

3. Ogólna charakterystyka znaczenia obróbki powierzchni spiekanych materiałów narzędziowych

L.A. Dobrzański, D. Pakuła, M. Staszuk, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz – Politechnika Śląska

3.1. Charakterystyka obróbki powierzchni spiekanych materiałów narzędziowych

Podstawowym czynnikiem przyczyniającym się do rozwoju wielostrzowych płytek skrawających, jest ciągłe dążenie do polepszenia jakości i wydajności produkcji. Jednym z najintensywniej rozwijających się kierunków rozwoju nowoczesnych materiałów narzędziowych, do których należy m.in. ceramika narzędziowa, węgliki spiekane i cermetale narzędziowe, jest pokrywanie ich przeciwzużyciowymi powłokami, głównie poprzez fizyczne osadzanie z fazy gazowej – PVD oraz poprzez chemiczne osadzanie z fazy gazowej – CVD. Możliwości konstituowania powłok wynikające z wzajemnego oddziaływania między procesem wytwarzania, własnościami i wydajnością wytworzonego układu pozwalają przez odpowiedni ich dobór tworzyć powłoki charakteryzujące się oczekiwanymi własnościami użytkowymi.

Problematyka badawcza dotycząca wytwarzania powłok, w tym PVD i CVD stanowi jeden z ważniejszych kierunków rozwoju inżynierii powierzchni w kraju i za granicą, gwarantujących otrzymanie powłoki o dobrych własności mechanicznych oraz dużej odporności na zużycie ścierne. Nadanie lepszych własności eksploatacyjnych powszechnie stosowanym materiałom bardzo często uzyskuje się poprzez nanoszenie powłok prostych jednowarstwowych, jednoskładnikowych metodami PVD. Dokonując wyboru materiału na powłoki napotyka się na barierę wynikającą z tego, że niemożliwe jest jednoczesne uzyskanie wielu własności oczekiwanych od idealnej powłoki. Przykładowo, wzrost twardości i wytrzymałości powoduje spadek ciągliwości i przyczepności powłoki do podłoża. Z tego powodu połączono ze sobą powłoki o różnych własnościach, z których każda ma do spełnienia odpowiednie zadanie mające na celu uzyskanie powłok gradientowych ciągłych lub skokowych, o jak najbardziej pożądanym własnościach w konkretnym zastosowaniu. Powłoki gradientowe tworzone są w wyniku stopniowej lub ciągłej zmiany jednego lub kilku składników w kierunku od podłoża do powierzchni zewnętrznej. Stanowią one nowoczesną grupę wśród powłok uzyskiwanych m.in. w procesie PVD [128-148]. Warstwy lub strefy tworzonej powłoki

powinny zapewniać zależnie od swojego umiejscowienia pożądane własności, a tworząc strefy przejściowe pomiędzy sobą gwarantować przejście pomiędzy często różniącymi się między sobą własnościami. Warstwa najbliższa materiałowi pokrywanego podłoża zazwyczaj zapewnia dobrą przyczepność do niego, podczas gdy warstwa zewnętrzna zapewnia odpowiednią twardość, wytrzymałość, własności trybologiczne i antykorozyjne [130-147]. Możliwość wytworzenia powłok, w których skład chemiczny zmienia się stopniowo od podłoża do powierzchni powłoki może być również wykorzystany także w elementach konstrukcyjnych, m.in. turbinach, implantach oraz jako powłoki antykorozyjne.

Pokrywanie materiałów narzędziowych przeciwzużyciowymi powłokami, w tym uzyskanymi poprzez fizyczne osadzanie z fazy gazowej – PVD oraz poprzez chemiczne osadzanie z fazy gazowej – CVD, ale także innymi nowoczesnymi technologiami jest od wielu lat obserwowaną tendencją technologiczną w zakresie wytwarzania narzędzi i to nie tylko skrawających. Wiele prac badawczych ostatnich lat w tym własnych nad pokrywaniem powłokami odpornymi na zużycie ceramiki narzędziowej zweryfikowało ponadto dotychczasowy pogląd, iż pokrywanie ceramiki narzędziowej jest nieuzasadnione ze względu na jej i tak wysoką twardość. Wykazano, że powlekanie tego typu narzędzi jest jak najbardziej celowe ponieważ po pierwsze powoduje zwiększenie trwałości ostrzy narzędzi skrawających wskutek zmniejszenia wydzielanego ciepła w trakcie skrawania poprzez zmniejszenie siły tarcia na powierzchni natarcia, po drugie stwierdzono, że powłoki pokrywając pory na powierzchni ceramiki narzędziowej eliminują miejsca powstawania wykruszeń, a ponadto powłoki ochronne powodują opóźnienie procesu zużycia dyfuzyjnego. Rozwiązanie tego problemu badawczego również umożliwia zwiększenie wydajności i jakości obróbki skrawaniem, przy jednoczesnym zmniejszeniu jej energochłonności i materiałochłonności, co stanowi warunek konieczny dla umożliwienia konkurencji w warunkach wolnorynkowej gospodarki. Zastosowanie technologii obróbki powierzchniowej materiałów narzędziowych, w tym poprzez fizyczne osadzanie z fazy gazowej PVD oraz chemiczne CVD, dla uzyskania powłok gradientowych o dużej odporności na zużycie, również w wysokiej temperaturze, pozwala bowiem na poprawę własności tych materiałów w warunkach obróbki skrawaniem, m.in. w wyniku zmniejszenia współczynnika tarcia, wzrostu mikrotwardości, poprawy warunków kontaktu trybologicznego w obszarze styku narzędzie-przedmiot obrabiany, a także zabezpieczenia przed zużyciem adhezyjnym i dyfuzyjnym oraz utlenianiem. Określenie tych własności pozwala na wyznaczenie optymalnego obszaru zastosowań zarówno materiałów ceramicznych

podłoża jak i badanych powłok wielofazowych i gradientowych, oraz na ustalenie korelacji między wynikami badań laboratoryjnych, a zużyciem określonym w wyniku technologicznych prób skrawania.

3.2. Charakterystyka metodyki oceny znaczenia obróbki powierzchni spiekanych materiałów narzędziowych

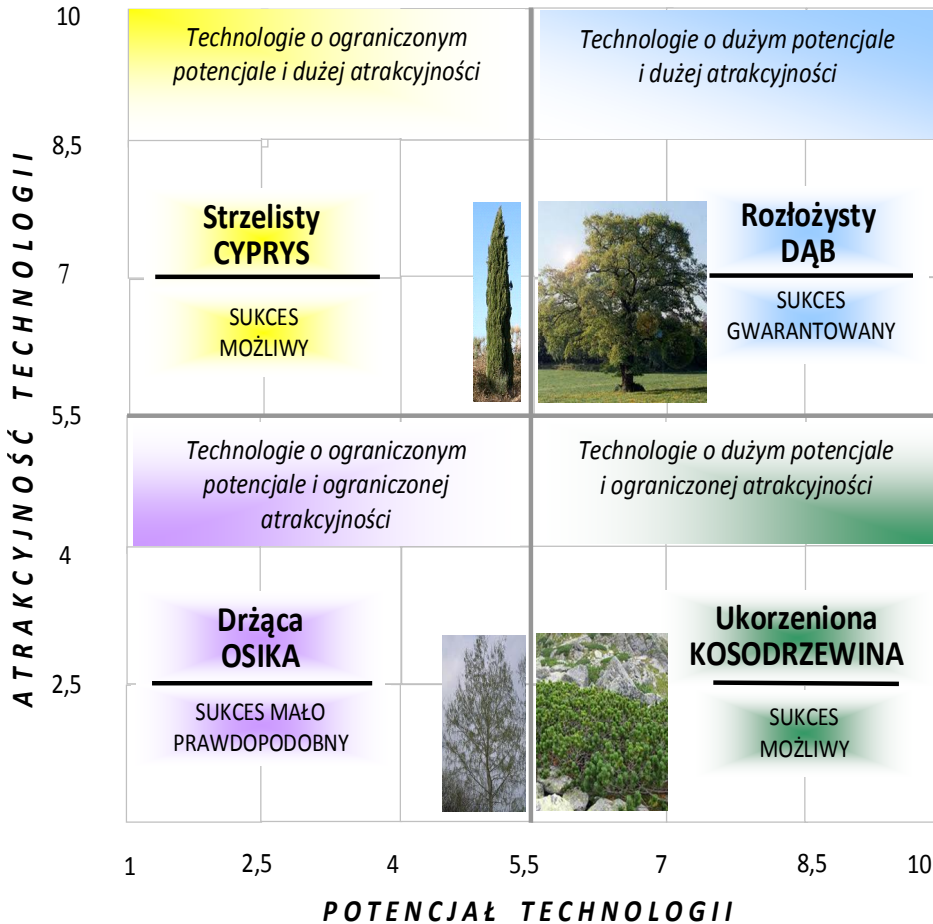
Naukową metodą wyznaczania strategicznych kierunków rozwoju badań i rozwoju technologii w celu przysporzenia jak największych korzyści ekonomicznych i społecznych w gospodarce jest foresight. Uczestnicy foresightu ustalają priorytetowe kierunki badań wspólnie tworząc wizję przyszłych osiągnięć, poprzez opracowanie scenariuszy rozwojowych, co ma istotne znaczenie m.in. dla kształtowania polityki badawczo-rozwojowej i inwestycyjnej przedsiębiorstw, branż a nawet państwa. W tego typu badaniach nie chodzi przy tym o dokładność prognozowania, lecz o określenie perspektyw rozwojowych i przygotowanie zmian. W ramach własnego, zakończonego Projektu FORSURF, dotyczącego foresightu inżynierii powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych [4, 13, 75-85] rozpatrzono z udziałem ok. 500 uczonych z wielu krajów Świata liczne spośród ponad 500 szczegółowych technologii kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich, spośród których wytypowano priorytetowe o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w analizowanym horyzoncie czasowym 20 lat, określanym jako technologie krytyczne inżynierii powierzchni materiałów. Rozpatrzono wśród nich również 10 grup technologii krytycznych, dotyczących materiałów narzędziowych [77-79], jak również technologie PVD, CVD i dotyczące powłok nanostrukturalnych, które są stosowane przy wytwarzaniu narzędzi, w tym skrawających [75].

