

# 1. Ogólna charakterystyka tendencji rozwojowych inżynierii materiałowej i metod kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich

## 1.1. Znaczenie rozwoju inżynierii materiałowej dla gospodarki opartej na wiedzy i innowacyjności

Jednym z zadań wynikających z wytycznych polityki naukowej, naukowo-technicznej i innowacyjnej Polski do 2020 roku jest **gospodarka oparta na wiedzy (GOW)**, która zasadza się na tworzeniu traktowanym jako produkcja oraz na dystrybucji i praktycznym wykorzystaniu wiedzy i informacji. Podstawą rozwoju gospodarczego są zatem produkcja, dystrybucja i wdrożenie, a wiedza będąca produktem stanowi główny przyczynek do zrównoważonego rozwoju. Bardziej efektywna, konkurencyjna i niskoemisyjna **gospodarka oparta na wiedzy i innowacyjności (GOWI)** obejmuje kompleksowe działania podejmowane w Unii Europejskiej do 2020 roku, zapewniające wysoki poziom zatrudnienia oraz spójność społeczną i terytorialną w ramach 5 celów dotyczących wzrostu poziomu zatrudnienia, wzrostu poziomu inwestycji na badania i rozwój oraz innowacje, ograniczenia negatywnych skutków zmian klimatu i lepszego wykorzystania źródeł energii, w tym odnawialnych, wzrostu poziomu edukacji oraz redukcji ubóstwa i wykluczenia społecznego. Innowacje rozumiane jako cenne, nowatorskie pomysły stanowią istotę projektu Unia Innowacji (j. ang.: *Innovation Union*) Komisji Europejskiej, dotyczącego koncentracji na innowacjach, jako metodzie rozwiązania najważniejszych wyzwań strategii Europa 2020. Z tego względu poziom inwestycji na badania i rozwój oraz innowacje do 2020 roku powinien osiągnąć 3% PKB UE łącznie ze środków publicznych i prywatnych, a strumień inwestycji powinien być skierowany na dziedziny nauki i gałęzie przemysłu przynoszące największą wartość dodaną. Dotyczy to w głównej mierze małych i średnich przedsiębiorstw obejmujących w Polsce 99,8% wszystkich przedsiębiorstw wytwarzających 68% PKB. Polityka Spójności Unii Europejskiej promuje więc przedsiębiorstwa, zwłaszcza małe i średnie, jako systemy innowacyjne, edukacyjne i informacyjno-komunikacyjne, świadomie zarządzające wiedzą, jako zasobem strategicznym z uwzględnieniem oddziaływania otoczenia. W strategii Europa 2020 Unia Europejska określiła [1-3], że rozwój kontynentu będzie inteligentny, sprzyjający włączeniu społecznemu i zrównoważony (rys. 1), pomimo obecnej trudnej sytuacji gospodarczej i towarzyszącymi jej problemami dotyczącymi zmian klimatu, wzrostu zużycia i wyczerpywania się tradycyjnych źródeł energii, bezpieczeństwa żywności, służby zdrowia i postępującego starzenia się społeczeństwa.



*Rysunek 1. Schematyczna prezentacja priorytetów i celów Strategii „Europa 2020” Unii Europejskiej [4]*

