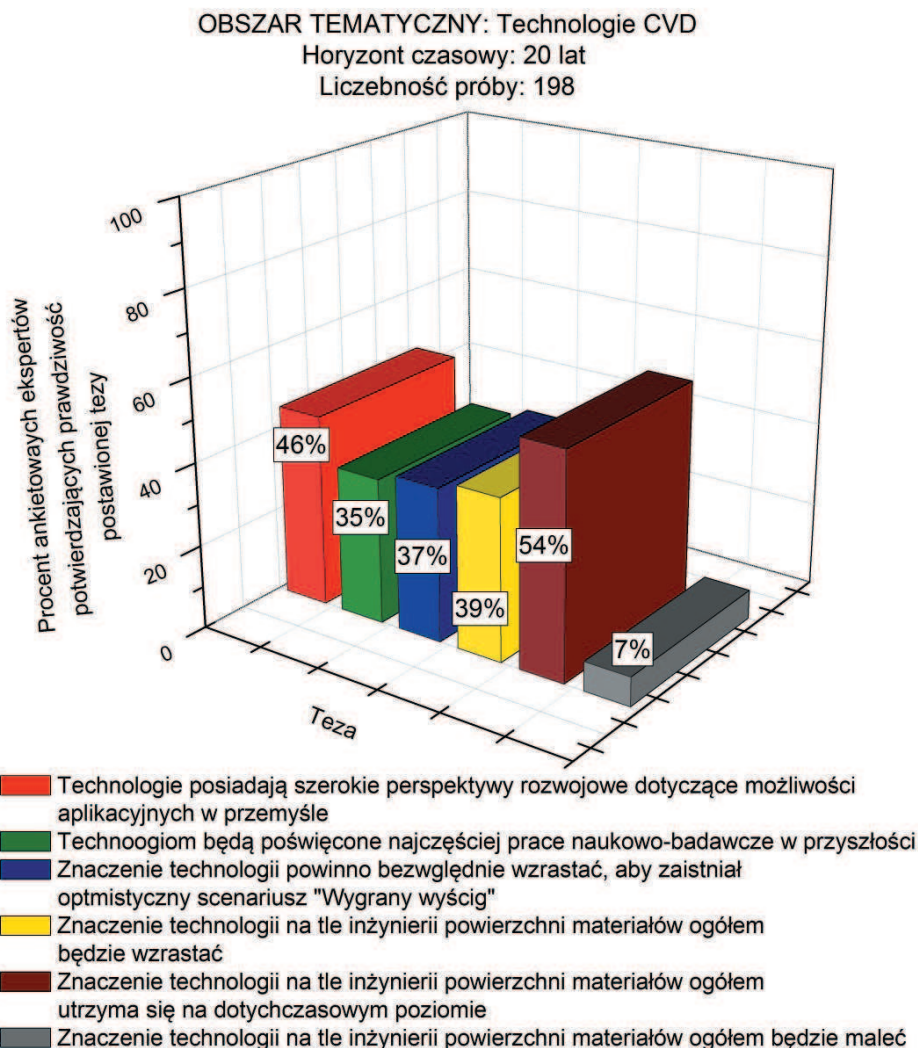
szansę zaistnieć optymistyczny scenariusz przyszłych wydarzeń dotyczących rozwoju inżynierii powierzchni materiałów. Najliczniejsza grupa ekspertów (54%) twierdzi, że znaczenie technologii CVD na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem w ciągu najbliższego dwudziestolecia utrzyma się na dotychczasowym poziomie, 39% uważa, że będzie spadać, a zaledwie 7% jest zdania, że znaczenie to zmaleje. Z największym prawdopodobieństwem



Rysunek 7.1.1. Pozycja strategiczna technologii PVD na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem

(60%) przysłało znaczenie chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej ze wspomaganie plazmowym (PACVD) na tle wszystkich technologii CVD utrzyma się na dotychczasowym poziomie, zdaniem 30% respondentów znaczenie to zmaleje, a 10% – wzrośnie.

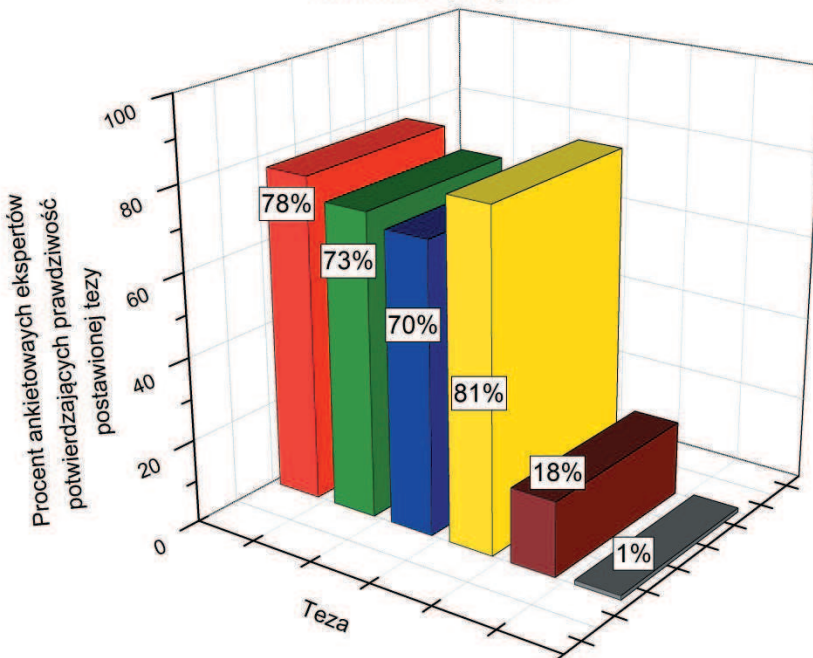
Eksperti ocenili, że technologie laserowej obróbki powierzchniowej mają najlepsze perspektywy aplikacyjne w przemyśle, spośród wszystkich analizowanych grup technologii



Rysunek 7.1.2. *Pozycja strategiczna technologii CVD na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem*

inżynierii powierzchni materiałów w ciągu najbliższych 20 lat. Takie zdanie wyraziło 78% ankietowanych. Prawie 3/4 respondentów (73%) uważa, że technologiom tym będą poświęcane liczne prace naukowo-badawcze w analizowanym horyzoncie czasowym. 70% ankietowanych jest zadania, że obszar tematyczny „Technologie laserowe w inżynierii powierzchni” jest kluczowy i jego znaczenie powinno bezwzględnie wzrastać, aby miał szansę sprawdzić się

OBSZAR TEMATYCZNY: Technologie laserowe w inżynierii powierzchni
Horyzont czasowy: 20 lat
Liczebność próby: 198