W celu określenia pozycji strategicznej poszczególnych grup technologii krytycznych i wytyczenia strategii postępowania, zastosowano nowo opracowaną autorską metodologię komputerowo zintegrowanego prognozowania rozwoju inżynierii powierzchni materiałów wraz z metodą e-Delphix [77], której poprawność uprzednio zweryfikowano pozytywnie, stosując jako punkt odniesienia wyniki klasycznych badań materiałoznawczych [76]. Badania opinii ekspertów na temat licznych czynników związanych z poszczególnymi technologiami odbyło się w kilku seriach z wykorzystaniem elektronicznych kwestionariuszy ankietowych złożonych z kilkudziesięciu pytań każdy dotyczących m.in. mikro-

i makrootoczenia, z podziałem na otoczenie społeczne, technologiczne, ekonomiczne, ekologiczne oraz polityczne i prawne, w ściśle określonych proporcjach. 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 [77], stanowiły pierwotne dane źródłowe, wyrażone ilościowo z wykorzystaniem jednobiegunowej dziesięciostopniowej skali dodatniej bez zera, zwanej uniwersalną skalą stanów względnych. Opracowano zbiór macierzy kontekstowych, obejmujących dendrologiczne macierze wartości technologii, meteorologiczne macierze oddziaływania otoczenia i macierze strategii dla technologii. Macierze te stanowią narzędzia graficznej analizy porównawczej poszczególnych technologii lub ich grup, pozwalając na ich zobiektywizowaną ocenę oraz określenie rekomendowanych strategii postępowania w odniesieniu do poszczególnych technologii lub ich grup, a także wytyczenie ścieżek rozwoju strategicznego.

Dendrologiczna macierz wartości technologii (rys. 3.1) przedstawia graficznie wyniki oceny poszczególnych grup technologii pod kątem ich potencjału, stanowiącego rzeczywistą obiektywną wartość danej technologii i atrakcyjności, odzwierciedlającej subiektywne postrzeganie danej technologii wśród jej potencjalnych użytkowników [77]. Potencjał danej grupy technologii, wyrażony za pomocą dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, naniesiony na oś poziomą macierzy dendrologicznej jest wynikiem analizy wielokryterialnej przeprowadzonej na podstawie oceny eksperckiej, uwzględniającej w odpowiednich proporcjach potencjał: kreacyjny, aplikacyjny, jakościowy, rozwojowy i techniczny. Na oś pionową macierzy dendrologicznej został natomiast naniesiony poziom atrakcyjności danej grupy technologii, będący średnią ważoną oceny eksperckiej dokonanej na podstawie kryteriów szczegółowych odpowiadających atrakcyjności gospodarczej, ekonomicznej, humanistycznej, przyrodniczej i systemowej. W zależności od wartości potencjału i poziomu atrakcyjności, które określono w ramach oceny eksperckiej, każdą z analizowanych technologii umieszczono w jednej z ćwiartek macierzy. W dendrologicznej macierzy wartości technologii wyróżniono następujące ćwiartki [77]:

- **drżąca osika** odpowiadająca technologii słabej o ograniczonym potencjale, zawierającym się w przedziale $\langle 1; 5,5 \rangle$ oraz ograniczonej atrakcyjności z przedziału $\langle 1; 5,5 \rangle$, której przyszły sukces jest mało prawdopodobny;



Rysunek 3.1. Dendrologiczna macierz wartości technologii; prezentacja podejścia [80-82]

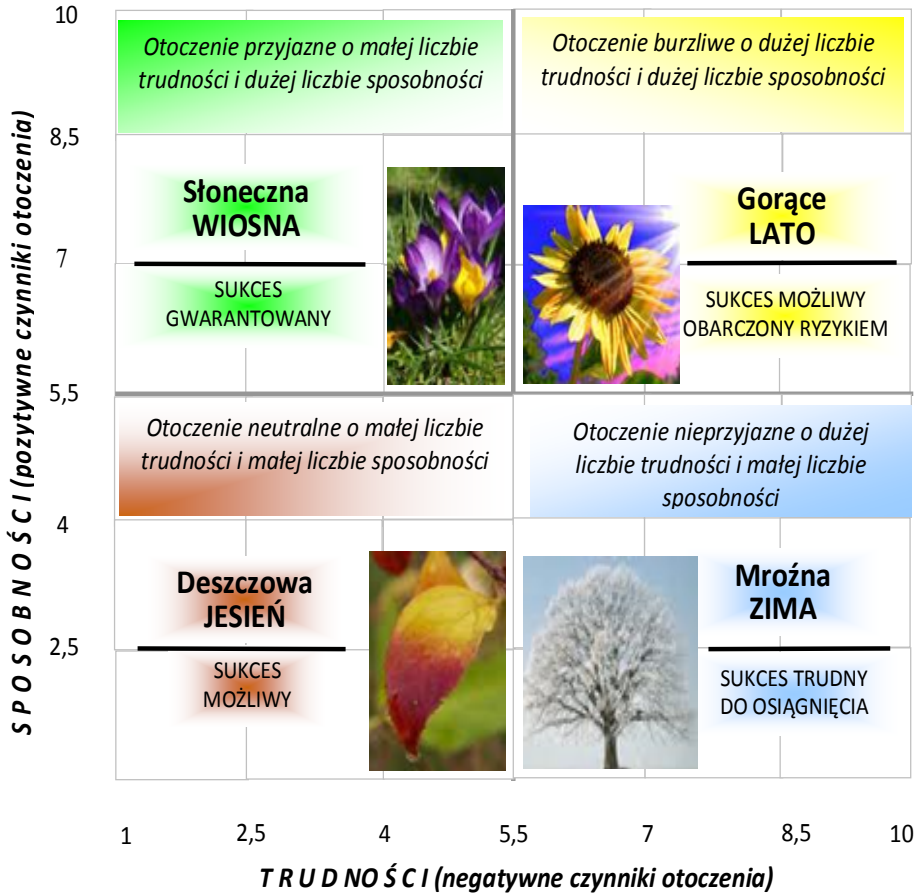
- **strzelisty cyprys** oznacza technologię o ograniczonym potencjale z przedziału $\langle 1; 5,5 \rangle$, lecz dużej atrakcyjności, zawierającej się w przedziale $(5,5; 10)$, przez co sukces danej technologii jest możliwy;
- **ukorzeniona kosodrzewina** odpowiada technologii o ograniczonej atrakcyjności z przedziału $\langle 1; 5,5 \rangle$, lecz dużym potencjale, zawierającym się w przedziale $(5,5; 10)$, dzięki czemu jej przyszły sukces jest wysoce prawdopodobny;
- **rozłożysty dąb** oznacza najlepszą możliwą sytuację, w której analizowana technologia charakteryzuje się zarówno dużym potencjałem zawartym w przedziale $(5,5; 10)$, jak i dużą atrakcyjnością z przedziału $(5,5; 10)$, który to mariaż stanowi gwarant przyszłego sukcesu.

Meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia (rys. 3.2) przedstawia graficznie wyniki oceny wpływu czynników zewnętrznych na poszczególne grupy technologii, które zostały podzielone na trudności oddziałujące negatywnie i sposobności wpływające pozytywnie na analizowane technologie [77]. Trudności zewnętrzne wyrażone z wykorzystaniem dziesięciostopniowej uniwersalnej skali stanów względnych, będące wynikiem analizy wielokryterialnej przeprowadzonej na podstawie oceny eksperckiej, zostały naniesione na oś poziomą macierzy meteorologicznej. Na oś pionową tej macierzy naniesiono natomiast sposobności, czyli pozytywne czynniki oddziaływania otoczenia, będące średnią ważoną oceny eksperckiej dokonanej na podstawie kryteriów szczegółowych. W zależności od określonego, w ramach oceny eksperckiej w dziesięciopunktowej skali, poziomu oddziaływania pozytywnych i negatywnych czynników otoczenia na analizowane technologie, każdą z nich umieszczono w jednej z ćwiartek macierzy.

W meteorologicznej macierzy wartości technologii wyróżniono następujące ćwiartki [77]:

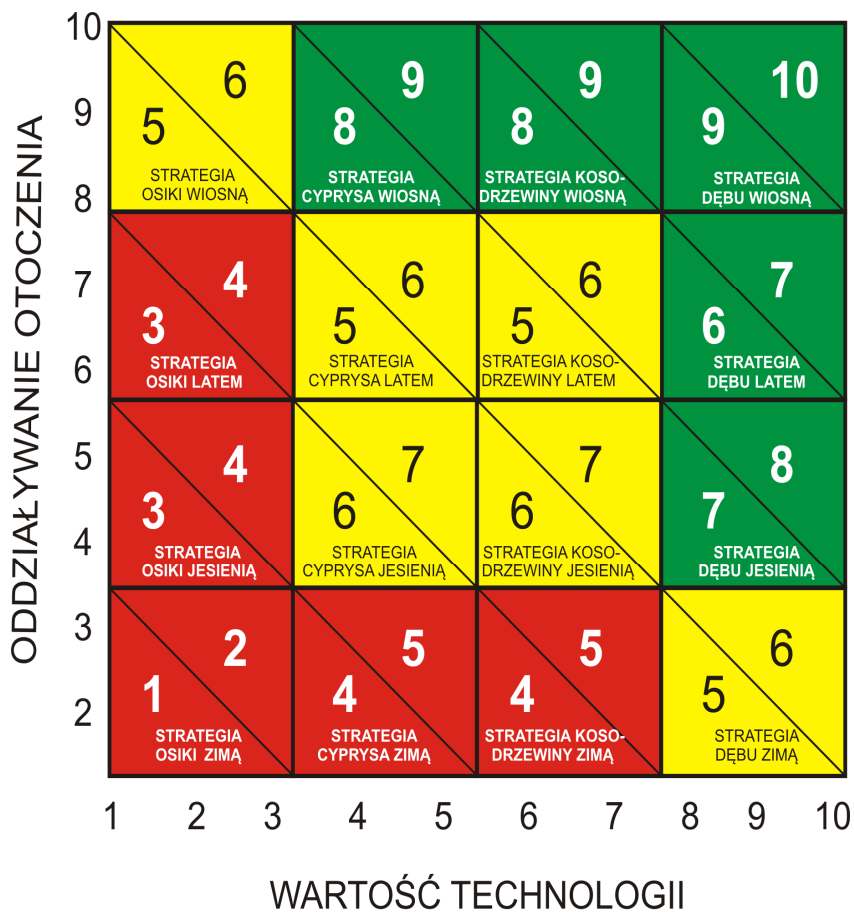
- **mroźna zima** odpowiada najgorszej możliwej sytuacji, w której otoczenie sprawia dużą liczbę trudności, zawierających się w przedziale (5,5; 10) i niewielką liczbę sposobności z przedziału $\langle 1; 5,5 \rangle$, co powoduje, że sukces w danym otoczeniu jest trudny bądź niemożliwy do osiągnięcia;
- **upalne lato** odzwierciedla sytuację, w której otoczenie niesie dużo sposobności, zawierających się w przedziale (5,5; 10), lecz towarzyszy im także dużo trudności z przedziału (5,5; 10), co powoduje, że sukces technologii w danych warunkach jest możliwy, lecz obarczony ryzykiem;
- **deszczowa jesień** obrazuje sytuację neutralną, w której na daną technologię nie czyhają pułapki, co odpowiada przedziałowi $\langle 1; 5,5 \rangle$, lecz także otoczenie nie stwarza zbyt wielu sposobności, co odpowiada przedziałowi $\langle 1; 5,5 \rangle$.
- **słoneczna wiosna** jest najlepszym z możliwych wariantów, ponieważ oznacza otoczenie przyjazne o dużej liczbie sposobności z przedziału (5,5; 10) i małej liczbie trudności, zawierających się w przedziale $\langle 1; 5,5 \rangle$, co powoduje, że sukces danej technologii w tak dobrych warunkach jest gwarantowany.

