

## 6. Perspektywy rozwojowe krytycznych technologii inżynierii powierzchni materiałów

Technologie krytyczne inżynierii powierzchni materiałów są to priorytetowe technologie o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w analizowanym horyzoncie czasowym 20 lat. Wszystkie technologie krytyczne sklasyfikowano w ramach dwóch pól badawczych: *M* (ang.: *Manufacturing*) i *P* (ang.: *Product*) i opisano odpowiednio w podrozdziałach 6.1 i 6.2 niniejszej pracy. Pola badawcze odpowiadają alternatywnemu spojrzeniu na zagadnienie: producenta – zainteresowanego sposobem wytwarzania produktów i urządzeniami, w które należy wyposażyć park maszynowy, aby możliwa była realizacja procesów produkcyjnych, reprezentującego podejście procesowe (*M*) i klienta mającego podejście konsumenckie (*P*), zgodnie z którym najistotniejsze jest zapewnienie pożądanych własności użytkowych produktów i materiałów inżynierskich, z których są one wytwarzane. W ramach każdego pola badawczego wyróżniono po 7 obszarów tematycznych, odpowiednio *M1-M7* i *P1-P7*, z których każdy zawiera po 10 grup technologii, co daje łącznie zbiór 140 grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów (tabl. 18). Zbiór ten wygenerowano opierając się na wynikach analizy stanu zagadnienia obejmującej ocenę jego stanu na podstawie przeglądu krajowego i światowego piśmiennictwa, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi (STEEP, SWOT), co ogólnie opisano w rozdziale 3.3 niniejszej pracy, a szczegółowo przedstawiono w publikacji [76]. Wyjaśnienia wymaga fakt, że istnieją przypadki, w których dana grupa technologii pojawia się więcej niż jednokrotnie w zbiorze technologii krytycznych, co nie jest przeoczeniem ani błędem, tylko działaniem celowym. Możliwe jest bowiem, że dana grupa technologii ma istotne znaczenie w kilku obszarach tematycznych równocześnie, natomiast znaczenie to na tle innych technologii różnych obszarów może być zarówno zbliżone lub tożsame, jak również całkiem odmienne.

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

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

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

Podejście procesowe: pole badawcze <i>M</i>		Podejście konsumenckie: pole badawcze <i>P</i>	
<i>C<sub>M4</sub></i>	Azotowanie gazowe	<i>C<sub>P4</sub></i>	Natryskiwanie
<i>D<sub>M4</sub></i>	Kompleksowe obróbki z udziałem azotowania	<i>D<sub>P4</sub></i>	Metalurgia proszków (zmiana składu chemicznego i/lub fazowego w WW)
<i>E<sub>M4</sub></i>	Nawęglanie gazowe i węglazotowanie wysokotemperaturowe	<i>E<sub>P4</sub></i>	Azotowanie i kompleksowe obróbki z udziałem azotowania
<i>F<sub>M4</sub></i>	Nawęglanie plazmowe i pod obniżonym ciśnieniem	<i>F<sub>P4</sub></i>	Stopowanie/wtapienie laserowe
<i>G<sub>M4</sub></i>	Aluminiowanie	<i>G<sub>P4</sub></i>	Napawanie
<i>H<sub>M4</sub></i>	Borowanie	<i>H<sub>P4</sub></i>	Nanoszenie powłok gradientowych
<i>I<sub>M4</sub></i>	Pasywowanie	<i>I<sub>P4</sub></i>	Technologie hybrydowe
<i>J<sub>M4</sub></i>	Technologie hybrydowe	<i>J<sub>P4</sub></i>	Ablacja laserowa (PLD)
Technologie polimerowych warstw wierzchnich <i>M5</i>		Inżynieria powierzchni stali dla przemysłu motoryzacyjnego <i>P5</i>	
<i>A<sub>M5</sub></i>	Tradycyjne techniki malarskie i nanoszenie zanurzeniowo	<i>A<sub>P5</sub></i>	Cynkowanie ogniowe (w czystym Zn i stopach Zn-Al)
<i>B<sub>M5</sub></i>	Natrysk hydrodynamiczny	<i>B<sub>P5</sub></i>	Cynkowanie ogniowe z dodatkowym wyzarzaniem (powłoka Zn-Fe)
<i>C<sub>M5</sub></i>	Malowanie proszkowe	<i>C<sub>P5</sub></i>	Aluminiowanie ogniowe (w czystym Al i stopach Al-Si)
<i>D<sub>M5</sub></i>	Osadzanie elektroforetyczne	<i>D<sub>P5</sub></i>	Technologie galwaniczne
<i>E<sub>M5</sub></i>	Nanoszenie fluidyzacyjno-elektrostatyczne	<i>E<sub>P5</sub></i>	Metalizacja natryskowa
<i>F<sub>M5</sub></i>	Nanoszenie powłok gradientowych	<i>F<sub>P5</sub></i>	Natryskiwanie cieplne
<i>G<sub>M5</sub></i>	Nanoszenie powłok z nanonapełniaczami	<i>G<sub>P5</sub></i>	Nanoszenie powłok podkładowych polimerowych
<i>H<sub>M5</sub></i>	Nanoszenie powłok z pamięcią kształtu	<i>H<sub>P5</sub></i>	Malowanie i lakierowanie ciekłymi materiałami polimerowymi
<i>I<sub>M5</sub></i>	Nanoszenie powłok samowyszktałnych na powierzchni polimerów	<i>I<sub>P5</sub></i>	Nanoszenie powłok polimerowych proszkowych
<i>J<sub>M5</sub></i>	Nanoszenie powłok biokompatybilnych	<i>J<sub>P5</sub></i>	Nakładanie powłok z folii polimerowych
Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich <i>M6</i>		Inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych <i>P6</i>	
<i>A<sub>M6</sub></i>	Reaktywne trawienie jonowe (RIE)	<i>A<sub>P6</sub></i>	Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (CVD)
<i>B<sub>M6</sub></i>	Elektronolitografia (EBL)	<i>B<sub>P6</sub></i>	Fizyczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD)
<i>C<sub>M6</sub></i>	Chemiczne osadzanie nanometrycznych WW z fazy gazowej (CVD)	<i>C<sub>P6</sub></i>	Pyroliza i jej odmiany
<i>D<sub>M6</sub></i>	Fizyczne osadzanie nanometrycznych WW z wykorzystaniem wiązki jonowej (IBAD)	<i>D<sub>P6</sub></i>	Metoda zol-żel
<i>E<sub>M6</sub></i>	Fizyczne osadzanie nanometrycznych WW z odparowaniem wiązki elektronową z jonizacją par (EB-PVD)	<i>E<sub>P6</sub></i>	Wytwarzanie powłok hybrydowych – organiczno-nieorganicznych
<i>F<sub>M6</sub></i>	Osadzanie pojedynczych warstw atomowych (ALD)	<i>F<sub>P6</sub></i>	Odparowanie
<i>G<sub>M6</sub></i>	Elektroosadzanie nanometrycznych WW	<i>G<sub>P6</sub></i>	Metody chemiczne/wyługowanie alkaliów z WW i zagęszczenie pozostałego SiO <sub>2</sub>
<i>H<sub>M6</sub></i>	Metoda zol-żel otrzymywania nanometrycznych WW	<i>H<sub>P6</sub></i>	Reaktywne trawienie jonowe (RIE)
<i>I<sub>M6</sub></i>	Nakładanie na WW powłok zawierających nanomateriały	<i>I<sub>P6</sub></i>	Tekstutowanie mechaniczne z wykorzystaniem ostrza diamentowego
<i>J<sub>M6</sub></i>	Obróbka powierzchniowa nanomateriałów	<i>J<sub>P6</sub></i>	Tekstutowanie laserowe
Inne technologie inżynierii powierzchni <i>M7</i>		Inżynieria powierzchni materiałów polimerowych <i>P7</i>	
<i>A<sub>M7</sub></i>	Pokrywanie powłokami galwanicznymi	<i>A<sub>P7</sub></i>	Metalizacja
<i>B<sub>M7</sub></i>	Pokrywanie powłokami natryskiwanymi cieplnie	<i>B<sub>P7</sub></i>	Elektrokoronowanie
<i>C<sub>M7</sub></i>	Pokrywanie powłokami formowanymi niskociśnieniowo z proszków i spiekanie	<i>C<sub>P7</sub></i>	Obróbka plazmą powierzchni polimerów
<i>D<sub>M7</sub></i>	Pokrywanie powłokami metalizowanymi zanurzeniowo	<i>D<sub>P7</sub></i>	Obróbka laserem powierzchni polimerów
<i>E<sub>M7</sub></i>	Pokrywanie ceramika/cermetami	<i>E<sub>P7</sub></i>	Obróbka powierzchni polimerów z użyciem promieni UV
<i>F<sub>M7</sub></i>	Wytwarzanie powierzchniowych warstw odlewniczych i infiltracyjnych	<i>F<sub>P7</sub></i>	Obróbka powierzchni polimerów z użyciem promieni gamma
<i>G<sub>M7</sub></i>	Napawanie powłok	<i>G<sub>P7</sub></i>	Obróbka powierzchni polimerów z użyciem promieniowania elektronowego
<i>H<sub>M7</sub></i>	Nagniatanie, kulkowanie	<i>H<sub>P7</sub></i>	Utworzenie na powierzchni polimerów powłok gradientowych
<i>I<sub>M7</sub></i>	Platerowanie	<i>I<sub>P7</sub></i>	Utworzenie na powierzchni polimerów powłok samowyszktałnych
<i>J<sub>M7</sub></i>	Utwardzanie detonacyjne	<i>J<sub>P7</sub></i>	Polimeryzacja <i>in situ</i>