- Technologie posiadają szerokie perspektywy rozwojowe dotyczące możliwości aplikacyjnych w przemyśle
- Technoogiom będą poświęcone najczęściej prace naukowo-badawcze w przyszłości
- Znaczenie technologii powinno bezwzględnie wzrastać, aby zaistniał optymistyczny scenariusz "Wygrany wyścig"
- Znaczenie technologii na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem będzie wzrastać
- Znaczenie technologii na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem utrzyma się na dotychczasowym poziomie
- Znaczenie technologii na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem będzie maleć

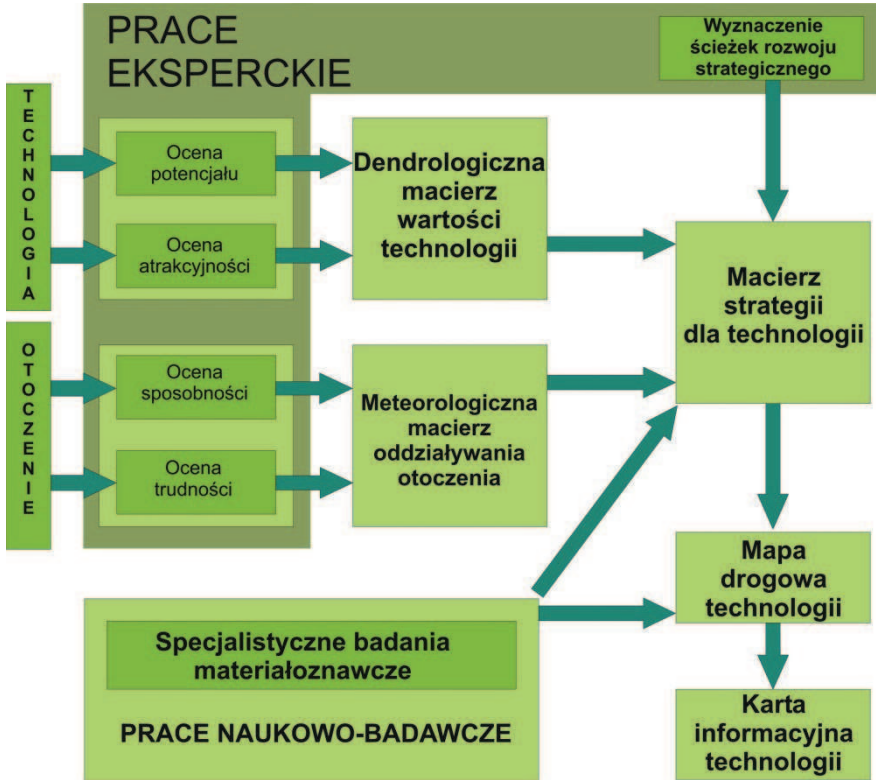
Rysunek 7.1.3. Pozycja strategiczna technologii laserowych na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem [277]

optymistyczny scenariusz „Wygrany wyścig”. Zdaniem 81% ankietowanych znaczenie technologii laserowych w odniesieniu do pozostałych technologii inżynierii powierzchni materiałów będzie wzrastać, 18% uważa, że utrzyma się na dotychczasowym poziomie, a zaledwie 3 osoby stwierdziły, że znaczenie to zmaleje w perspektywie najbliższych 20 lat. Bardzo dobre wyniki foresightu technologicznego opracowane w oparciu o dane źródłowe wskazują zatem na przewidywaną kluczową rolę technologii laserowych w rozwoju inżynierii powierzchni materiałów ogółem (skala mezo) i rozwoju całej gospodarki krajowej/europejskiej/światowej (skala makro) [275, 276]. Opisane wyniki badań foresightowych prezentującą pozycję technologii laserowych na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem przedstawiono na rysunku 7.1.3. Spośród ankietowanych ekspertów 54% wyraziło zdanie, że przyszłe znaczenie późnodojrzałej technologii stopowania/wtapienia laserowego proszków węglików/tlenków w powierzchnię podłoża będzie wzrastać, 36% uważa, że utrzyma się na dotychczasowym poziomie, a 9% – że zmaleje.

7.2. Prognoza rozwoju laserowej obróbki powierzchniowej stopów Mg-Al-Zn

W oparciu o interdyscyplinarne badania obejmujące eksperymenty materiałoznawcze i badania heurystyczne, bazujące na opiniach ekspertów pozyskanych w procesie elektronicznej ankietyzacji, określono z użyciem autorskiej metodologii, przedstawionej schematycznie na rys. 7.2.1, długoterminowe perspektywy rozwojowe odlewniczych stopów magnezu, na które naniesiono powłoki metodami fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej oraz poddanych obróbce laserowej.

Badania materiałoznawcze [17, 278] wykonano na odlanych próbkach stopów magnezu MCMgAl12Zn1, MCMgAl9Zn, MCMgAl6Zn1, MCMgAl3Zn, poddanych następnie obróbce cieplnej, o składzie chemicznym podanym w tablicy 4.2.1. Pięć różnych rodzajów powłok naniesiono metodą katodowego odparowania łukowego (CAD), będącego jedną w wielu możliwych technologii fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD), a diamentopodobne powłoki typu DLC metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej ze wspomaganiami plazmowym (PACVD). Obróbkę laserową odlewniczych stopów magnezu wykonano natomiast z użyciem lasera diodowego dużej mocy (ang.: *High Power Diode Laser* – HDPL) Rofin DL 020 z użyciem pięciu rodzajów proszków ceramicznych, których wybrane własności przedstawiono



Rysunek 7.2.1. Schemat interdyscyplinarnych badań foresightowo-materiałoznawczych [272, 279]

w tabeli 6.2.1. Przyjmując jako kryterium podziału procesy fizyczne, w wyniku których ma miejsce zmiana własności warstwy powierzchniowej, typ naniesionych powłok i/lub rodzaj proszku nanoszonego na podłoże, wyodrębniono spośród analizowanych technologii jedenaście homogenicznych grup obejmujących kolejno:

- (A) Fizyczne osadzanie powłok $Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N$ z fazy gazowej metodą katodowego odparowania łukowego (CAD).
- (B) Fizyczne osadzanie powłok $Ti/Ti(C,N)/CrN$ z fazy gazowej metodą katodowego odparowania łukowego (CAD).
- (C) Fizyczne osadzanie powłok $Cr/CrN/CrN$ z fazy gazowej metodą katodowego odparowania łukowego (CAD).
- (D) Fizyczne osadzanie powłok $Cr/CrN/TiN$ z fazy gazowej metodą katodowego odparowania łukowego (CAD).