Na kolejnym etapie prac badawczych wyniki badań przedstawione w postaci graficznej za pomocą dentrologicznej macierzy wartości technologii i meteorologicznej macierzy oddziaływania otoczenia zostały naniesione na **macierz strategii dla technologii** [77, 80]. Macierz

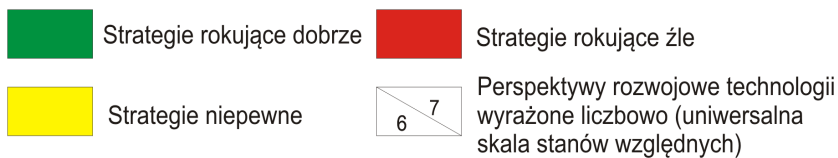


Rysunek 3.2. Meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia; prezentacja podejścia [80-82]

ta składa się z szesnastu pól odpowiadających poszczególnym wariantom, wynikającym z kompletu kombinacji czterech rodzajów technologii z czterema rodzajami otoczenia. Macierz strategii dla technologii w postaci ogólnej (rys. 3.3) przedstawia graficznie miejsce technologii, z uwzględnieniem jej wartości i siły oddziaływania otoczenia wyrażonych w dziesięciopniowej uniwersalnej skali stanów względnych oraz wskazuje strategię postępowania, jaką powinno się przyjąć w odniesieniu do danej technologii, wzięwszy pod uwagę analizowane wcześniej czynniki. Macierz strategii dla technologii w postaci szczegółowej przedstawiona na rysunku 3.4 zawiera w poszczególnych polach krótki opis postępowania zalecanego w przypadku, gdy dana technologia o określonej wartości znajdzie się w otoczeniu charakteryzującym się określonymi sposobnościami i trudnościami.

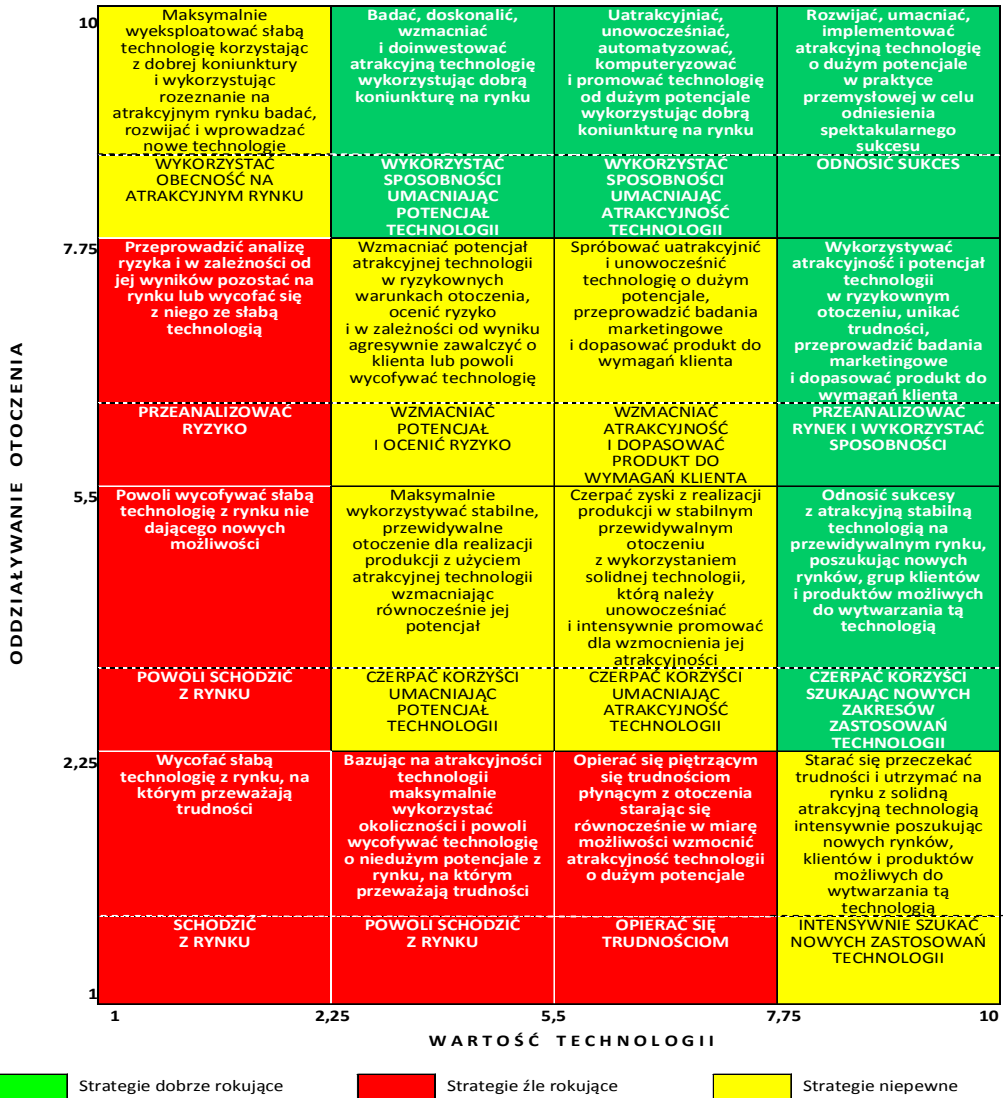


LEGENDA



Rysunek 3.3. Ogólna postać macierzy strategii dla technologii [83]

W celu umożliwienia przeniesienia konkretnych wartości liczbowych z czteropolowych macierzy dendrologicznej i meteorologicznej do szesnastopolowej macierzy strategii dla technologii sformułowano zależności matematyczne, pozwalające na przeskalowanie i zobiektywizowanie wyników badań, a na ich podstawie opracowano program komputerowy umożliwiający szybkie obliczenie szukanych wartości i wygenerowanie macierzy strategii dla technologii w formie graficznej.



Rysunek 3.4. Szczegółowa postać macierzy strategii dla technologii [80]

Wprowadzono pojęcia: względnej wartości technologii V_n i względnej wartości oddziaływania otoczenia E_n . Z wykorzystaniem zależności matematycznych, które w uogólnionej uproszczonej wersji wyraża układ równań (3.1) [77, 80], możliwe staje się dokonanie obliczeń szczegółowych i ich wizualizacji z zastosowaniem macierzy strategii dla technologii (rys. 3.3 i 3.4).

$$\begin{cases} V_n' = c + \left(\frac{d-c}{b-a}\right)(V_n - a) \\ E_n' = c + \left(\frac{d-c}{b-a}\right)(E_n - a) \end{cases} \quad (3.1)$$

gdzie:

a – wartość minimalna w macierzy dendrologicznej i meteorologicznej,

b – wartość maksymalna w macierzy dendrologicznej i meteorologicznej,

c – wartość minimalna w macierzy strategii dla technologii,

d – wartość maksymalna w macierzy strategii dla technologii,

V_n' – względna wartość technologii w macierzy strategii dla technologii,

V_n – względna wartość technologii w macierzy dendrologicznej i meteorologicznej,

E_n' – względna wartość oddziaływania otoczenia w macierzy strategii dla technologii,

E_n – względna wartość oddziaływania otoczenia w macierzy dendrologicznej i meteorologicznej,

n – symbol alfanumeryczny danej technologii/ grupy technologii, $n \in \{A, B, \dots, Z\}$.

Współrzędne punktów odzwierciedlających ocenę ekspercką wartości technologii naniesione na macierz dendrologiczną oznaczono górnym indeksem d , punktów odpowiadających intensywności oddziaływania otoczenia naniesionych na macierz meteorologiczną górnym indeksem m , natomiast punkty naniesione na macierz strategii dla technologii, określające pozycje strategiczne poszczególnych technologii, mają górny indeks s . Dolne indeksy punktów informują, do jakiego obszaru tematycznego ($M1-M7, P1-P7$) należy analizowana technologia lub grupa technologii. Wprowadzenie indeksów pozwala na zbiorcze zestawienie wyników badań i analizę porównawczą wszystkich technologii, niezależnie do jakiego obszaru zostały one pierwotnie zakwalifikowane. W dalszej części książki przeanalizowano wybrane z technologii krytycznych przeanalizowane w cytowanych pracach własnych [75-85], dotyczących technologii inżynierii powierzchni możliwych do zastosowania w odniesieniu do spiekanych materiałów narzędziowych, zestawione w tabelicy 3.1³⁾.

³⁾ W niniejszej książce zastosowano oryginalne oznaczenia poszczególnych technologii dotyczących kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich zastosowane w Projekcie FORSURF, uszeregowanych w 14 obszarach tematycznych, skategoryzowanych w 2 grupach z uwzględnieniem podejścia producenckiego M i konsumenckiego P , pomimo że w niniejszej książce są analizowane wyłącznie technologie, które dotyczą kształtowania powierzchni narzędzi, w tym głównie skrawających.