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

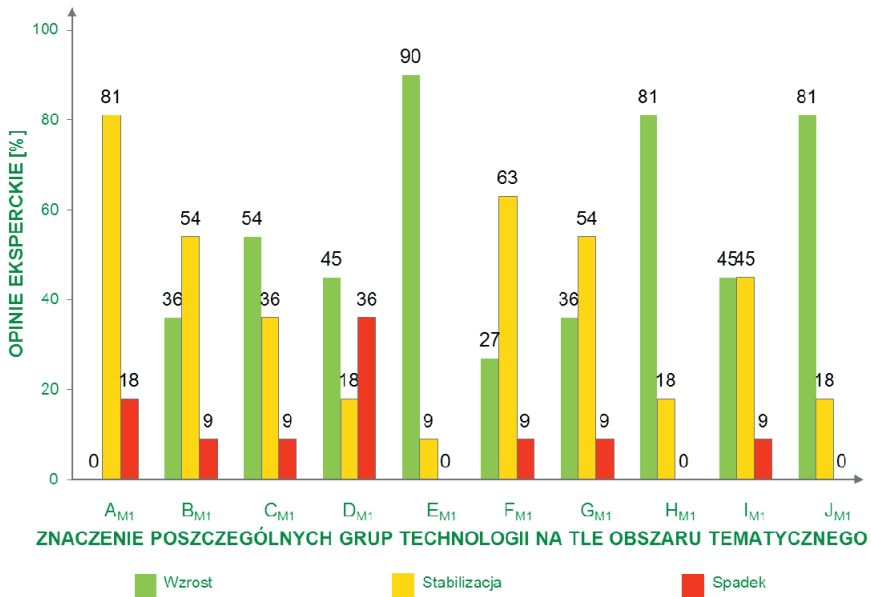
Interpretując wyniki badań heurystycznych, w głównej mierze bazowano na zbiorczych macierzach kontekstowych (plansze 4-6), a zwłaszcza zbiorczej macierzy strategii dla technologii (plansza 6), wspierając się również zestawionymi w postaci wykresów (rys. 106-119) wynikami uzupełniających badań statystycznych,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