- (E) Fizyczne osadzanie powłok Ti/(Ti,Si)N/(Ti,Si)N z fazy gazowej metodą katodowego odparowania łukowego (CAD).
- (F) Chemiczne osadzanie powłok Ti/DLC/DLC z fazy gazowej ze wspomaganie plazmowym (PACVD).
- (G) Powierzchniowa obróbka laserowa z użyciem węgla tytanu.
- (H) Powierzchniowa obróbka laserowa z użyciem węgla wolframu.
- (I) Powierzchniowa obróbka laserowa z użyciem węgla wanadu.
- (J) Powierzchniowa obróbka laserowa z użyciem węgla krzemu.
- (K) Powierzchniowa obróbka laserowa z użyciem tlenku aluminium.

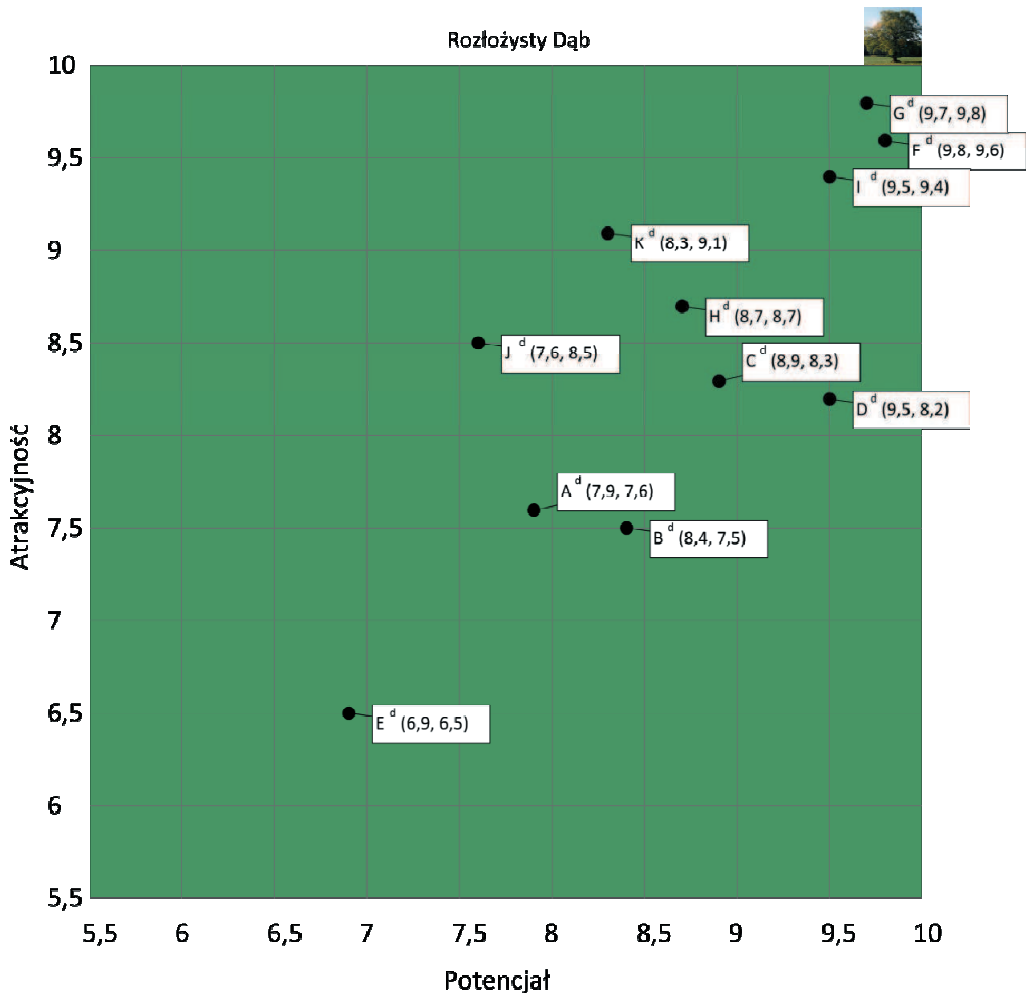
W ramach przeprowadzonych badań wykonano eksperymenty materiałoznawcze obejmujące badania struktury i własności odlewniczych stopów magnezu pokrytych różnego rodzaju powłokami naniesionymi metodą fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej oraz obrobionych powierzchniowo z użyciem lasera diodowego dużej mocy, których wyniki szczegółowo opisano odpowiednio w rozdziałach 5. i 6. niniejszej książki. Wykonane badania obejmowały w szczególności: badania metalograficzne i fraktograficzne z użyciem mikroskopu świetlnego i skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), analizę składu fazowego i struktury krystalograficznej metodą dyfrakcji rentgenowskiej, rentgenowską analizę fazową jakościową i analizę rozkładu powierzchniowego pierwiastków, obserwacje struktury cienkich folii z użyciem transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM), a także badania własności mechanicznych, w tym: twardości metodą Rockwella w skali F, mikrotwardości statyczną metodą Vickersa i przyczepności powłok do podłoża, badania chropowatości oraz badania własności użytkowych, w tym odporności na zużycie ścierne i korozję. Wyniki przeprowadzonych badań materiałoznawczych stanowiących immanentną część wykonanych prac wykazują obiecujące polepszenie własności mechanicznych i użytkowych badanych materiałów, możliwe do osiągnięcia zarówno poprzez nanoszenie twardych powłok na powierzchnię odlewniczych stopów magnezu, jak i poprzez wtapianie w ich powierzchnię, z użyciem lasera diodowego dużej mocy, proszków węglików i tlenku [17].

Posługując się autorską metodologią [274, 282] określono w następnej kolejności długoterminowe perspektywy rozwojowe odlewniczych stopów magnezu pokrytych powłokami PVD i CVD oraz poddanych powierzchniowej obróbce laserowej wraz z zalecanymi strategiami postępowania i prognozowanymi wielowariantowymi ścieżkami rozwoju.

WARTOŚĆ LICZBOWA	WYRÓŻNIKI KLAS	POZIOM	
10	0,95	WYBITNIE WYSOKI	doskonałość
9	0,85	BARDZO WYSOKI	
8	0,75	WYSOKI	
7	0,65	DOŚĆ WYSOKI	normalność
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	