Tablica 3.1. Grupy technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych

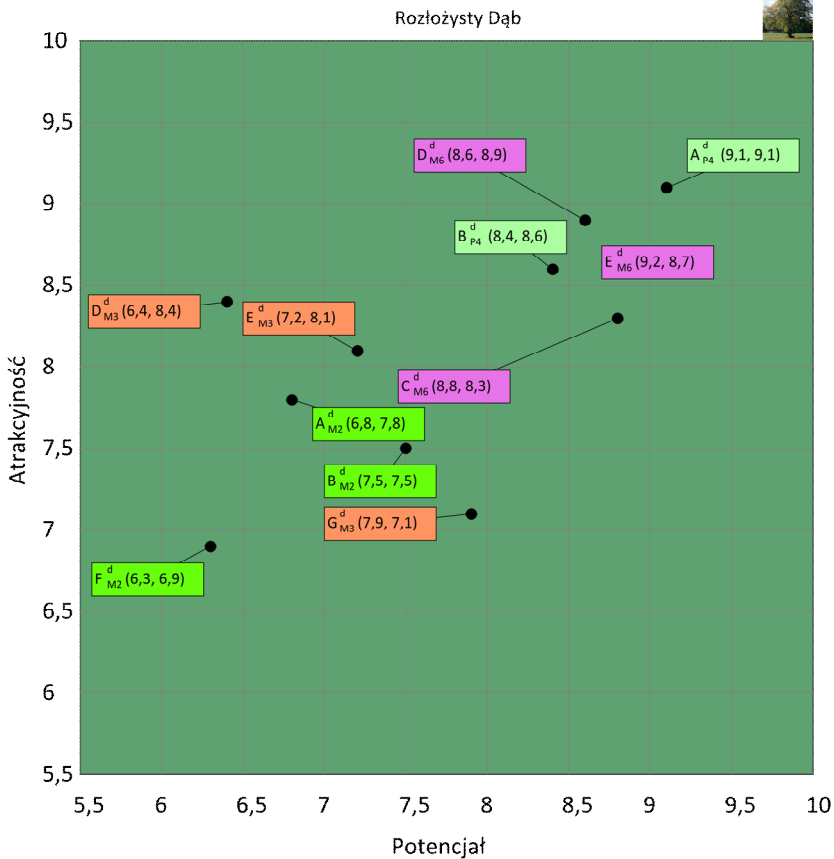
Inżynieria powierzchni materiałów narzędziowych P4	
A_{P4}	Fizyczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PVD)
B_{P4}	Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (CVD)
C_{P4}	Natryskiwanie
D_{P4}	Metalurgia proszków (zmiana składu chemicznego i/lub fazowego warstwy wierzchniej)
E_{P4}	Azotowanie i kompleksowe obróbki z udziałem azotowania
F_{P4}	Stopowanie/wtapienie laserowe
G_{P4}	Napawanie
H_{P4}	Nanoszenie powłok gradientowych
I_{P4}	Technologie hybrydowe
J_{P4}	Impulsowe osadzanie laserowe (PLD)
Technologie fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) M2	
A_{M2}	Katodowe odparowanie łukowe (CAD)
B_{M2}	Reaktywne rozpylanie magnetronowe (RMS)
C_{M2}	Odparowanie metalu impulsowo-plazmowo (PPM)
D_{M2}	Osadzanie warstw z wykorzystaniem wiązki jonowej (IBAD)
E_{M2}	Odparowanie metalu niskonapięciowym działem elektronowym (HHCD)
F_{M2}	Osadzanie warstw z odparowaniem wiązką elektronową z jonizacją par (EB-PVD)
G_{M2}	Aktywowane reaktywnie naparowanie przy użyciu działła elektronowego (BARE)
H_{M2}	Reaktywne nanoszenie ze zjonizowanych klastrów (ICB)
I_{M2}	Odparowanie reaktywne łukiem elektrycznym (TAE)
J_{M2}	Impulsowe osadzanie laserowe (PLD)
Technologie chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) M3	
A_{M3}	Wysokotemperaturowe chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (HFCVD)
B_{M3}	Osadzanie powłok z fazy gazowej pod ciśnieniem atmosferycznym (APCVD)
C_{M3}	Osadzanie powłok z fazy gazowej pod obniżonym ciśnieniem (LPCVD)
D_{M3}	Plazmo-chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PACVD/ PECVD)
E_{M3}	Osadzanie powłok z fazy gazowej aktywowane laserowo (LCVD)
F_{M3}	Osadzanie powłok aktywowane wiązką promieni UV (Photo CVD)
G_{M3}	Osadzanie powłok z użyciem prekursorów metaloorganicznych (MOCVD)
H_{M3}	Osadzanie powłok realizowane w złożu fluidalnym (Fluidized-Bed CVD)
I_{M3}	Chemiczna infiltracja z fazy gazowej (CVI)
J_{M3}	Osadzanie pojedynczych warstw atomowych (ALD)
Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich M6	
A_{M6}	Reaktywne trawienie jonowe (RIE)
B_{M6}	Elektronolitografia (EBL)
C_{M6}	Chemiczne osadzanie nanometrycznych warstw wierzchnich WW z fazy gazowej (CVD)
D_{M6}	Fizyczne osadzanie nanometrycznych WW z wykorzystaniem wiązki jonowej (IBAD)
E_{M6}	Fizyczne osadzanie nanometrycznych warstw wierzchnich z odparowaniem wiązką elektronową z jonizacją par (EB-PVD)
F_{M6}	Osadzanie pojedynczych warstw atomowych (ALD)
G_{M6}	Elektroosadzanie nanometrycznych warstwy wierzchniej
H_{M6}	Metoda zol-żel otrzymywania nanometrycznych warstw wierzchnich
I_{M6}	Nakładanie na warstw wierzchnich powłok zawierających nanomateriały
J_{M6}	Obróbka powierzchniowa nanomateriałów

Końcowym efektem wykonanych badań [77] jest także opracowana Księga Technologii Krytycznych, będąca odrębną publikacją [84], na którą składa się zbiór kilkuset map drogowych i kart informacyjnych technologii, stanowiących wygodne narzędzie ich analizy porównawczej pod względem wybranego kryterium materiałoznawczego, technologicznego lub ekonomicznego.

3.3. Charakterystyka perspektyw rozwojowych obróbki powierzchni spiekanych materiałów narzędziowych

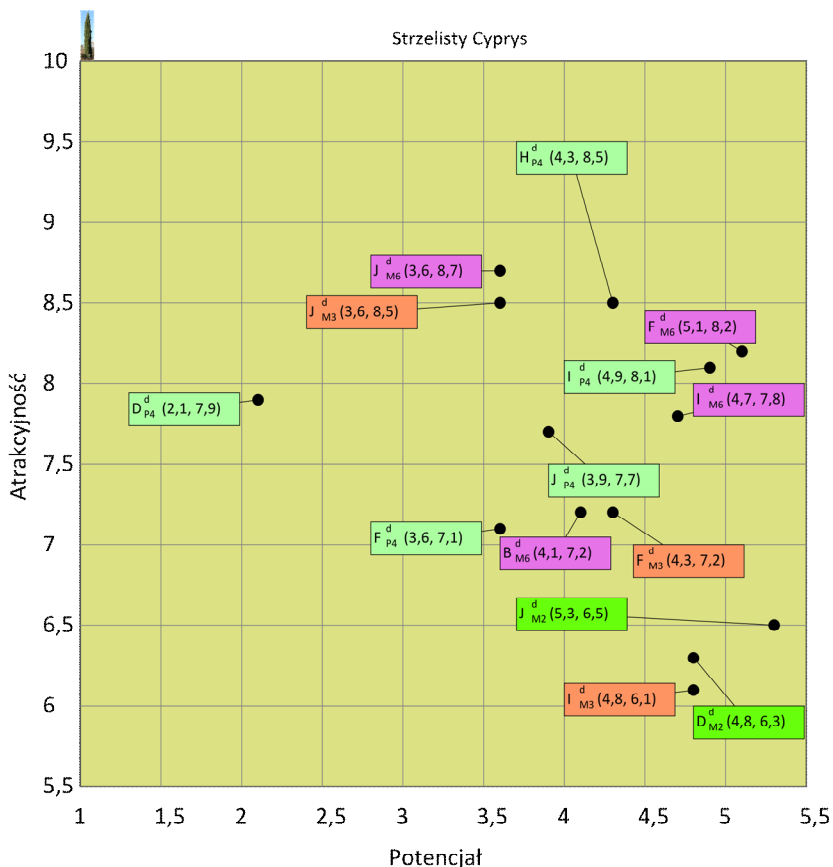
Jednym z kierunków rozwojowych, zmierzających do udoskonalania materiałów narzędziowych, obok poszukiwania całkowicie nowych materiałów i udoskonalania składu chemicznego materiału, jest obróbka powierzchniowa materiałów narzędziowych mająca na celu polepszenie jego własności. W przypadku materiałów narzędziowych dąży się do optymalnego połączenia następujących, oczekiwanych przez klienta, własności: wysokiej twardości; odporności na ścieranie, zużycie, zmęczenie cieplno-mechaniczne i wysoką temperaturę; wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i zginanie; dobrej ciągliwości; dużej udarności i małej przewodności cieplnej. Osiągnięciu optymalnej, dla konkretnego produktu, kombinacji oczekiwanych własności służą nowoczesne technologie kształtowania struktury i własności materiałów narzędziowych.

Analiza wykonana na podstawie wyników badań heurystycznych, przedstawionych graficznie z użyciem macierzy kontekstowych [77], umożliwiła określenie pozycji strategicznej technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych. Na kolejnych rysunkach 3.5-3.7 przedstawiono macierz dendrologiczną prezentującą potencjał i atrakcyjność poszczególnych grup technologii krytycznych, macierz meteorologiczną prezentującą intensywność oddziaływania pozytywnych i negatywnych czynników otoczenia na grupy technologii krytycznych oraz macierz strategii dla technologii prezentującą wyrażone ilościowo perspektywy rozwojowe poszczególnych grup technologii krytycznych i wskazującą strategię rekomendowane do zastosowania w odniesieniu do tych grup technologii krytycznych, wybranych w kontekście problematyki niniejszej książki, a dotyczących inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych $A_{P4}-J_{P4}$ wytypowanych w ramach obszaru tematycznego $P4$, fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) $A_{M2}-J_{M2}$ wytypowanych w ramach obszaru tematycznego $M2$, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy



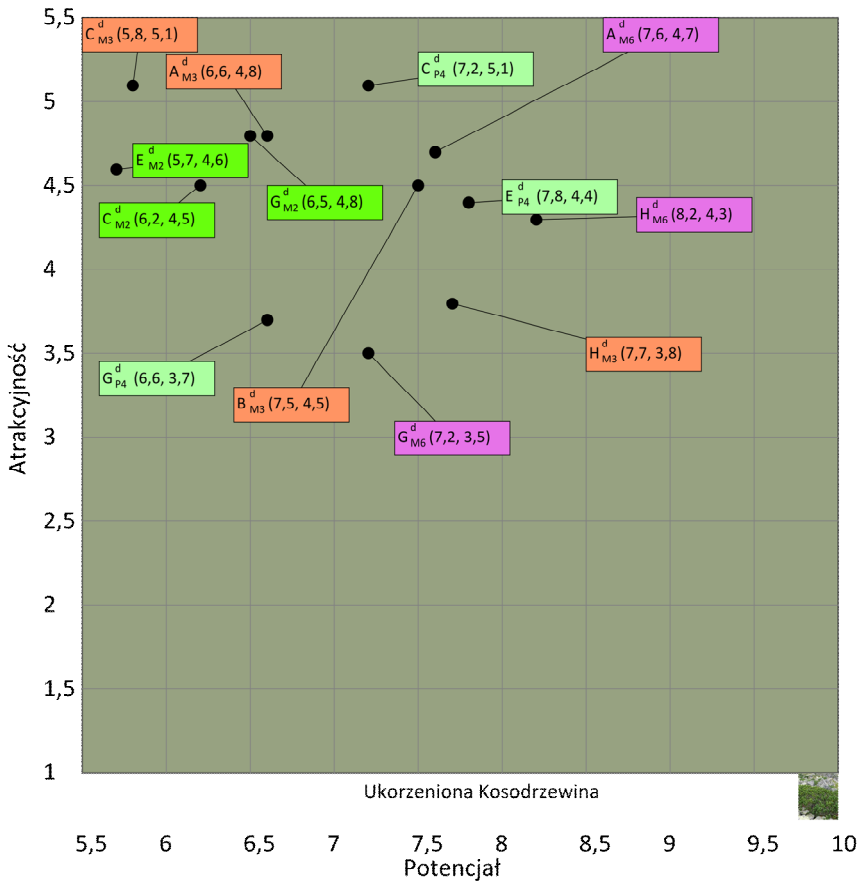
Rysunek 3.5a. Górna prawa ćwiartka macierzy dendrologicznej prezentującej potencjał i atrakcyjność poszczególnych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych A_{P4} - J_{P4} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego P4, technologii krytycznych fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) A_{M2} - J_{M2} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M2, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologie krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6 [84]

gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologie krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6. W celu pełniejszej prezentacji szczegółów przedstawionych na tychże mapach każdorazowo przedstawiono po 3 najbardziej istotne ćwiartki każdej z map, natomiast zrezygnowano z tych, które zawierają technologie o najmniejszej perspektywie rozwojowej.