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



### M1 Technologie laserowe w inżynierii powierzchni

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



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

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

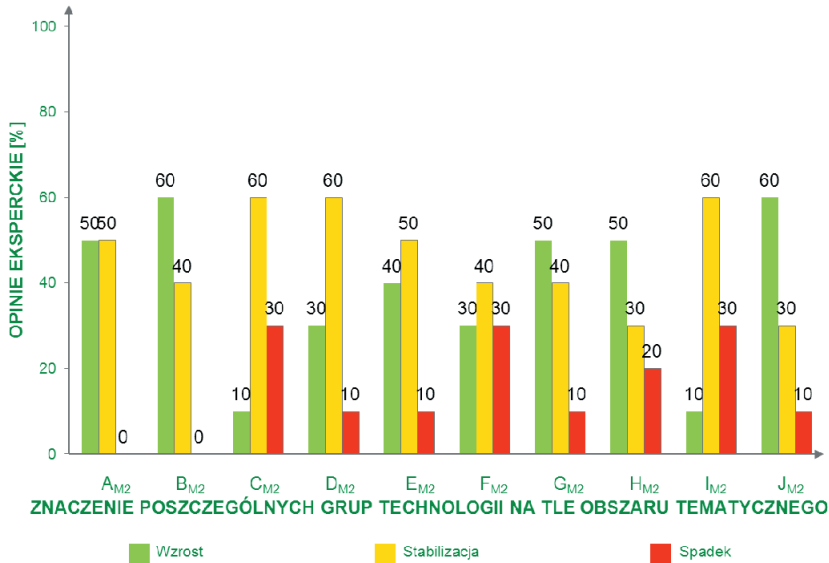
Analiza przyszłych trendów rozwojowych poszczególnych grup laserowej obróbki powierzchniowej (rys. 106) wskazuje, że do technologii, których znaczenie będzie wzrastać w ramach badanego obszaru tematycznego, należą: laserowe wytwarzanie przyrostowe  $E_{M1}$  (90%), obróbka laserowa materiałów funkcjonalnych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



## M2 Technologie PVD

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





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

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

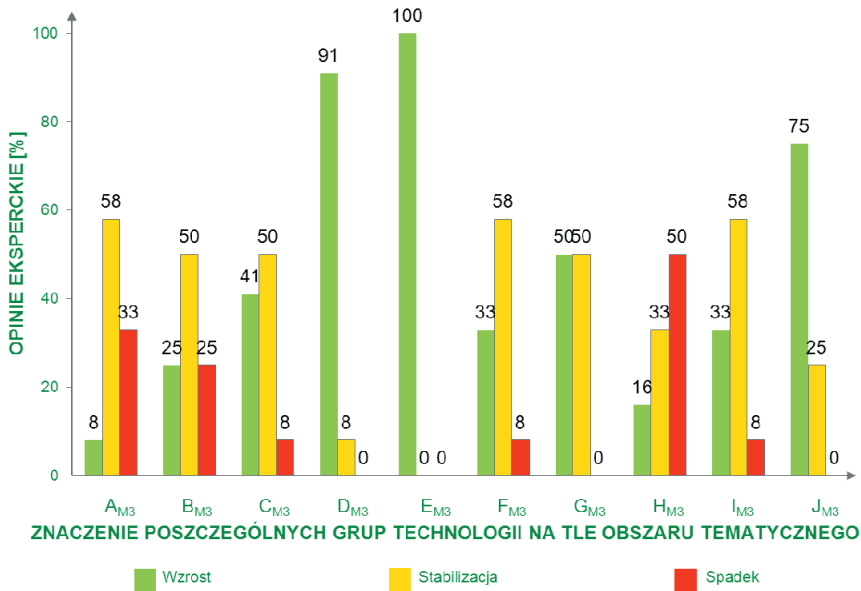


tej grupy technologii, wymagający zatrudnienia wysoko wykwalifikowanej kadry, ponadto większą energię jonów i atomów oraz większy stopień jonizacji plazmy można uzyskać stosując inne metody, np. katodowe odparowanie łukowe (CAD).



### M3 Technologie CVD

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



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

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

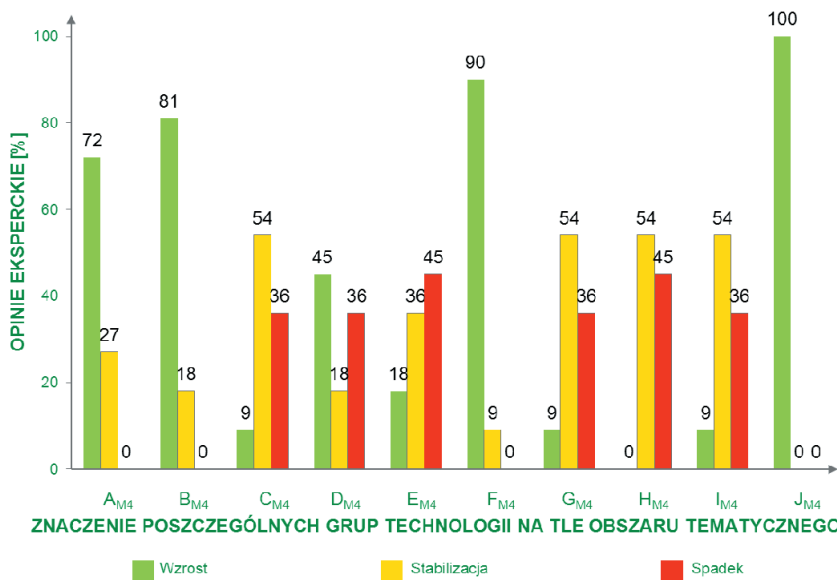
Przeprowadzona, na podstawie zestawienia statystycznego (rys. 108), analiza przyszłych ścieżek rozwoju strategicznego technologii polegających na chemicznym osadzaniu powłok z fazy gazowej wskazuje jednoznaczne tendencje wzrostowe charakteryzujące chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej aktywowane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