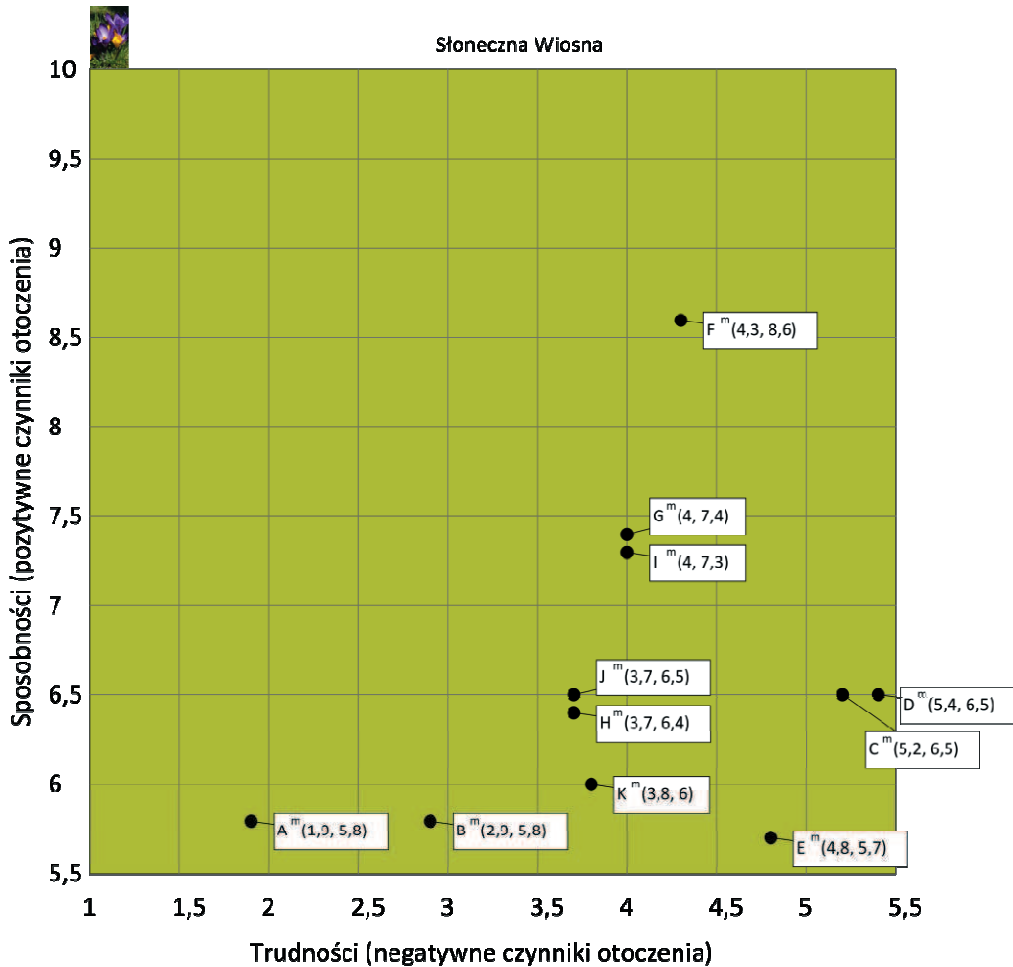
Rysunek 7.2.2. Uniwersalna skala stanów względnych [274]

W prowadzonych badaniach heurystycznych zastosowano **uniwersalną skalę stanów względnych** będącą jednobiegunową skalą dodatnią bez zera, gdzie 1 to ocena minimalna, a 10 wybitnie wysoka (rys. 7.2.2). W pierwszym rzędzie analizowane technologie zostały ocenione przez ekspertów kluczowych pod kątem ich atrakcyjności i potencjału, a otrzymany wynik naniesiono na jedną z ćwiartek **dendrologicznej macierzy wartości technologii**. Najlepiej rokującą ćwiartką gwarantującą przyszły sukces, w której są umieszczane technologie charakteryzujące się zarówno dużym potencjałem, jak i dużą atrakcyjnością, jest rozłożysty dąb. Strzelisty cyprys charakteryzuje technologie o dużej atrakcyjności i ograniczonym potencjale, a ukorzeniona kosodrzewina technologie o dużym potencjale i ograniczonej atrakcyjności, które przy zastosowaniu odpowiedniej strategii mogą zapewnić technologii silną pozycję. Technologie rokujące najslabiej są umieszczane w ćwiartce zwanej drzącą osiką, a ich przyszły sukces jest mało prawdopodobny lub niemożliwy. Przeprowadzona analiza wykazała, że w rozpatrywanym przypadku wszystkie technologie (A)-(K) zostały zakwalifikowane do najbardziej obiecującej ćwiartki zwanej rozłożystym dębem, obejmującej technologie o zarówno dużym potencjale, jak i atrakcyjności, co zaprezentowano graficznie na rysunku 7.2.3. Najlepsze wyniki osiągnęły: technologia laserowej obróbki powierzchniowej z użyciem węgla tytanu G^d (9,7, 9,8) i węgla wanadu F^d (9,5, 9,4) oraz chemiczne osadzanie z fazy gazowej ze wspomaganie plazmowym (PACVD) diamentopodobnych powłok Ti/DLC/DLC F^d (9,8, 9,6). Spośród poddanych analizie jedenastu technologii obróbki powierzchniowej odlewniczych stopów magnezu najniższą wartością E^d (6,9, 6,5) stanowiącą wypadkową potencjału i atrakcyjności technologii cechuje się fizyczne osadzanie z fazy gazowej powłok Ti/(Ti,Si)N/(Ti,Si)N.



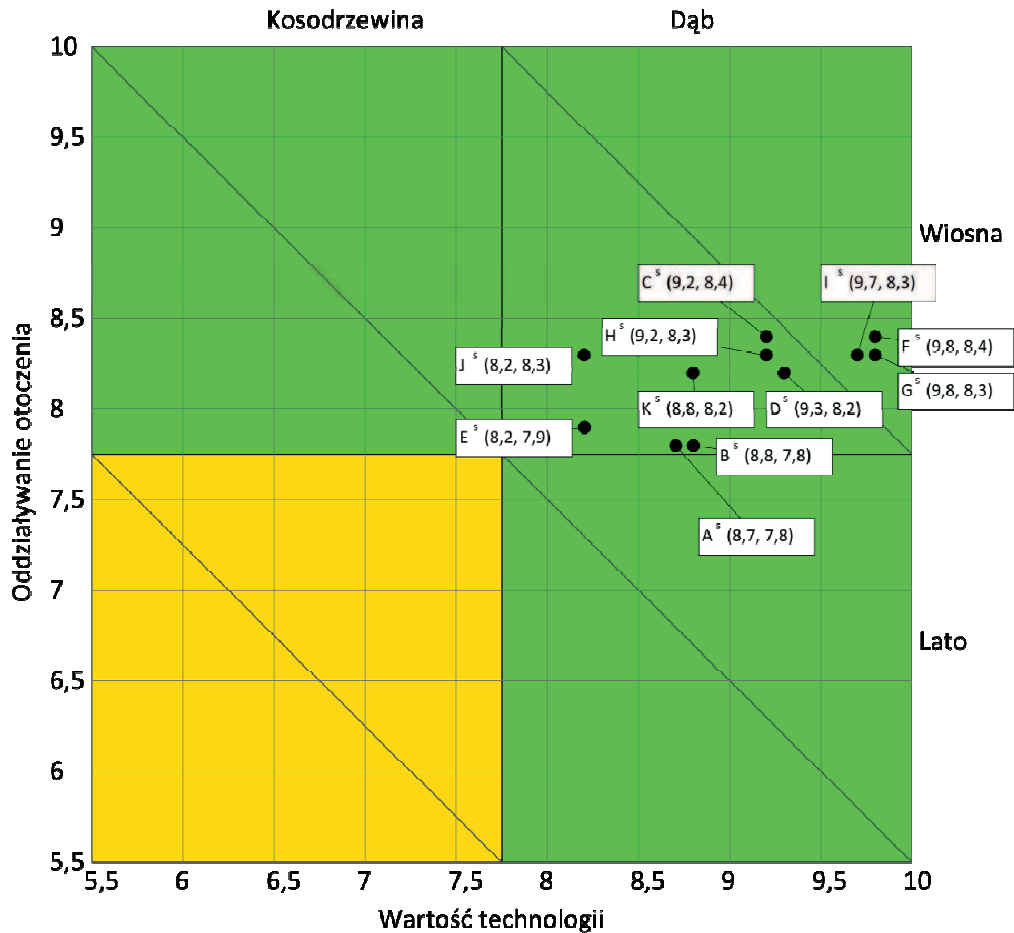
Rysunek 7.2.3. Ćwiartka dendrologicznej macierzy wartości dla technologii określająca potencjał i atrakcyjność odlewniczych stopów magnezu poddanych obróbce powierzchniowej