Wśród podstawowych programów i inicjatyw Unii Europejskiej realizowanych w ramach współpracy międzynarodowej dla osiągnięcia wymienionego stanu jest **7. Program Ramowy Wspólnoty Europejskiej na lata 2007-2013** (7. PR) w zakresie badań, rozwoju technologicznego i wdrożeń, a także przygotowywany już **8. Program Ramowy Wspólnoty Europejskiej na kolejne lata począwszy od roku 2014** (FP8 [5]). W 8. Programie Ramowym Wspólnoty Europejskiej na kolejne lata, począwszy od roku 2014, przewiduje się 4 główne zadania. **GLOBAL CHALLENGES** (Wyzwania globalne), takie jak energia, zmiany klimatu, zapewnienie żywności i kilka innych, wymagają nowego, strategicznego podejścia do współpracy międzynarodowej oraz włączenia innych krajów i regionów w ramach umów bilateralnych i wielonarodowych. **INNOVATION** (Innowacje) jako kontynuowany priorytet wywiera znaczący wpływ poprzez projekty obejmujące współpracę między przedsiębiorstwami, instytucjami badawczymi oraz Uniwersytetami. **FRONTIER RESEARCH AND MOBILITY** (Granice poznania i mobilność) ma sprzyjać dalszemu umacnianiu pozycji środowiska naukowo-badawczego i efektywności badań naukowych i prac innowacyjnych przez wymianę osobową, staże naukowe i wspieranie rozwoju karier naukowych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na równe szanse kobiet i mężczyzn. **SUPPORT** (Wspieranie) to priorytet służący rozwojowi

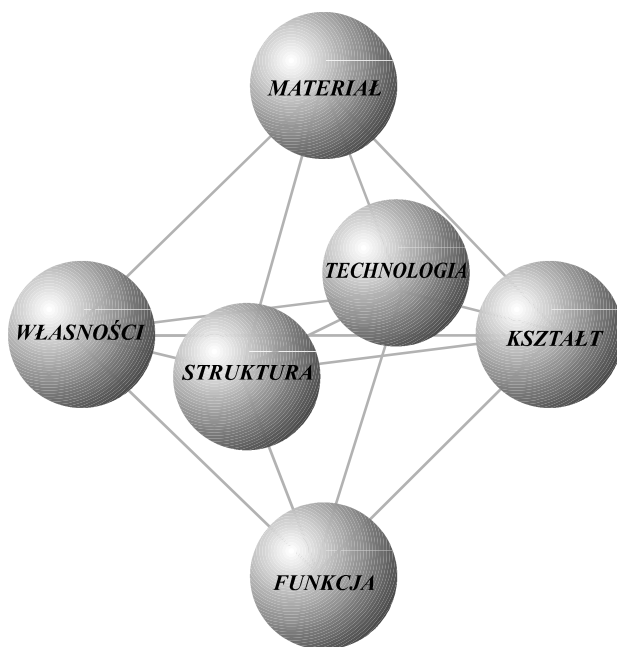
Europejskiej Przestrzeni Badawczej poprzez transfer wiedzy, wspieranie karier badawczych i współpracę międzynarodową dla wspierania odpowiednio innowacji, mobilności kadrowej i sprostania wyzwaniom globalnym. Program Ramowy PR8 wymaga skupienia uwagi na kluczowych priorytetach zarówno globalnych, jak i europejskich i należy się spodziewać, że znajdą się wśród nich zmiany klimatu, bezpieczeństwo energetyczne, odnawialne źródła energii, bezpieczeństwo żywnościowe, bioekonomia bazująca na naukach o życiu, gospodarka morską, nauki społeczne, wspieranie polityki spójności i ochrony zdrowia i życia ludzkiego.