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



#### M4 Technologie ciepłno-chemiczne

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

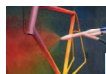


**Rysunek 109.** Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M4: Technologie ciepło-chemiczne

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

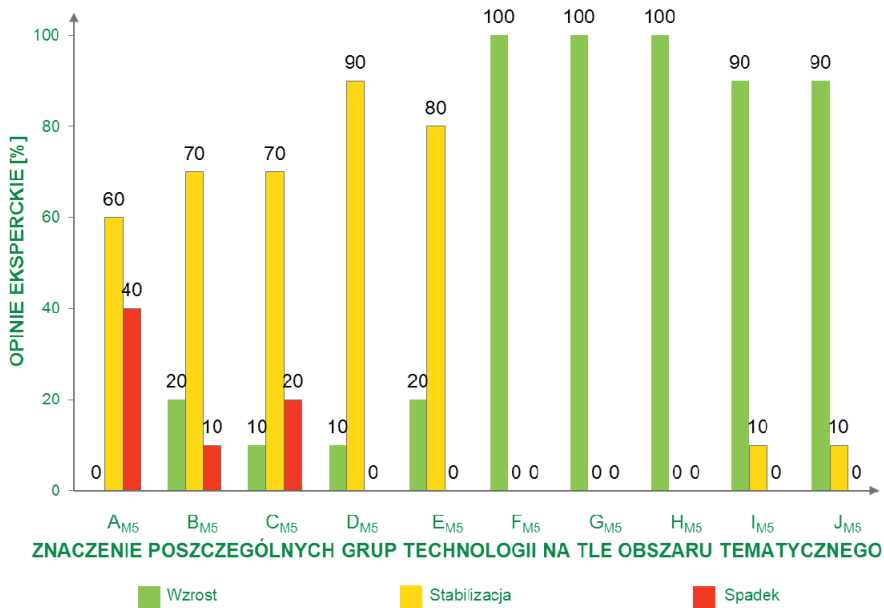
Na podstawie zestawień statystycznych (rys. 109), opracowanych na bazie odpowiedzi ankietowanych ekspertów, określono trendy, którym będą podlegać w przyszłości poszczególne grupy technologii ciepło-chemicznych. Wyraźną tendencję wzrostową można zaobserwować w odniesieniu do technologii hybrydowych 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

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



## M5 Technologie polimerowych warstw wierzchnich

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



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

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

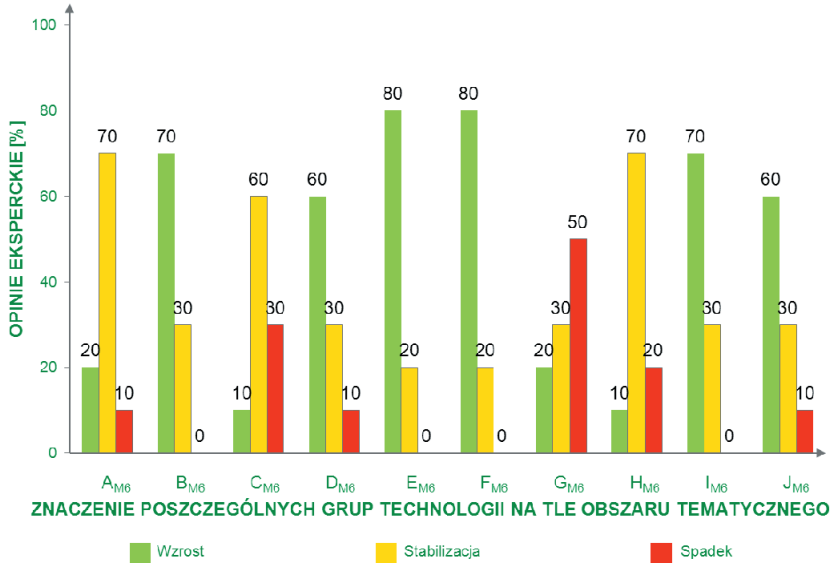
Zestawienia statystyczne (rys. 110), sporządzone na podstawie wyników badań eksperckich, posłużyły do określenia ścieżek rozwoju strategicznego technologii polimerowych warstw wierzchnich. Tendencję wzrostową wykazują technologie nanoszenia następujących powłok: gradientowych  $F_{M5}$  (100%), z nanonapełniaczami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



## M6 Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich

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





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

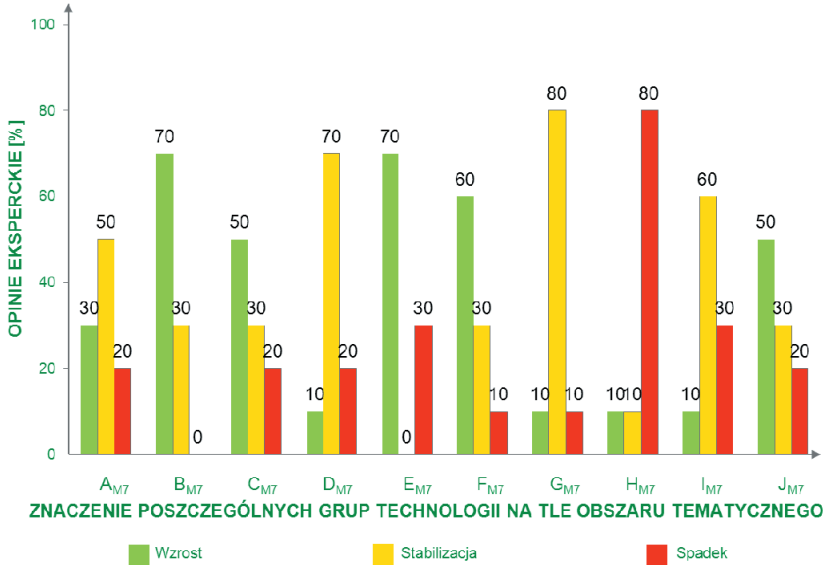
poddanych analizie technologii nanostrukturalnych warstw wierzchnich, zajęło ich elektroosadzanie  $G_{M6}^s$  (6,4, 2,6) o średnich perspektywach rozwojowych (5 punktów). Przedsiębiorstwom stosującym tę najmniej obiecującą późnodojrzałą grupę technologii przyjdzie zatem w przyszłości opierać się licznym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