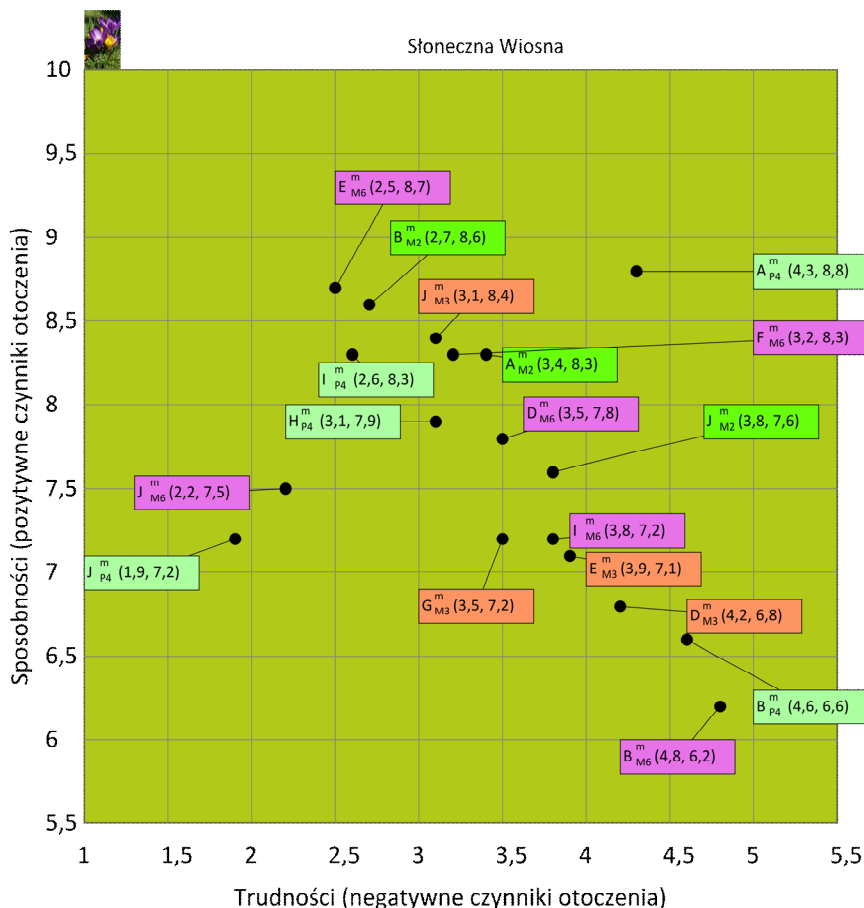
Rysunek 3.5b. Górna lewa ćwiartka macierzy dendrologicznej prezentującej potencjał i atrakcyjność poszczególnych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych A_{P4} - J_{P4} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego P4, technologii krytycznych fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) A_{M2} - J_{M2} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M2, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologie krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6 [84]

Analiza wykonana na podstawie wyników badań heurystycznych, przedstawionych graficznie z użyciem macierzy kontekstowych [77], umożliwiła określenie pozycji strategicznej technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych, zestawionych obszarze P4. Najwyższą możliwą ocenę (10 punktów) przyznano metodzie fizycznego nanoszenia powłok z fazy gazowej (PVD) A_{P4}^s (9,5; 8,4), która znalazła się w najbardziej obiecującym polu macierzy strategii dla technologii – dębu wiosną, podobnie jak chemiczne



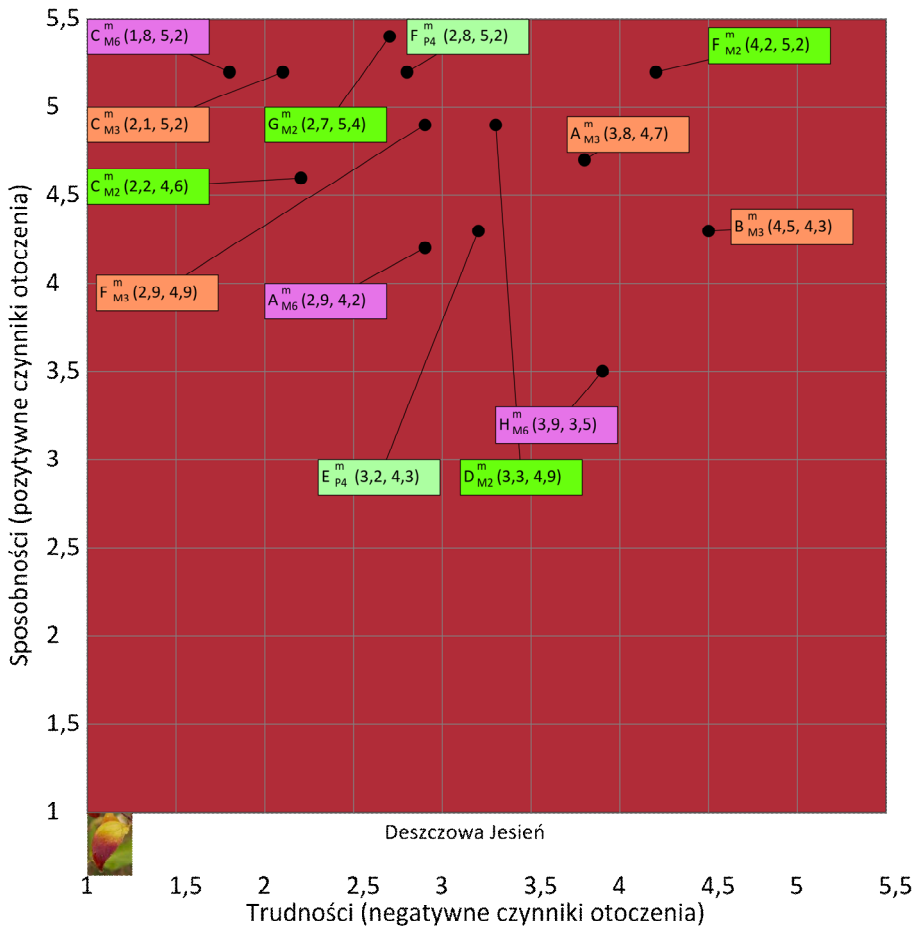
Rysunek 3.5c. Dolna prawa ćwiartka macierzy dendrologicznej prezentującej potencjał i atrakcyjność poszczególnych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych A_{P4} - J_{P4} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego P4, technologii krytycznych fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) A_{M2} - J_{M2} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M2, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologie krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6 [84]

nanoszenie powłok z fazy gazowej (CVD) B_{P4}^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. impulsowego osadzania laserowego (PLD) J_{P4}^s (4,4; 9,0), technologii hybrydowych I_{P4}^s (4,8; 9,0) i technologii nanoszenia powłok gradientowych H_{P4}^s (4,7; 8,7),



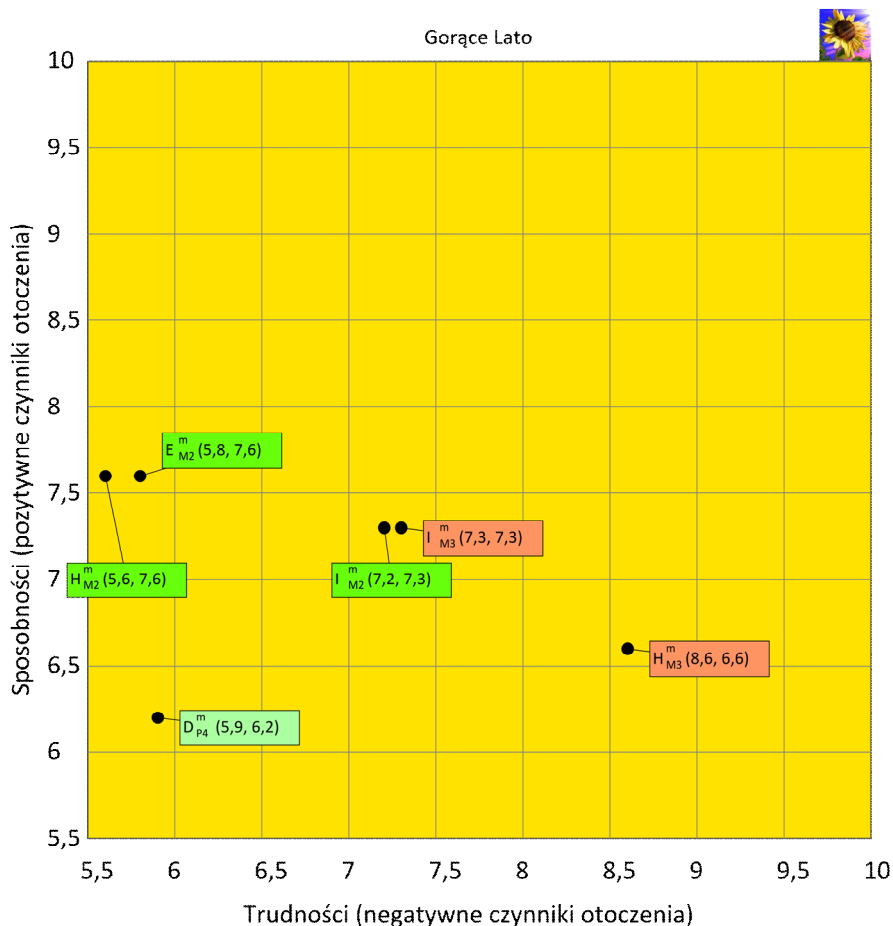
Rysunek 3.6a. Górna lewa ćwiartka macierzy meteorologicznej prezentującej intensywność oddziaływania pozytywnych i negatywnych czynników otoczenia na grupy technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych A_{P4} - J_{P4} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego P4, technologii krytycznych fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) A_{M2} - J_{M2} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M2, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologii krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6 [84]