W ramach ciągle aktualnego 7. Programu Ramowego Wspólnoty Europejskiej na lata 2007-2013, wzmacnianie potencjału badawczego Europy, tworzenie regionów wiedzy, budowanie infrastruktury badawczej, a także spójny rozwój polityk badawczych oraz działania w zakresie współpracy międzynarodowej wyznaczają zakres programu szczegółowego **CAPACITIES** (Możliwości) 7. PR o zasadniczym znaczeniu dla konkurencyjności i utrzymania potencjału wytwórczego Unii Europejskiej, niezbędnego wzmocnienia badań przemysłowych, oraz wprowadzania nowych rozwiązań dla doskonaleniu istniejącego potencjału wytwórczego. Program szczegółowy **IDEAS** (Pomysły) 7. PR zakłada wspieranie najbardziej twórczych, interdyscyplinarnych badań naukowych na granicy wiedzy (j. ang.: *frontier research*). Do sił napędowych (j. ang.: *drivers*) rozwoju nowych technologii, określonych przez Komisję Europejską należy presja na rozwój nowych technologii, intensyfikacja popytu na nowe materiały i procesy produkcyjne oraz spełnianie zasad zrównoważonego rozwoju. Szanse sukcesu mają głównie zespoły i laboratoria interdyscyplinarne, w skład których wchodzi specjaliści wielu dziedzin. Efekty innowacyjne i związane z tym konkurencyjność wytwórców produktów na rynkach międzynarodowych zależne są oczywiście od przyjętej strategii rozwojowej technologii. Brak możliwości konkurowania przez Unię Europejską z krajami rozwijającymi się o relatywnie taniej sile roboczej, wymusza wybór strategii integracji różnych zaawansowanych dziedzin nauki i technologii oraz osiągania efektów synergicznych w opracowywaniu nowych technologii, w tym materiałowych i dotyczących kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich, czego skutkiem z pewnością będzie generowanie nowych miejsc pracy dla wysoko wykwalifikowanych kadr. Obszar merytoryczny badań określonych w 7. PR dotyczący głównej linii rozwojowej inżynierii materiałowej i metod wytwarzania objęty jest tematem „*Nanonauki, nanotechnologie, materiały i nowe technologie produkcyjne*” programu szczegółowego **COOPERATION** (Współpraca) 7. PR i dobrze wpisuje się w politykę europejską budowania konkurencyjnej Europy.

Technologie procesów materiałowych i nowe materiały stanowią kluczowy zakres badawczo-rozwojowy B+R, o zasadniczym znaczeniu dla przemysłu oraz innych obszarów zastosowań tych technologii. Do określenia tychże programów szczegółowych 7. PR w zakresie materiałów i metod wytwarzania wykorzystano wyniki badań wykonanych w ramach Foresightu technologicznego Europy w 5. i 6. Programach Ramowych Wspólnoty Europejskiej i ogłoszonych w raportach z realizacji projektów *The Future of Manufacturing in Europe (FutMan)* [6] oraz *Manufacturing Visions The Futures Project (ManVis)* [7]. Uogólnieniem wyników Foresightu europejskiego na różne nowe materiały i różne technologie procesów materiałowych jest oczekiwanie na wytwarzanie materiałów o własnościach zamówionych przez użytkowników produktów. Zasadniczo zmienia to **metodologię projektowania materiałowego** w ogólności oraz projektowania materiałowego produktów, gdyż na żądanie wytwórców należy dostarczać materiały o odpowiednio ukształtowanej strukturze gwarantującej wymagany zespół własności fizykochemicznych, a nie jak poprzednio z dostarczonych materiałów o oferowanych strukturze i własnościach wytwórca mogli dokonywać wyboru materiału najbardziej zbliżonego do oczekiwań. Prognozy europejskie wymuszają zatem klasyfikację materiałów inżynierskich ze względu na **charakterystyki funkcjonalne**. Wobec tego mniej istotny jest rodzaj użytego materiału, a ważniejsza jest jego funkcjonalność. W raportach projektu FutMan ujawniono zmianę w ocenie roli materiałów inżynierskich, które nie mogą być nadal postrzegane jako towary same w sobie, o poszukiwanych dla nich zastosowaniach, a rynek nowych materiałów inżynierskich nie może pozostawać w dalszym ciągu rynkiem producenta. Nowe materiały inżynierskie i procesy wytwarzania są bowiem podporządkowane potrzebom klienta i funkcjom użytkowym produktów. Wytwarzanie **materiałów spełniających potrzeby wytwórców** produktów rynkowych w odpowiednim czasie i miejscu (j. ang.: *materials on demand*) stanowi priorytet nowych technologii materiałowych i procesów wytwarzania. Z tak zmienioną metodologią projektowania materiałowego wiążą się liczne działania określone w tym Foresighcie europejskim, związane z modelowaniem i symulacją procesów wytwarzania oraz predykcją własności eksploatacyjnych materiałów, opracowaniem bezpiecznych technologii materiałów i produktów złożonych z elementów nanostrukturalnych, normalizacją badań własności materiałów zwłaszcza nanostrukturalnych, opracowaniem metodyki predykcji zachowań nowych materiałów podczas eksploatacji.