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



## M7 Inne technologie inżynierii powierzchni

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



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

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

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

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

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

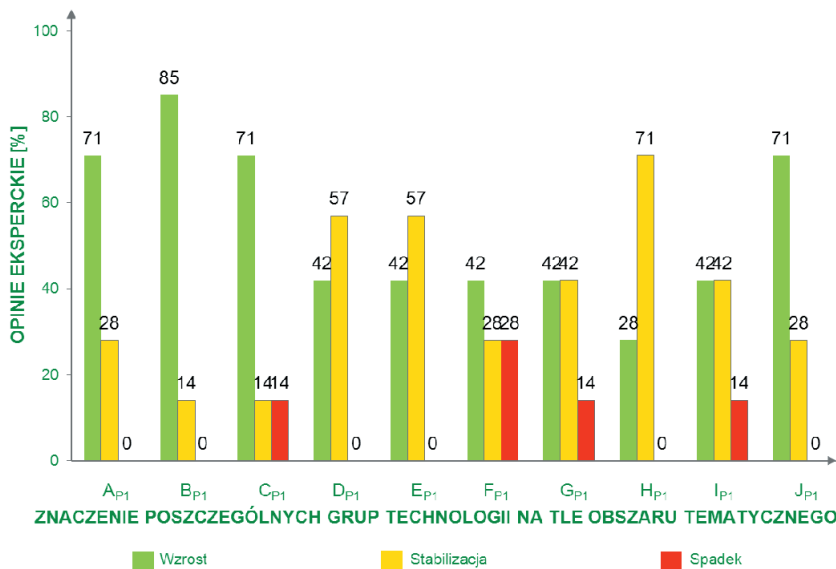
### Inżynieria powierzchni biomateriałów P1



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

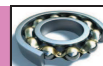
zachodzić w procesach punktowego naświetlania laserem, nastrzykiwania powierzchniowo lub bombardowania wiązką jonów – rekomendowane jest natomiast zastosowanie strategii cyprysa wiosną, polegającej na wykorzystywaniu sposobności płynących z otoczenia, przy równoczesnym wzmacnianiu potencjału technologii.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

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



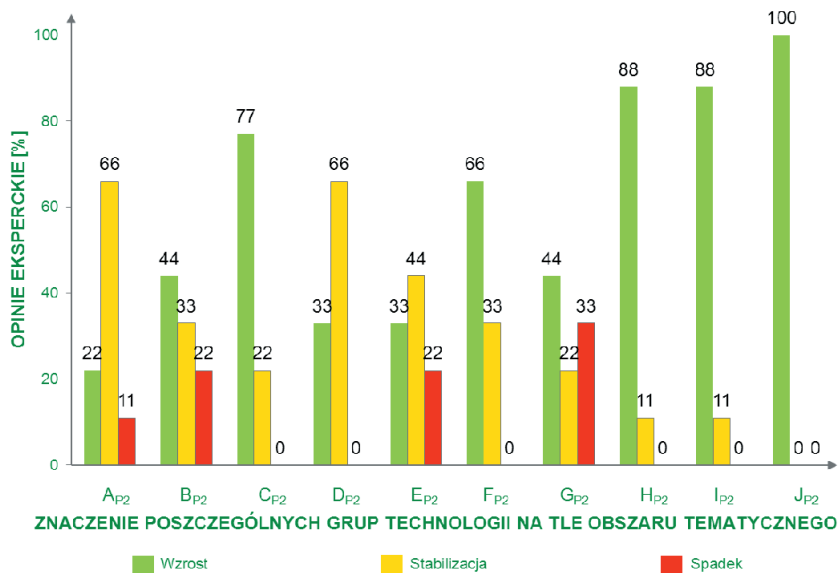
**Rysunek 113.** Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P1: Inżynieria powierzchni biomateriałów

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



Analiza wyników badań heurystycznych, przeprowadzonych drogą elektronicznej ankietyzacji ekspertów, wykazała, że spośród poddanych badaniom technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych najlepszą pozycję strategiczną, ocenioną maksymalnie – na 10 punktów, mają metody fizycznego i chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej (PVD/CVD)  $J_{P_2}^s$  (9,3, 9,5), w odniesieniu do których zalecane jest zastosowanie strategii dębu wiosną, polegającej na dążeniu do zagwarantowanego sukcesu, poprzez rozwijanie i umacnianie bardzo dobrze rokujących technologii znajdujących się w przyjaznym otoczeniu. Bardzo wysoką pozycję strategiczną (9 punktów) mają technologie cieplne i cieplno-chemiczne  $C_{P_2}^s$  (7,3, 8,7), które są szeroko stosowane w różnych odmianach i wariantach do obróbki powierzchniowej materiałów metalowych. Grupa technologii  $C_{P_2}$  wymaga zastosowania strategii kosodrzewiny wiosną, zalecającej uatrakcyjnianie i unowocześnianie późnodojrzałych technologii, komputeryzację i automatyzację parku maszynowego, a także prowadzenie działań promocyjnych umacniających ich pozycję konkurencyjną na rynku, na którym przeważają sposobności. Podobnie bardzo wysoko (9 punktów) oceniono pozycje strategiczne: implantacji jonów  $H_{P_2}^s$  (4,6, 9,2), znajdującej się w prototypowej fazie życia, i wzrostowej technologii pokrywania ceramiką i cermetalami  $I_{P_2}^s$  (3,9, 9,2). W odniesieniu do tych grup technologii, jak również do ocenionej wysoko (8 punktów) wczesnodojrzałej technologii natapiania/stopowania laserowego  $F_{P_2}^s$  (4,7, 8,3), zalecane jest zastosowanie strategii cyprysa wiosną, zgodnie z którą należy wykorzystywać sposobności płynące z otoczenia, przy równoczesnym uatrakcyjnianiu i wzmacnianiu potencjału technologii, czemu mają służyć prace badawczo-rozwojowe. Dość wysoką (7 punktów) pozycję strategiczną ma, znajdujące się w późnodojrzałej fazie cyklu życia, natryskiwanie cieplne  $D_{P_2}^s$  (6,5, 4,7), które umieszczono w polu kosodrzewiny jesienią, podobnie jak ocenione na 6 punktów technologie bazowe: malowanie  $A_{P_2}^s$  (6,9, 4,1) i technologie galwaniczne  $B_{P_2}^s$  (6,6, 4,2). Zalecana dla grup technologii  $D_{P_2}$ ,  $A_{P_2}$  i  $B_{P_2}$  strategia zakłada, że planowe działania, w długiej perspektywie czasowej, powinny dotyczyć nie tylko czerpania bieżących korzyści płynących ze stosowania na szeroką skalę sprawdzonych, efektywnych technologii, lecz także szukania sposobów wydłużenia okresu *zbierania żniw*, czemu mają służyć modernizacja, automatyzacja i promocja. Najslabsze pozycje strategiczne, spośród badanych technologii krytycznych