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_{P4}^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



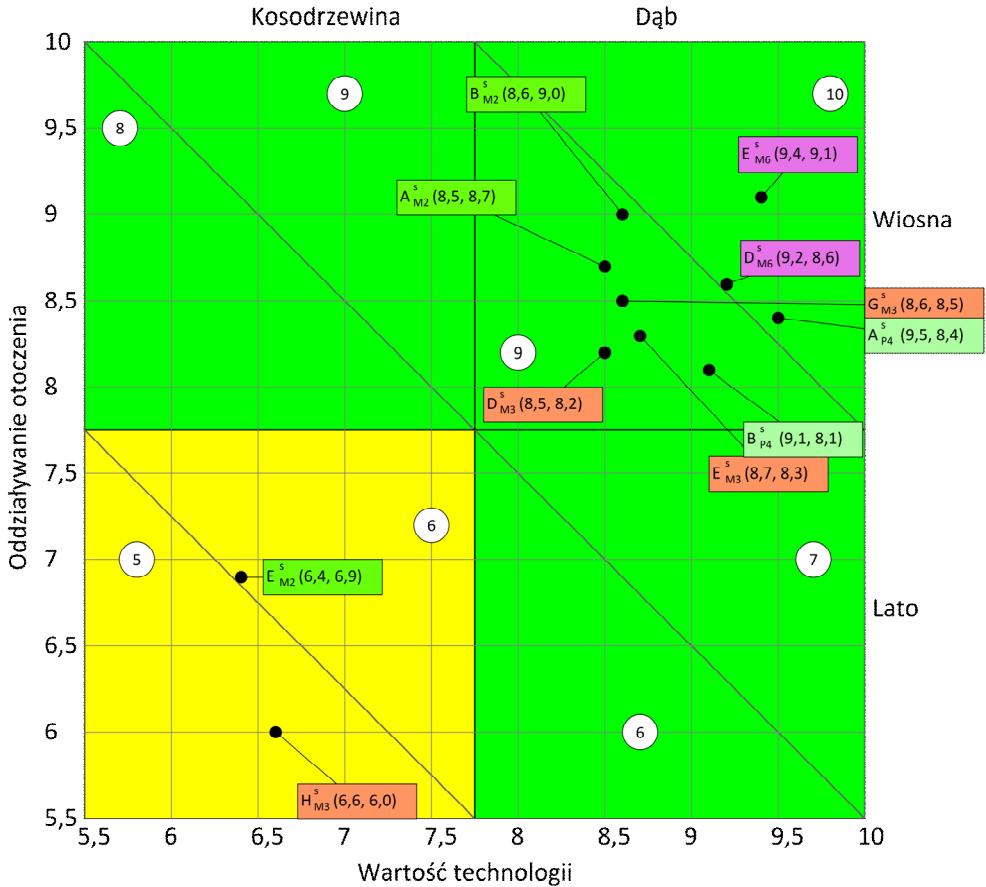
Rysunek 3.6b. Dolna lewa ćwiartka macierzy meteorologicznej prezentującej intensywność oddziaływania pozytywnych i negatywnych czynników otoczenia na grupy technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych A_{P4} - J_{P4} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego P4, technologii krytycznych fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) A_{M2} - J_{M2} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M2, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologii krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6 [84]

7 punktów przyznano stopowaniu/wtapieniu laserowemu F_{P4}^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_{P4}^s (3,8; 6,4), ze względu na trudności płynące z otoczenia w postaci



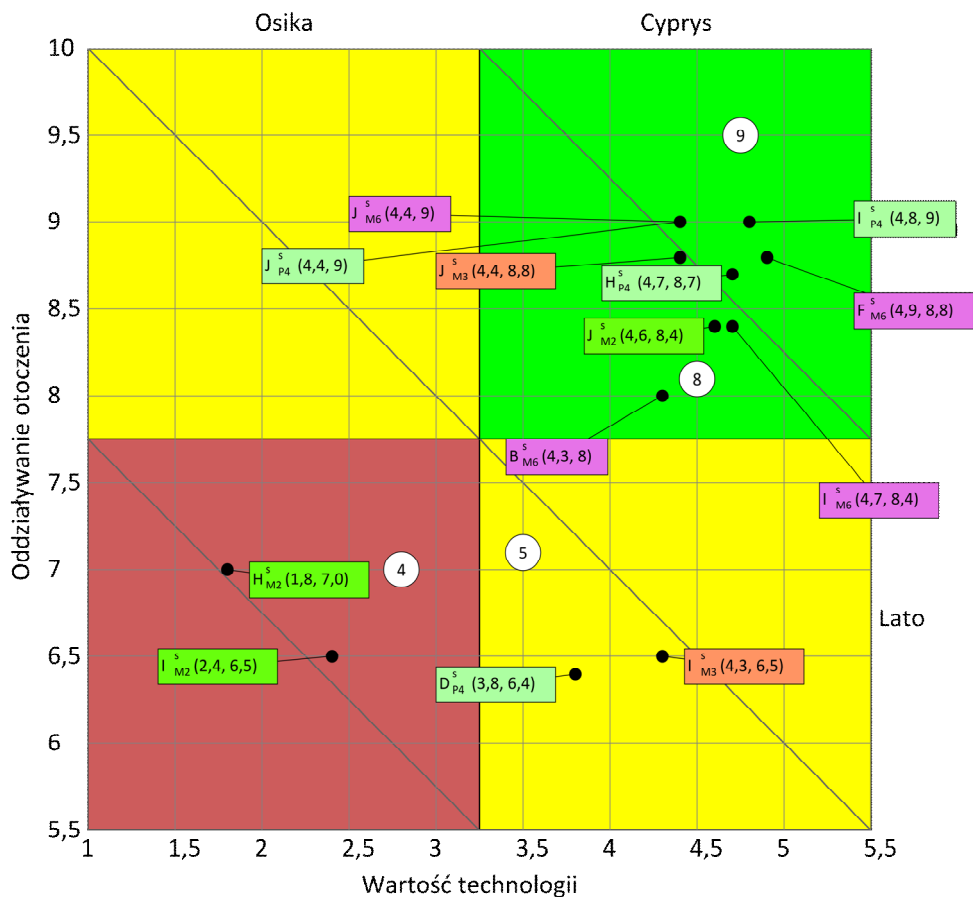
Rysunek 3.6c. Górna prawa ćwiartka macierzy meteorologicznej prezentującej intensywność oddziaływania pozytywnych i negatywnych czynników otoczenia na grupy technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych A_{P4} - J_{P4} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego P4, technologii krytycznych fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) A_{M2} - J_{M2} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M2, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologii krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6 [84]

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_{P4}^S (6,9; 2,2), która, znajdując się w polu kosodrzewiny zimą,



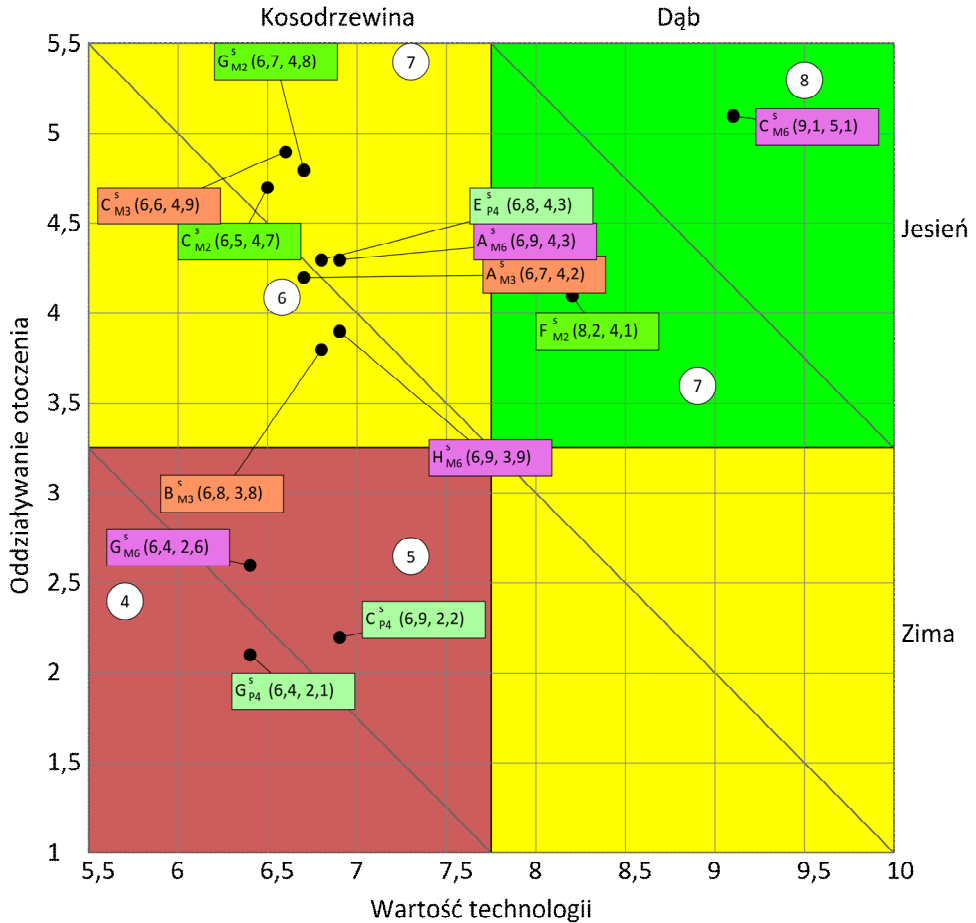
Rysunek 3.7a. Górna prawa ćwiartka macierzy strategii dla technologii prezentująca wyrażone ilościowo perspektywy rozwojowe poszczególnych grup technologii krytycznych i wskazująca strategię rekomendowaną do zastosowania w odniesieniu do tych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych A_{P4} - J_{P4} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego P4, technologii krytycznych fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) A_{M2} - J_{M2} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M2, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologii krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6 [84]

będzie zmagać się z licznymi trudnościami płynącymi z otoczenia, związanymi z silną konkurencją ze strony 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.