Ocena oddziaływania zewnętrznych czynników pozytywnych (sposobności) i negatywnych (trudności) na poszczególne technologie została przeprowadzona z wykorzystaniem **meteorologicznej macierzy oddziaływania otoczenia**. Zgodnie z zaproponowaną koncepcją każda z technologii ocenianych przez ekspertów pod kątem ich pozycji na tle makro-, mezo- i mikro-otoczenia jest umieszczana w jednej z ćwiartek tej macierzy. Najkorzystniejszą sytuację zewnętrzną gwarantującą przyszły sukces obrazuje słoneczna wiosna. Deszczowa jesień dająca szansę na spokojny progres odpowiada otoczeniu neutralnemu, a gorące lato otoczeniu



Rysunek 7.2.4. Ćwiartka meteorologicznej macierzy oddziaływania otoczenia określająca trudności i sposobności oddziałujące na odlewnicze stopy magnezu poddane obróbce powierzchniowej

burzliwemu, w którym sukces technologii jest obarczony ryzykiem, ale jest możliwy. Mroźna zima informuje, że rozwój technologii jest trudny bądź niemożliwy do osiągnięcia. Wyniki przeprowadzonych badań dotyczących odlewniczych stopów Mg-Al-Zn poddanych obróbce laserowej zaprezentowane na rysunku 7.2.4 pokazują, że w przypadku wszystkich poddanych badaniom technologii (A)-(K) otoczenie jest niezwykle sprzyjające, niosące dużo sposobności i niewiele trudności. Wszystkie analizowane technologie znalazły się zatem w ćwiartce odpowiadającej słonecznej wiosnie, co jest równoznaczne z dobrymi perspektywami rozwojowymi



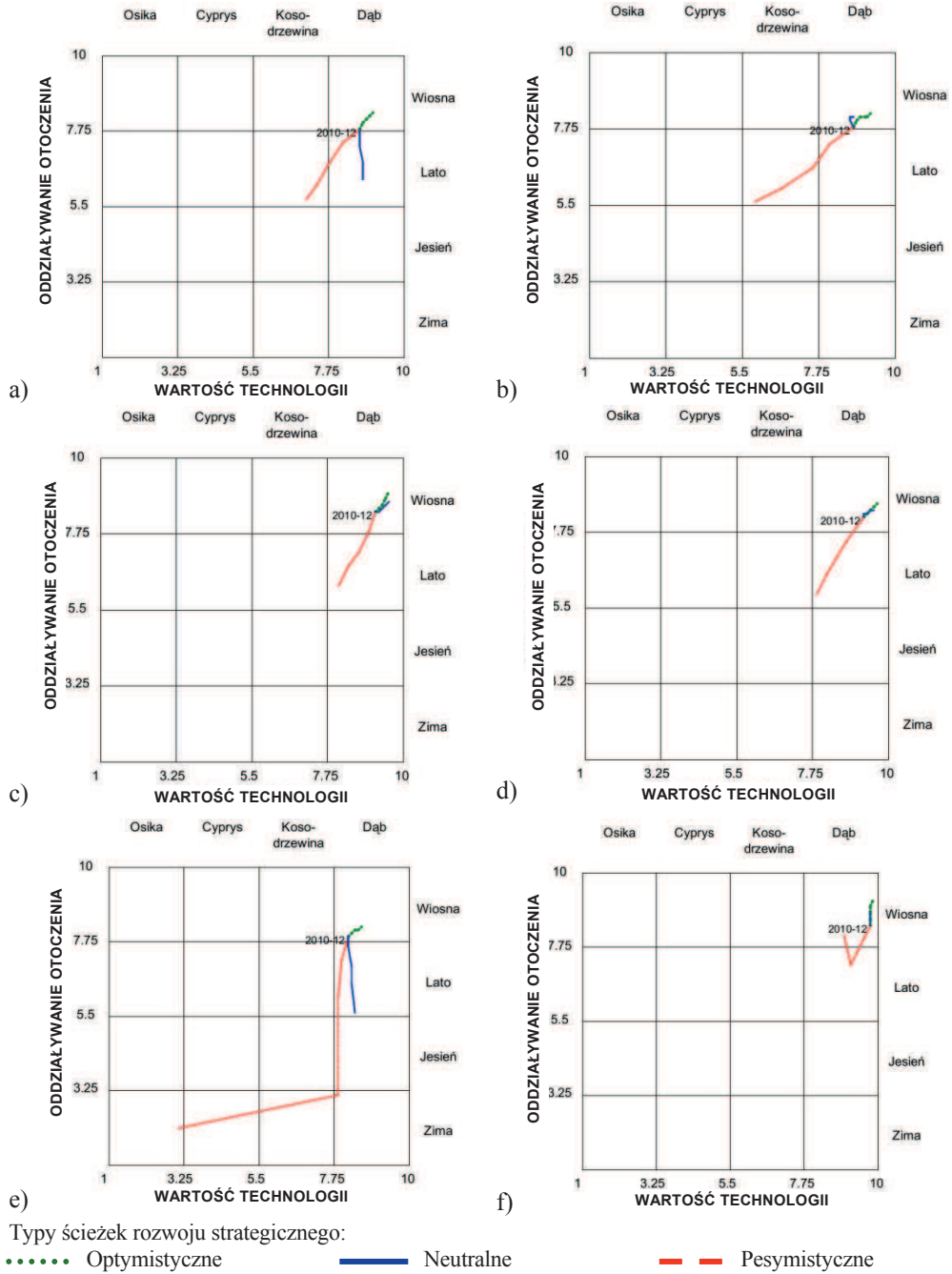
Rysunek 7.2.5. Ćwiartka macierzy strategii dla technologii prezentująca pozycje strategiczne poszczególnych technologii obróbki powierzchniowej odlewniczych stopów magnezu

w ciągu najbliższych 20 lat. Najwięcej sposobności, lecz także stosunkowo dużo trudności, towarzyszy technologii plazmo-chemicznego osadzania z fazy gazowej twardych, odpornych na ścieranie (zwanymi czasem „samosmarującymi”) i biozgodnych diamentopodobnych powłok Ti/DLC/DLC F^m (4,3, 8,6), co jest związane z szerokimi obecnymi i przyszłymi możliwościami aplikacyjnymi w przemyśle narzędziowym, motoryzacyjnym, lotniczym, mikroelektronicznym, medycznym i biomedycznym, czemu jednakże towarzyszy silna konkurencja ze strony laserowej obróbki powierzchniowej, ablacji laserowej, implantacji jonów, natryskiwania cieplnego i technologii hybrydowych.