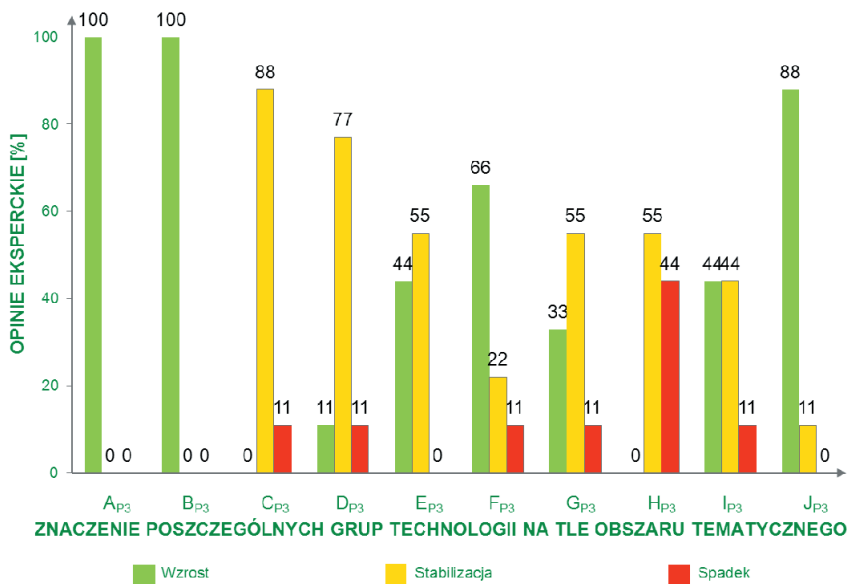
**Rysunek 114.** Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P2: Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych

inżynierii powierzchni materiałów metalowych, zajmują natapianie/stopowanie elektronowe  $G_{P2}^s$  (4,0, 6,2) i utwardzanie detonacyjne  $E_{P2}^s$  (3,8, 6,9).

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



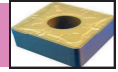
W ramach analizy heurystycznej, przeprowadzonej z użyciem nowo opracowanej metodologii, sporządzono macierze kontekstowe wizualizujące pozycje strategiczne poszczególnych grup technologii krytycznych, które zakwalifikowano do badań w ramach rozpatrywanego obszaru tematycznego: Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych. Najwyższą możliwą ocenę (10 punktów) otrzymały metody chemicznego  $B_{P_3}^s$  (9,2, 9,3) i fizycznego  $A_{P_3}^s$  (9,1, 9,1) nanoszenia powłok z fazy gazowej, w odniesieniu do których zasadne jest zastosowanie strategii dębu wiosną, prowadzące do sukcesu rynkowego w sprzyjających warunkach otoczenia. Prototypowa grupa technologii polegająca na osadzaniu laserem impulsowym lub przez promieniowanie laserowo-plazmowych źródeł EUV  $J_{P_3}^s$  (4,9, 9,1) została oceniona bardzo wysoko (9 punktów), a zalecana dla niej strategia cyprysa wiosną zakłada wykorzystanie sprzyjających warunków otoczenia i kontynuację badań nad tymi technologiami. Na uwagę zasługują zwłaszcza nowatorskie – w skali światowej – badania mikro- i nanoobróbki polimerów organicznych promieniowaniem EUV wytwarzanym z zastosowaniem źródeł laserowo-plazmowych. Do technologii o wysokiej pozycji strategicznej (8 punktów) należą metoda zol-żel  $F_{P_3}^s$  (6,7, 8,6) i implantacja jonów  $E_{P_3}^s$  (6,5, 8,0), które umieszczono w szesnastce macierzy strategii dla technologii odpowiadającej kosodrzewinie wiosną, co oznacza, że należy umacniać ich atrakcyjność przy równoczesnym wykorzystaniu licznych sposobności płynących z otoczenia, jak również wytwarzanie powłok w procesach galwanicznych  $C_{P_3}^s$  (8,6, 5,1), w odniesieniu do których zaleca się zastosowanie strategii dębu jesienią, polegającej na czerpaniu bieżących korzyści przy równoczesnym poszukiwaniu nowych zakresów zastosowań technologii w neutralnych warunkach otoczenia. W polu dębu jesienią znalazła się również oceniona dość wysoko (7 punktów) metalizacja próżniowa  $D_{P_3}^s$  (8,5, 4,7). Realizacja procesów obróbki powierzchniowej z użyciem dojrzałych technologii osadzania elektroforetycznego  $I_{P_3}^s$  (6,4, 4,2) i natryskiwania cieplnego  $G_{P_3}^s$  (6,9, 4,0), mających umiarkowane perspektywy rozwojowe, wymaga zastosowania strategii kosodrzewiny jesienią, zgodnie z którą plany strategiczne, dotyczące technologii aktualnie przynoszących duże zyski, powinny obejmować koncepcję unowocześniania i promowania technologii, w celu maksymalnego wydłużenia okresu *zbierania żniw*. Spośród technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych najsłabszą pozycję