Rysunek 3.7b. Górna lewa ćwiartka macierzy strategii dla technologii prezentująca wyrażone ilościowo perspektywy rozwojowe poszczególnych grup technologii krytycznych i wskazująca strategię rekomendowaną do zastosowania w odniesieniu do tych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych A_{P4} - J_{P4} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego P4, technologii krytycznych fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) A_{M2} - J_{M2} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M2, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologii krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6 [84]

Wśród nowoczesnych metod inżynierii powierzchni, zmierzających do udoskonalania materiałów narzędziowych, istotną rolę odgrywają nowoczesne metody fizycznego osadzania powłok z fazy gazowej (PVD), o szerokich perspektywach rozwojowych, wykorzystujące zjawiska fizyczne, takie jak odparowanie metali albo stopów lub rozpylanie katodowe w próżni i jonizację gazów i par metali z wykorzystaniem różnych procesów fizycznych. Wspólną ich



Rysunek 3.7c. Dolna prawa ćwiartka macierzy strategii dla technologii prezentująca wyrażone ilościowo perspektywy rozwojowe poszczególnych grup technologii krytycznych i wskazująca strategię rekomendowaną do zastosowania w odniesieniu do tych grup technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałowych narzędziowych A_{P4} - J_{P4} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego P4, technologii krytycznych fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) A_{M2} - J_{M2} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M2, technologii krytycznych chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) A_{M3} - J_{M3} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M3, technologii krytycznych nanostrukturalnych warstw wierzchnich A_{M6} - J_{M6} wytypowanych w ramach obszaru tematycznego M6 [84]

cechą jest krystalizacja par metali lub faz z plazmy. Połączenie powłoka-podłoże ma charakter dyfuzyjno-adhezyjny, o czym świadczy stężenie pierwiastków w osnowie i w powłoce, zmieniające się w strefie przejściowej o grubości 1-2 μm i jest tym silniejsze, im bardziej czysta jest powierzchnia pokrywana.

Jak wskazują wyniki badań heurystycznych [77], spośród technologii fizycznego osadzania z fazy gazowej PVD, najlepsze perspektywy rozwoju strategicznego, określone jako bardzo wysokie (9 punktów), mają 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. Do atrakcyjnych technologii o ograniczonym potencjale należy impulsowe osadzanie laserowe J_{M2}^s (4,6; 8,4), które 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 działa 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.

Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (CVD) ma również duże znaczenie wśród rozwojowych technologii poprawy własności użytkowych narzędzi. Chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej polega na tworzeniu warstw węglików i azotków metali, np. chromu,

wanadu, tytanu, tantalum lub cyrkonu, ze składników atmosfery gazowej, na powierzchni obrabianego przedmiotu. W procesie tworzenia warstwy biorą udział składniki podłoża. Wysoka temperatura konieczna do przebiegu reakcji chemicznych znacznie ogranicza zakres stosowania metody CVD głównie do nanoszenia warstw na płytki z węglików spiekanych lub spiekanych materiałów ceramicznych, dla których wysoka temperatura procesu nie powoduje utraty ich własności, natomiast nie może być stosowana do narzędzi wytwarzanych ze stali np. szybkoobrotowych lub stali narzędziowych do pracy na zimno i na gorąco.

Najlepsze pozycje strategiczne, ocenione każdorazowo na 9 punktów w dziesięciopunktowej skali, w grupie technologii polegających na chemicznym osadzaniu powłok z fazy gazowej CVD, zajmują następujące metody [77]: 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 wzmocnieniu. Wskazane jest również doinwestowywanie tej atrakcyjnej technologii połączone z wykorzystywaniem licznych sposobności płynących z mikro- i makrootoczenia. Dość wysokimi perspektywami rozwojowymi (7 punktów) charakteryzują się również technologie osadzania powłok z fazy gazowej aktywowanego wiązka 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, wzmocniając 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 przewidywalnym

otoczeniu, z wykorzystaniem solidnych, dobrze poznanych technologii o dużym potencjale, które należy unowocześniać i intensywnie promować w celu wzmocnienia ich atrakcyjności. Średnią (5 punktów) pozycję strategiczną ma, znajdująca 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 przewyciężenia 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.

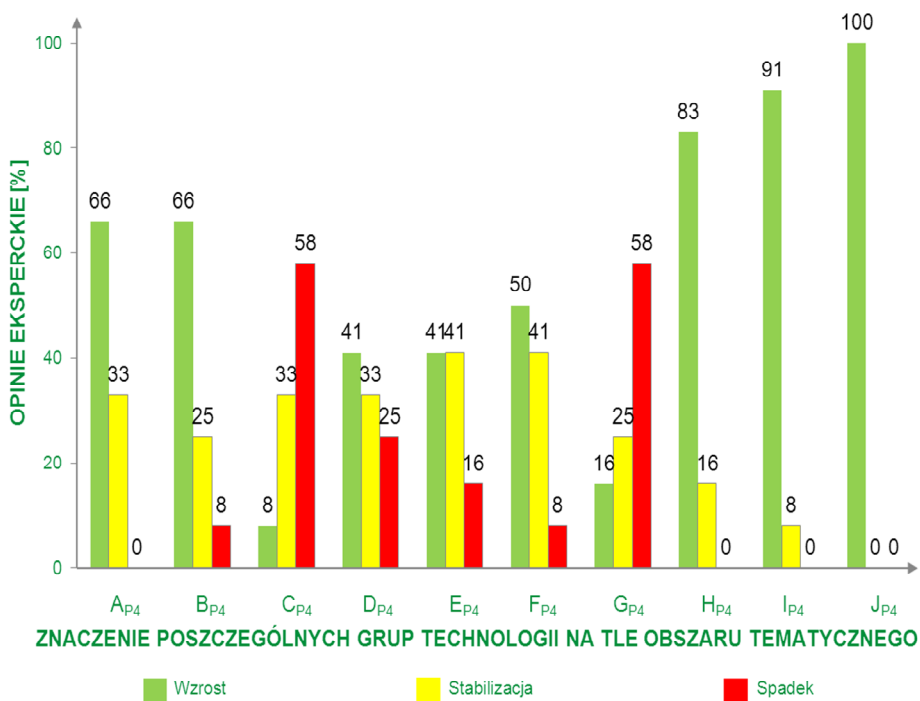
Powłoki o strukturze nanokrystalicznej, o wysokiej twardości i odporności na ścieranie, ale także o zwiększonej odporności korozyjnej, otrzymywane w wyniku osadzania cząstek lub atomów stanowią jedną z czterech grup materiałów nanostrukturalnych, obejmujących ponadto materiały masywne, materiały otrzymywane przez generowanie dużej liczby defektów struktury krystalicznej oraz materiały otrzymywane jako izolowane cząstki nanometryczne, mogą również znaleźć szerokie zastosowanie w produkcji narzędzi. Z tego względu rozpatrzono je również w niniejszej książce. Nanotechnologia, obejmująca procesy projektowania, badania, wytwarzania oraz zastosowania struktur, urządzeń oraz układów, poprzez kontrolę ich kształtu i rozmiaru w skali atomowej lub cząsteczkowej, wykazując co najmniej jeden wymiar o skali nanometrycznej, tj. 10^{-9} m, najczęściej 0,1-100 nm. Nanotechnologia jest bardzo dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki, a ze względu na kluczowy wpływ na globalny poziom cywilizacyjny jej dalszy rozwój jest nieunikniony.

Analiza heurystyczna, przeprowadzona w odniesieniu do technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów sklasyfikowanych jako technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich [3], wykazała, że wybitnie wysoką pozycję strategiczną (10 punktów) mają technologie: 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) otrzymanie 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 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.

Wsparto się również zestawionymi w postaci wykresów (rys. 3.8-3.11) 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 szare odpowiadają, wyrażonemu procentowo, przewidywanemu wzrostowi znaczenia danej grupy technologii, jasnoszare – stabilizacji na dotychczasowym poziomie, a grafitowe – spadkowi znaczenia grupy technologii na tle pozostałych grup technologii danego obszaru tematycznego. Na wykresach zawierających zestawienia statystyczne wielokrotnie pojawia się udział ekspertów, którzy potwierdzili prawdziwość postawionej tezy, który każdorazowo wyrażono procentowo i podano w nawiasach.



Rysunek 3.8. Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego P4: Inżynieria powierzchni materiałów narzędziowych [85]

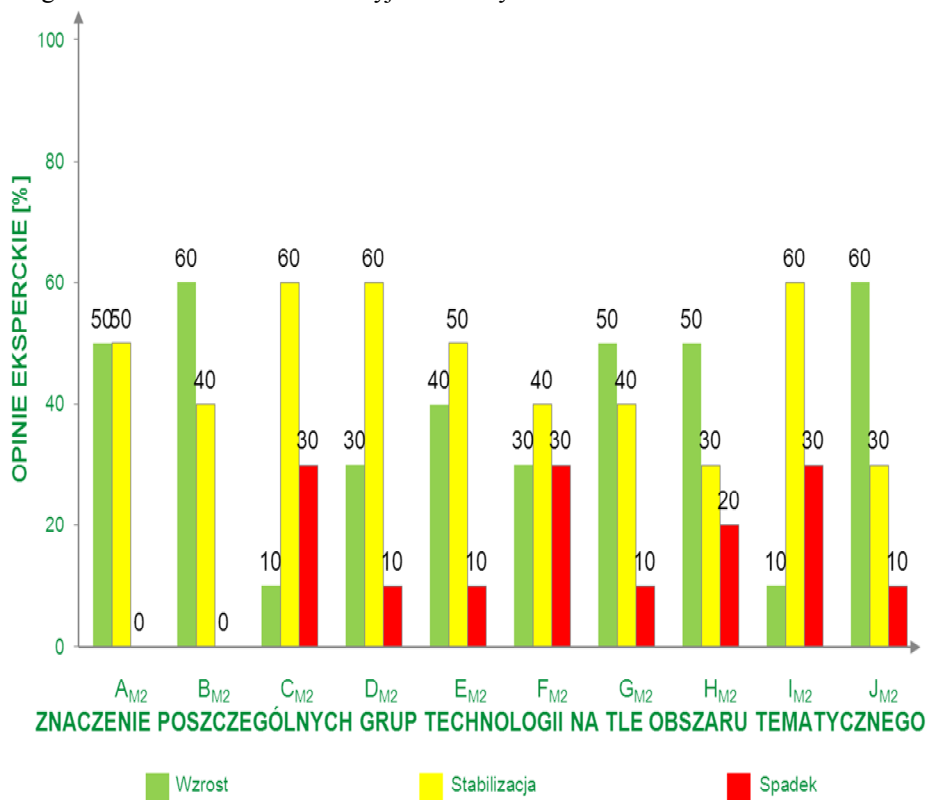
Zestawione statystycznie wyniki badań eksperckich [77] posłużyły do utworzenia ścieżek rozwoju strategicznego technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych. Przyszłe znaczenie większości analizowanych w ramach tego obszaru tematycznego

grup technologii będzie rosnać, co odpowiada bardzo dobrej pozycji całego obszaru na tle inżynierii powierzchni materiałów ogółem. Najszybszy postęp, zgodnie z opracowanymi prognozami, towarzyszyć będzie impulsowemu osadzaniu laserowemu (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 (odpowiednio PVD i CVD). Równocześnie obserwowana będzie powolna degradacja rozwiązań najbardziej tradycyjnych – natryskiwania C_{P4} (58%) i napawania G_{P4} (58%).