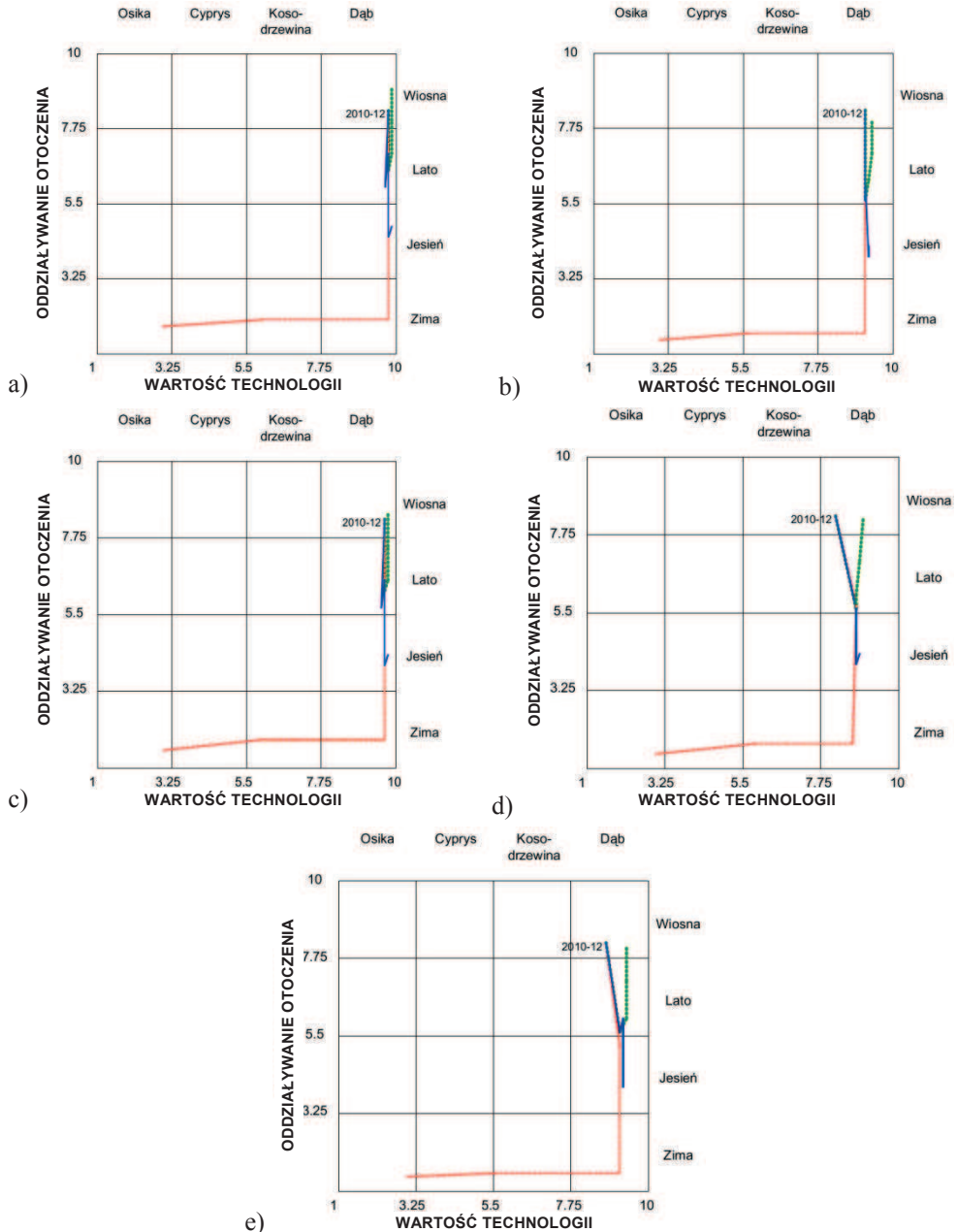
Wyniki badań przedstawione w postaci graficznej za pomocą czteropolowych macierzy dentrologicznej i meteorologicznej na kolejnym etapie prac badawczych zostały naniesione z wykorzystaniem opracowanego na te potrzeby programu komputerowego na szesnastopolową **macierz strategii dla technologii**. Najbardziej korzystna ćwiartka tej macierzy zaprezentowana na rysunku 7.2.5 przedstawia graficznie miejsce poszczególnych technologii obróbki powierzchniowej odlewniczych stopów magnezu z uwzględnieniem ich wartości i siły oddziaływania otoczenia, wskazując odpowiednią strategię postępowania. Najlepsze możliwe perspektywy rozwojowe ocenione jako wybitne (10 punktów) posiada technologia plazmo-chemicznego osadzania z fazy gazowej powłok Ti/DLC/DLC F^s (9,8, 8,4) oraz technologicie laserowego wtapienia proszków węgliku tytanu G^s (9,8, 8,3) i węgliku wanadu F^s (9,7, 8,3) w powierzchnię odlewniczych stopów magnezu, co jest związane z możliwością zapewnienia z użyciem tych technologii obróbki powierzchniowej najlepszej struktury oraz własności mechanicznych i użytkowych badanych stopów. Spośród poddanych badaniom technologii obróbki powierzchniowej odlewniczych stopów magnezu najkorzystniejsze warunki otoczenia odpowiadają nanoszeniu diamentopodobnych powłok w procesie plazmo-chemicznego osadzania z fazy gazowej (F), jak również fizycznego osadzania powłok Cr/CrN/CrN z fazy gazowej metodą katodowego odparowania łukowego (CAD) C^s (9,2, 8,4), na co w głównej mierze wpływa szeroki możliwy zakres zastosowań produktów wytworzonych tymi technologiami, charakteryzujących się unikalnymi własnościami mechanicznymi, trybologicznymi i antykorozyjnymi.