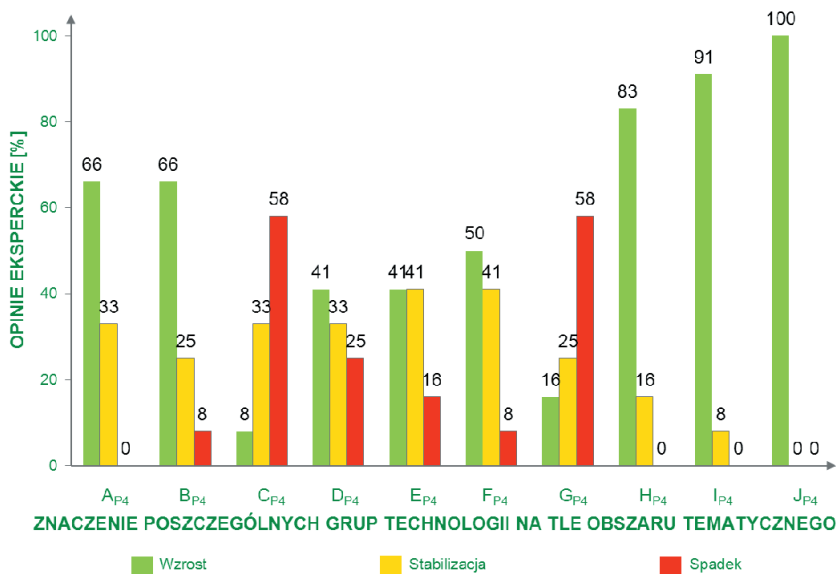
**Rysunek 115.** Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P3: Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych

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

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



Analiza wykonana na podstawie wyników badań heurystycznych, przedstawionych graficznie z użyciem macierzy kontekstowych, umożliwiła określenie pozycji strategicznej technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych. Najwyższą możliwą ocenę (10 punktów) przyznano metodzie fizycznego nanoszenia powłok z fazy gazowej (PVD)  $A_{P_4}^s$  (9,5, 8,4), która znalazła się w najbardziej obiecującym polu macierzy strategii dla technologii – dębu wiosną, podobnie jak chemiczne nanoszenie powłok z fazy gazowej (CVD)  $B_{P_4}^s$  (9,1, 8,1) ocenione na 9 punktów, w związku z czym w odniesieniu do obu tych grup technologii zaleca się szerokie aplikacje w praktyce przemysłowej z wykorzystaniem sposobności płynących z otoczenia. Bardzo wysoko (9 punktów) oceniono również pozycje strategiczne niezwykle obiecujących prototypowych metod obróbki, tj. ablacji laserowej (PLD)  $J_{P_4}^s$  (4,4, 9,0), technologii hybrydowych  $I_{P_4}^s$  (4,8, 9,0) i technologii nanoszenia powłok gradientowych  $H_{P_4}^s$  (4,7, 8,7), których dalszy rozwój wymaga kontynuacji prac badawczo-rozwojowych i wykorzystania sposobności płynących z otoczenia, czyli zastosowania strategii cyprysa wiosną. Dość wysoko (7 punktów) oceniono, znajdujące się w dojrzałej fazie cyklu życia, azotowanie i kompleksowe obróbki z jego udziałem  $E_{P_4}^s$  (6,8, 4,3), dla których zaleca się postępowanie zgodne ze strategią kosodrzewiny jesienią, polegające na *zbieraniu żniw* i podjęciu działań unowocześniających i promocyjnych w celu maksymalnego wydłużenia czasu *prosperity*. Podobnie 7 punktów przyznano stopowaniu/wtapieniu laserowemu  $F_{P_4}^s$  (4,2, 4,7), które umiejscowiono w polu cyprysa jesienią, co oznacza, że zalecane jest umacnianie potencjału tej prototypowej, obiecującej technologii, czemu sprzyja neutralne otoczenie. Perspektywy rozwojowe metod metalurgii proszków, zapewniające zmianę składu chemicznego i/lub fazowego w warstwie wierzchniej  $D_{P_4}^s$  (3,8, 6,4), ze względu na trudności płynące z otoczenia w postaci szerokich alternatywnych poszukiwań efektywnych metod wytwarzania materiałów gradientowych, a także z uwagi na konieczność dopracowania tej obiecującej grupy technologii, oceniono jako średnie (5 punktów) i naniesiono na odpowiadające opisanej sytuacji pole macierzy – cyprysa latem. Średnia (5 punktów) jest również pozycja strategiczna dojrzałej technologii natryskiwania  $C_{P_4}^s$  (6,9, 2,2), która, znajdując się w polu kosodrzewiny zimą, będzie zmagać się z licznymi trudnościami płynącymi z otoczenia, związanymi z silną konkurencją ze strony



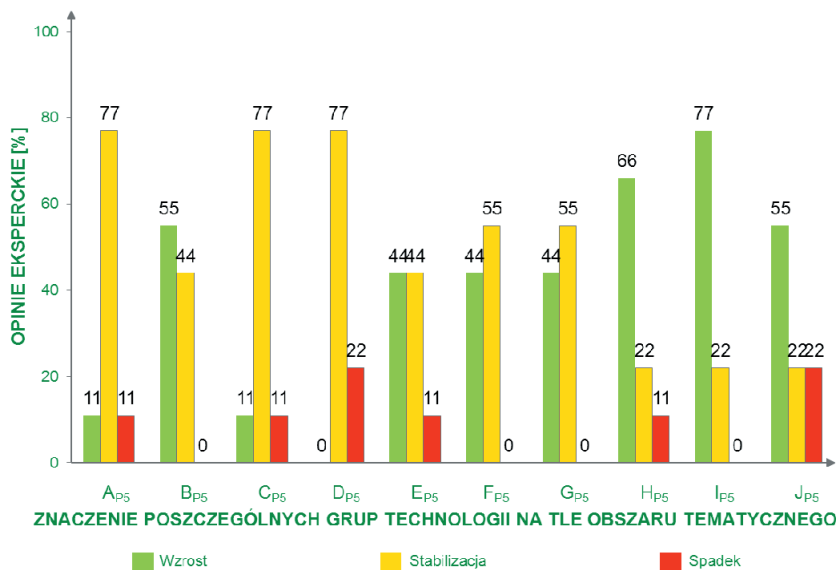
**Rysunek 116.** Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P4: Inżynieria powierzchni materiałów narzędziowych