Wyniki badań eksperckich w postaci wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych analizowanych zjawisk, otrzymane w procesie ankietyzacji ekspertów metodą e-Delphix, stanowiły zmienne wejściowe, które posłużyły do trenowania sieci neuronowych. Zmienne wyjściowe są natomiast generowane w postaci różnych wykresów prezentujących zależności pomiędzy wartościami prawdopodobieństwa poszczególnych makroscenariuszy a podlegających poszczególnym trendom pozostałych czynników analizy [85]. Wyniki wykonanych eksperymentów symulacyjnych wskazują na pewny i szybki rozwój m.in. technologii inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych ($P4$), o czym świadczą najwyższe maksymalne wartości trendu wzrostowego dla tych obszarów w przypadku zaistnienia z 30% prawdopodobieństwem optymistycznego scenariusza przyszłych wydarzeń. Prawdopodobieństwo wystąpienia trendu spadkowego tego obszaru określono jako zerowe.

W niniejszym rozdziale dokonano również statystycznej oceny wyników badań eksperckich [77] służących do utworzenia ścieżek rozwoju strategicznego wybranych technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów narzędziowych. Spośród **technologii fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD)** w obszarze tematycznym $M2$, jak wskazują wyniki badań heurystycznych [85], najlepsze perspektywy rozwoju strategicznego, określone jako bardzo wysokie (9 punktów), mają 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 impulsowe osadzanie laserowe (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 działa 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.



Rysunek 3.9. Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M2: Technologie PVD [85]

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 klastrow (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.

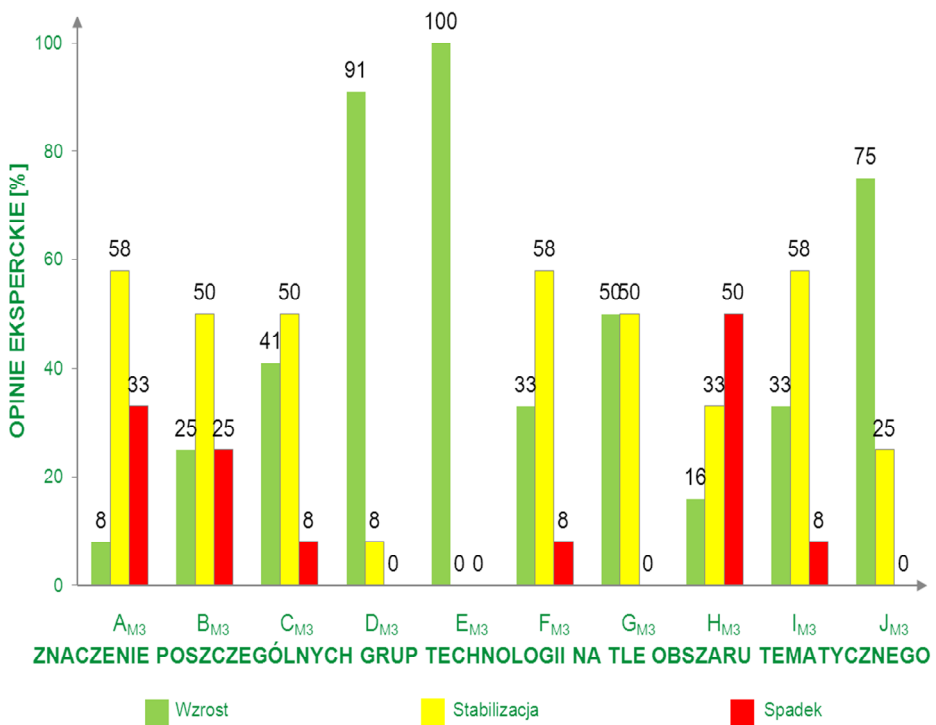
W grupie technologii fizycznego osadzania z fazy gazowej najbardziej optymistyczne ścieżki rozwoju strategicznego, wskazujące na przyszły wzrost znaczenia tych technologii [85], charakteryzują reaktywne rozpylanie magnetronowe (RMS) B_{M2} (60%) oraz impulsowe osadzanie laserowe J_{M2} (60%). Z 50% prawdopodobieństwem wzrastać będzie znaczenie sprawdzonych i stosunkowo dobrze poznanych metod katodowego odparowania łukowego (CAD) A_{M2} i aktywnego reaktywnego naparowania przy użyciu działu elektronowego (BARE) G_{M2} , jak również znajdującego się na razie w fazie eksperymentalnej, lecz wysoce obiecującego reaktywnego nanoszenia ze zjonizowanych klastrow (ICB) H_{M2} (rys. 3.9). 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 wiązki 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).

W grupie technologii polegających na **chemicznym osadzaniu powłok z fazy gazowej CVD**, stanowiącej obszar tematyczny M_3 , najlepsze pozycje strategiczne, ocenione każdorazowo na 9 punktów w dziesięciostopniowej skali, zajmują następujące metody [85]: osadzanie powłok z użyciem prekursorów metaloorganicznych (MOCVD) $G_{M_3}^s$ (8,6; 8,5), osadzanie powłok z fazy gazowej aktywowane laserowo (LCVD) $E_{M_3}^s$ (8,7; 8,3) i plazmochemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (PACVD/ PECVD) $D_{M_3}^s$ (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) $J_{M_3}^s$ (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 makrootoczenia.

Dość wysokimi perspektywami rozwojowymi (7 punktów) charakteryzują się również technologie osadzania powłok z fazy gazowej aktywowanego wiązką promieni UV (Photo CVD) $F_{M_3}^s$ (4,4; 4,5) i pod obniżonym ciśnieniem (LPCVD) $C_{M_3}^s$ (6,6; 4,9). W odniesieniu do wzrostowej technologii F_{M_3} 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_{M_3} , podobnie jak inne technologie bazowe o umiarkowanych perspektywach rozwoju (6 punktów), obejmujące klasyczne wysokotemperaturowe chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej (HFCVD) $A_{M_3}^s$ (6,7; 4,2) i osadzanie ich pod ciśnieniem atmosferycznym (APCVD) $B_{M_3}^s$ (6,8; 3,8), znalazła się w polu kosodrzewiny jesienią.

W odniesieniu do technologii C_{M_3} , A_{M_3} i B_{M_3} 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. Średnią (5 punktów) pozycję strategiczną ma, znajdująca się na eksperymentalnym etapie rozwoju, charakteryzująca się dużą atrakcyjnością, chemiczna infiltracja z fazy gazowej (CVI) $I_{M_3}^s$ (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.



Rysunek 3.10. Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M3: Technologie CVD [85]

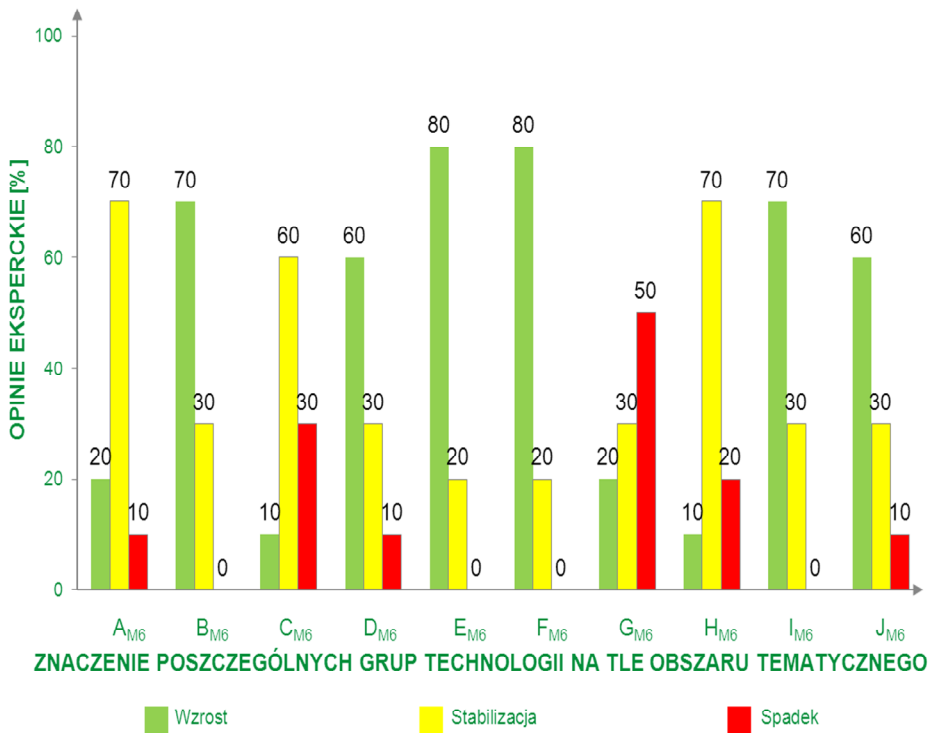
Przeprowadzona, na podstawie zestawienia statystycznego (rys. 3.10), analiza przyszłych ścieżek rozwoju strategicznego [85] technologii polegających na chemicznym osadzeniu powłok z fazy gazowej wskazuje jednoznaczne tendencje wzrostowe charakteryzujące chemiczne osadzanie powłok z fazy gazowej aktywowane 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.

Analizę heurystyczną, z wykorzystaniem danych źródłowych pozyskanych w drodze elektronicznej ankietyzacji ekspertów metodą e-Delphix, przeprowadzono także [85] w odniesieniu do technologii krytycznych inżynierii powierzchni materiałów sklasyfikowanych jako **technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich**, objęte obszarem badawczym $M6$, które również mogą być wykorzystywane w produkcji narzędzi, w tym skrawających, 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. Najślabszą pozycję, wśród 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.



Rysunek 3.11. Prognozowane trendy zmian znaczenia poszczególnych grup technologii krytycznych na tle obszaru tematycznego M6: Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich [85]

Zestawienia statyczne (rys. 3.11), sporządzone na podstawie wyników badań ankietowych [85], 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.

Wymienione wyniki badań foresightowych wskazują, że warstwy powierzchniowe nanoszone m.in. technologiami PVD i CVD wykazują duży potencjał rozwojowy, co uzasadnia intensywne badania prowadzone w tym zakresie. Wyniki dokonanych analiz, opisanych uprzednio mogą stanowić podstawę do prac zmierzających do wdrożenia wymienionych technologii krytycznych m.in. w produkcji narzędzi skrawających z materiałów spiekanych. Możliwość wykorzystania najbardziej perspektywicznych spośród tychże technologii krytycznych daje niewątpliwie szanse poprawy własności użytkowych analizowanej grupy materiałów narzędziowych. Najbardziej sprawdzone spośród tych technologii omówiono w dalszej części niniejszej książki.