Na podstawie opinii ekspertów określono również **ścieżki rozwoju strategicznego** poszczególnych technologii, stanowiące prognozę ich rozwoju w latach kolejno: 2015, 2020, 2025 i 2030 w trzech wariantach: optymistycznym, pesymistycznym i najbardziej prawdopodobnym. Na rysunku 7.2.6 przedstawiono ścieżki rozwoju strategicznego fizycznego i chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej na powierzchnię odlewniczych stopów magnezu, natomiast na rysunku 7.2.7 zaprezentowano prognozowane ścieżki rozwoju poszczególnych technologii wtapienia cząstek węglików/tlenków w powierzchnię tych materiałów.

Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalno-porównawczych utworzono serię map drogowych analizowanych grup technologii, będących narzędziem analizy porównawczej umożliwiającym wybór technologii lub grupy technologii najlepszej pod względem określonego kryterium [280, 281]. Mapy drogowe sporządzone według autorskiej koncepcji [282] mają układ odpowiadający pierwszej ćwiartce kartezjańskiego układu współrzędnych. Na oś odciętych naniesiono interwały czasowe dotyczące kolejno: aktualnej sytuacji (lata 2010-11),



Rysunek 7.2.6. Ścieżki rozwoju strategicznego dotyczące nanoszenia na odlewnicze stopy magnezu metodą fizycznego osadzania z fazy gazowej powłok: a) $Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N$, b) $Ti/Ti(C,N)/CrN$, c) $Cr/CrN/CrN$, d) $Cr/CrN/TiN$, e) $Ti/(Ti,Si)N/(Ti,Si)N$ i f) plazmo-chemicznego osadzania diamentopodobnych powłok $Ti/DLC/DLC$



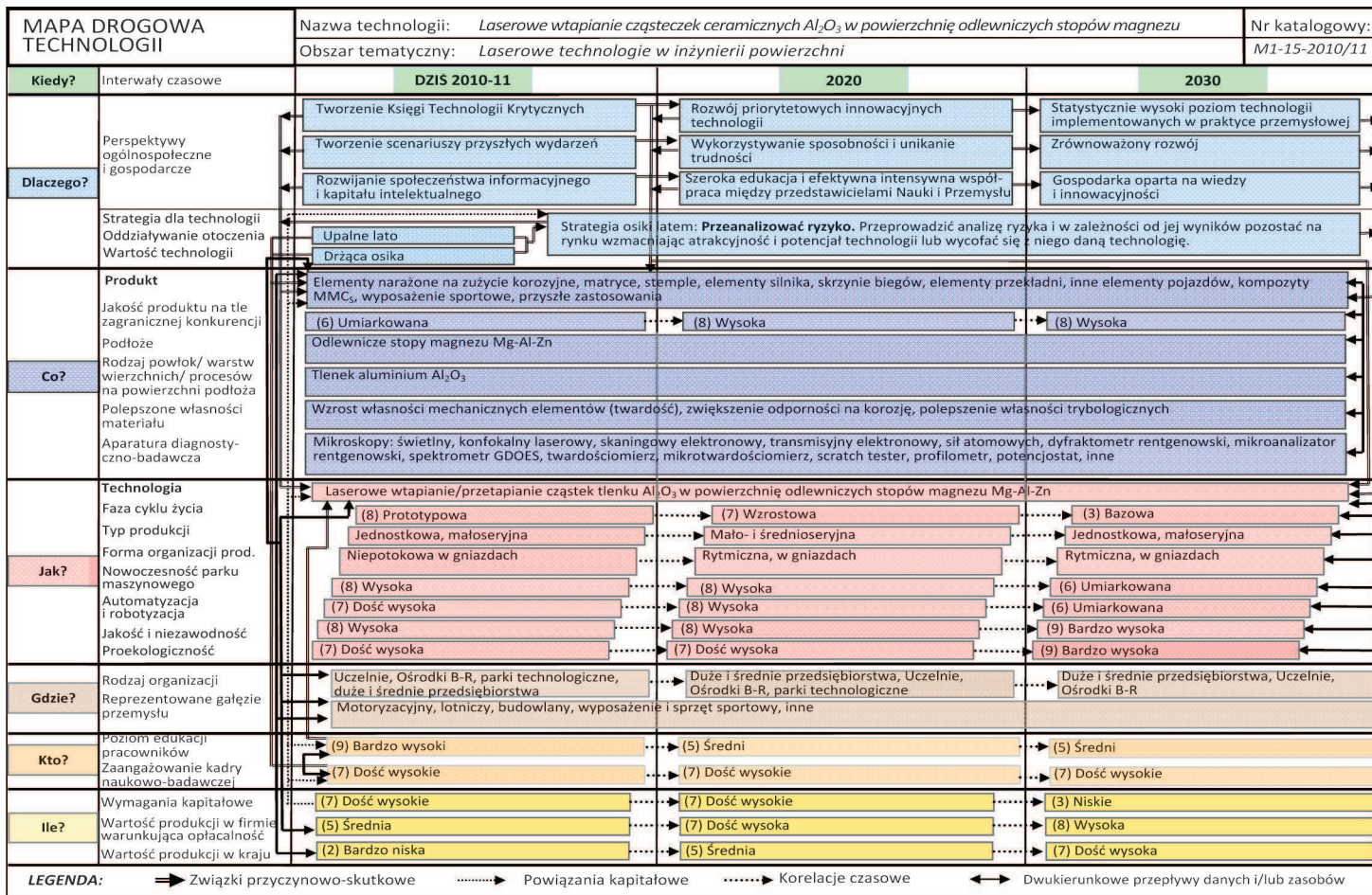
Warianty ścieżek rozwoju strategicznego:

••••• Optymistyczny — Neutralny — Pesymistyczny

Rysunek 7.2.7. Ścieżki rozwoju strategicznego dotyczące powierzchniowej obróbki laserowej odlewniczych stopów magnezu z użyciem proszków węglików: a) TiC, b) WC, c) VC, d) SiC oraz e) tlenku Al_2O_3

sposobów osiągnięcia celów (rok 2020) oraz celów długoterminowych (rok 2030). Na osi rzędnych mapy drogowej technologii znajduje się siedem głównych uporządkowanych hierarchicznie warstw: czasowa, koncepcyjna, produktowa, technologiczna, przestrzenna, kadrowa i ilościowa, które podzielono na szczegółowe podwarstwy. Warstwy górne mapy drogowej technologii są najbardziej ogólne i określają ogólnospołeczne i ekonomiczne przesłanki, przyczyny i powody realizowanych działań. Warstwy środkowe charakteryzują produkt i technologie jego wytwarzania. Warstwy dolne określają szczegóły organizacyjno-techniczne dotyczące miejsca, wykonawcy i kosztów. Pomiedzy poszczególnymi warstwami i podwarstwami zachodzą związki przyczynowo-skutkowe, powiązania kapitałowe, korelacje czasowe i dwukierunkowe przepływy danych i/lub zasobów, co obrazują graficznie różnego rodzaju strzałki. Przykładową mapę drogową technologii sporządzoną dla laserowego wtapiania cząstek tlenków aluminium Al_2O_3 w powierzchnię odlewniczych stopów magnezu Mg-Al-Zn przedstawiono na rysunku 7.2.8. Zestawienie zbiorcze zawierające wybrane dane stanowiące wyciąg ze wszystkich map drogowych opracowanych dla analizowanych odlewniczych stopów magnezu poddanych obróbce laserowej przedstawiono w tablicy 7.2.1. Uszczegółowieniem i uzupełnieniem map drogowych technologii są karty informacyjne technologii, zawierające informacje techniczne stanowiące istotną pomoc podczas wdrażania danej technologii w praktyce przemysłowej, w szczególności w niedysponujących środkami finansowymi na badania własne w tym zakresie mikro-, małych i średnich przedsiębiorstwach.