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

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



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



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

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

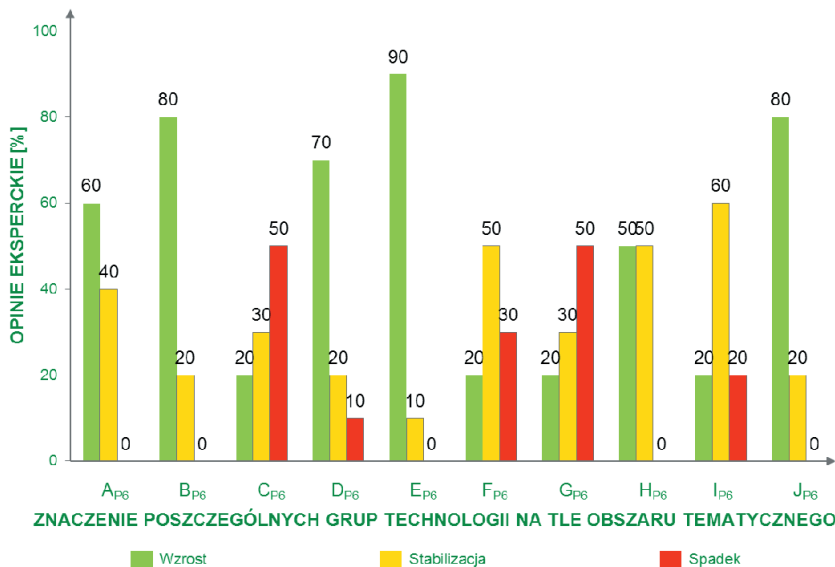


Analiza heurystyczna z wykorzystaniem autorskiej metodologii komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju pozwoliła określić pozycje strategiczne poszczególnych grup technologii, które jako technologie krytyczne zostały przeanalizowane w ramach obszaru



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

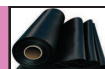
Na podstawie zestawień statystycznych (rys. 118), bazujących na wynikach pozyskanych drogą elektronicznej ankietyzacji ekspertów, określono ścieżki rozwoju strategicznego grup



**Rysunek 118.** Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P<sub>6</sub>: Inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych

technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów funkcjonalnych. Bardzo duża atrakcyjność całego obszaru tematycznego wpływa na fakt, że prognozowany jest wzrost znaczenia większości należących do niego grup technologii. Spodziewany jest spadek przyszłego znaczenia najbardziej konwencjonalnych grup technologii: pyrolizy wraz z jej odmianami C<sub>P6</sub> (50%) oraz trawienia chemicznego i wylugowania alkaliów z warstw powierzchniowych i zagęszczenia pozostałego SiO<sub>2</sub> G<sub>P6</sub> (50%), które będą systematycznie wypierane przez bardziej nowoczesne rozwiązania technologiczne. Trend ustabilizowany jest natomiast prognozowany w odniesieniu do teksturowania mechanicznego z wykorzystaniem ostrza diamentowego I<sub>M6</sub> (60%), metody odparowania F<sub>M6</sub> (50%) i być może reaktywnego trawienia jonowego (RIE) H<sub>P6</sub> (wzrost: 50%; stabilizacja: 50%).

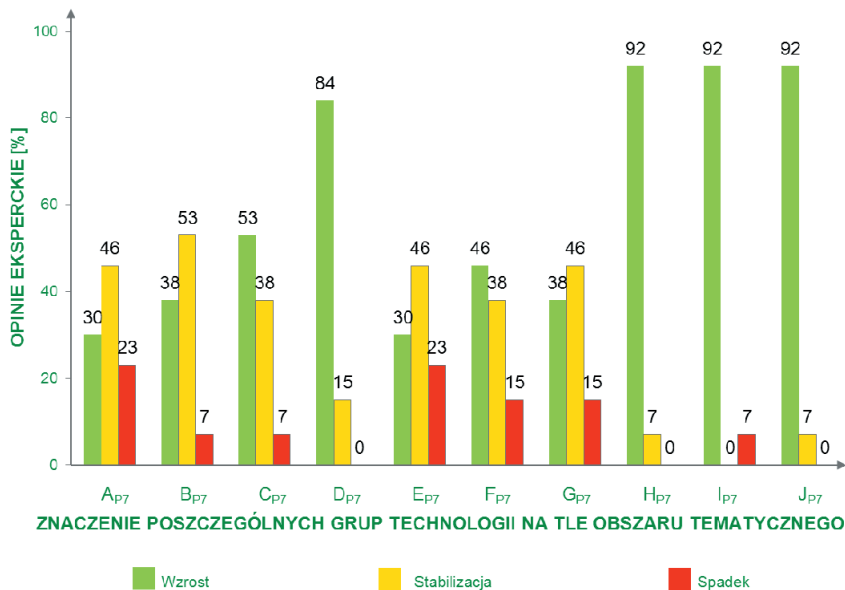
## Inżynieria powierzchni materiałów polimerowych P<sub>7</sub>



Analiza heurystyczna przeprowadzona z użyciem nowo opracowanej metodologii umożliwiła określenie pozycji strategicznych poszczególnych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów polimerowych. Wyniki badań wskazują, że pięć grup technologii B<sub>P7</sub>,

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

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



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

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

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

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

odpowiadających podejściu procesowemu (*M*) i alternatywnemu podejściu konsumenckiemu (*P*). Każde z rozpatrywanych pól badawczych podzielono dodatkowo na 7 obszarów tematycznych odpowiadających różnym rodzajom stosowanych urządzeń i realizowanych z ich udziałem procesów fizykochemicznych kształtujących strukturę i własności warstw powierzchniowych obrabianych materiałów (*M1-M7*) lub rodzajom materiałów inżynierskich, z których wytwarzane są produkty mające spełnić oczekiwania obecnych i potencjalnych klientów (*P1-P7*). Analiza wykonana z użyciem macierzy kontekstowych, tj. dendrologicznej macierzy wartości technologii, meteorologicznej macierzy oddziaływania otoczenia i macierzy strategii dla technologii, będącej wypadkową dwóch pierwszych macierzy oraz zestawień statystycznych, wygenerowanych na podstawie wyników metody e-Dephix, pozwoliła określić pozycje strategiczne poszczególnych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów na tle rozpatrywanych obszarów tematycznych, do których zostały one zakwalifikowane, oraz określić ścieżki ich rozwoju strategicznego w założonym horyzoncie czasowym najbliższych 20 lat.

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