Analizując otrzymane wyniki badań materiałoznawczo-foresightowych należy stwierdzić, że możliwe jest zastosowanie badanych stopów Mg-Al-Zn oraz technologii ich obróbki powierzchniowej, także alternatywnie warstw wierzchnich zapewniających możliwie najkorzystniejsze własności gradientowe lub „quasi-gradientowe” w praktyce przemysłowej. Szerokie możliwości aplikacyjne występują zwłaszcza w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, gdzie wymagane są: niewielka masa właściwa produktów, zwiększona odporność na ścieranie, podwyższone własności wytrzymałościowe elementów, jak również naprawa elementów już gotowych. Możliwe jest także zastosowanie niektórych z omawianych technologii, zwłaszcza plazmo-chemicznego nanoszenia powłok diamentopodobnych z fazy gazowej, w przemyśle narzędziowym, mikroelektronicznym, medycznym i biomedycznym. Należy zwrócić jednak uwagę, że rozwojowi omawianych technologii towarzyszy silna konkurencja ze strony technologii alternatywnych, w tym przede wszystkim: laserowej obróbki powierzchniowej, ablacji laserowej, implantacji jonów, natryskiwania cieplnego i technologii



Rysunek 7.2.8. Przykładowa mapa drogowa technologii sporządzona dla laserowego wtapiania cząstek tlenku aluminium Al_2O_3 w warstwę wierzchnią odlewniczych stopów magnezu Mg-Al-Zn (opracowanie własne: A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, T. Tański)

Tablica 7.2.1. Wybrane dane stanowiące wyciąg z map drogowych opracowanych dla analizowanych technologii obróbki powierzchniowej odlewniczych stopów magnezu

Symbol technologii	Analizowane czynniki																							
	(1)			(2)			(3)			(4)			(5)			(6)			(7)			(8)		
	Horyzont czasowy																							
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
(A)	7	6	4	9	7	4	7	8	9	9	9	9	8	7	8	7	5	8	6	5	5	6	7	
(B)	7	6	4	9	7	4	7	8	8	9	9	9	8	7	8	7	5	8	6	5	5	6	7	
(C)	7	5	3	10	8	5	8	9	10	9	9	10	10	9	8	9	7	5	8	7	5	5	7	8
(D)	7	5	3	10	8	5	8	9	10	9	9	10	10	9	8	9	7	5	8	7	5	5	6	7
(E)	7	6	5	9	6	4	6	7	7	9	9	9	9	8	7	8	7	5	8	6	5	5	5	4
(F)	7	5	3	10	8	5	8	9	10	9	9	10	10	9	8	10	8	6	9	7	5	5	7	9
(G)	8	7	3	10	8	5	8	9	10	10	9	9	10	8	6	10	8	5	5	7	8	3	5	8
(H)	8	7	5	10	8	5	7	8	8	8	8	8	9	5	5	9	9	4	6	7	8	2	5	7
(I)	8	7	5	10	8	5	8	8	8	9	9	9	9	8	6	9	8	6	5	7	9	2	4	6
(J)	8	7	5	8	8	5	6	8	9	8	9	9	9	5	5	9	7	5	6	7	8	3	6	9
(K)	8	7	3	8	8	6	8	8	9	7	7	9	9	5	5	7	7	7	5	7	8	2	5	7
LEGENDA																								
Symbol technologii Obróbka laserowa odlewniczych stopów magnezu Mg-Al-Zn: (A) węglikiem tytanu (B) węglikiem wolframu WC (C) węglikiem wanadu VC (D) węglikiem krzemu SiC (E) tlenkiem aluminium Al ₂ O ₃												Analizowane czynniki (1) Faza cyklu życia (2) Nowoczesność parku maszynowego (3) Jakość i niezawodność (4) Proekologiczność (5) Poziom edukacji pracowników (6) Wymagania kapitałowe (7) Wartość produkcji w firmie warunkująca opłacalność (8) Wartość produkcji w kraju										Horyzont czasowy a: lata 2010-11 b: rok 2020 c: rok 2030		
<i>Uwaga:</i> Wyniki badań zostały zaprezentowane z wykorzystaniem uniwersalnej skali stanów względnych (1: minimum; 10: maksimum)																								

hybrydowych. Przeprowadzona analiza wykazała, że spośród technologii nanoszenia powłok z fazy gazowej na odlewnicze stopy magnezu niekwestionowanie najlepszą pozycję zajmują diamentopodobne powłoki Ti/DLC/DLC o wysokiej twardości, adhezji, odporności na ścieranie i korozję. Wśród powłok nanoszonych metodami fizycznego osadzania z fazy gazowej nie jest możliwe opracowanie jednej uniwersalnej powłoki, lecz w zależności od przewidywanych warunków eksploatacji zasadne jest nanoszenie powłok o dobrych własnościach mechanicznych i wysokiej odporności na ścieranie typu Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N i Ti/Ti(C,N)/CrN, bądź też niskiej chropowatości i dobrych własnościach antykorozyjnych typu Cr/CrN/CrN i Cr/CrN/TiN [17]. Spośród omawianych technologii powierzchniowej obróbki laserowej najlepsze perspektywy rozwojowe i aplikacyjne wynikające z analizy własności mechanicznych odlewniczych stopów magnezu poddanych obróbce laserowej obejmujących twardość, mikrotwardość i chropowatość posiadają materiały, w które wtopiono cząstki węglików tytanu (technologia *G*) i węglików wanadu (technologia *I*). Narzędziem analitycznym mogącym ułatwić przyszłe wdrożenia analizowanych technologii, zwłaszcza w mikro-, małych i średnich przedsiębiorstwach są mapy drogowe i karty informacyjne technologii, będące kompendium zwartej wiedzy, które sporządzono na ostatnim etapie prac badawczych, wykorzystując w tym celu otrzymane wyniki prac eksperymentalnych i eksperckich.