Wymienione zagadnienia stanowią istotę **nauki o materiałach i inżynierii materiałowej**. Nauka o materiałach jest dziedziną nauki, dotyczącą struktury i własności materiałów

(tworzyw), zwłaszcza z uwzględnieniem możliwości ich zastosowania. Inżynieria materiałowa jest z kolei dziedziną inżynierii, obejmującą zastosowanie nauki o materiałach (tworzywach) dla bezpośrednio użytecznych celów związanych z projektowaniem, wytwarzaniem i użytkowaniem różnych produktów i dóbr powszechnego użytku. Liczne aspekty nauki o materiałach i inżynierii materiałowej oraz projektowania inżynierskiego produktów, obejmującego projektowanie konstrukcyjne, projektowanie materiałowe i projektowanie technologiczne, w szerokim zakresie obejmujące m.in. technologie obróbki powierzchni materiałów inżynierskich, opisano w licznych poprzednich pracach własnych [8-17].



**Rysunek 2.** Schemat wzajemnych zależności między doбором materiału, kształtem i cechami geometrycznymi produktu, jego procesem technologicznym, strukturą i własnościami materiału oraz funkcjami użytkowymi produktu [14]

Właściwy dobór materiału (rys. 2) do danego zastosowania w oparciu o wielokryterialną optymalizację związaną zarówno ze składem chemicznym, warunkami wytwarzania, warunkami eksploatacji oraz sposobem usuwania odpadów materiałowych w fazie użytkowej, jak również uwarunkowania cenowe związane z pozyskaniem materiału, jego przetworzeniem w produkt, samym produktem, a także kosztami usuwania odpadów poprodukcyjnych i poeksploatacyjnych, jak również modelowanie wszystkich procesów i własności związanych

z materiałami stoją u podstaw inżynierii materiałowej. Własności użytkowe produktu są uzyskiwane tylko wtedy, gdy zostanie użyty właściwy materiał wytworzony w odpowiednio dobranym procesie technologicznym nadającym zarówno wymagany kształt i inne cechy geometryczne, w tym tolerancje wymiarowe poszczególnych elementów, umożliwiające końcowy montaż produktu, jak również kształtujące wymaganą strukturę materiału, zapewniającą oczekiwane własności mechaniczne, fizyczne i chemiczne, a ponad wszystko umożliwiające wypełnienie jego funkcji użytkowych [8-14]. Stanowi to paradygmat inżynierii materiałowej.

W europejskim Foresighcie technologicznym przewiduje się komplementarne technologie **bazowe** (doskonalenie istniejących rozwiązań), **alternatywne** (wykorzystujące synergię różnych rozwiązań) i **oryginalne** (opracowywanie nowych rozwiązań). Do głównych zadań w tym zakresie zaliczono aplikacje osiągnięć nanonauki i nanotechnologii jako technologii przyszłościowych (j. ang.: *emerging technologies*), ze względu na przewidywane możliwości opracowywania nowych materiałów inżynierskich dla oczekiwanych zastosowań, jak również uproszczenie procesów przetwórstwa materiałów inżynierskich. W projekcie FutMan przewidziano alternatywne możliwości rozwoju nowych procesów wytwarzania w odniesieniu do nowych materiałów inżynierskich przez **specjalizację** (doskonalenie istniejących technologii materiałowych przez osiągnięcie jednej z podstawowych ich funkcji), **konwergencję** (uzyskanie założonych cech użytkowych przez powiązanie ze sobą różnych typów materiałów inżynierskich) oraz **integrację** (wytwarzanie materiałów wielofunkcyjnych przy wykorzystaniu wiedzy z wielu dziedzin nauki i technologii dla spełnienia wymagań użytkowników i przetwórców materiałów).

## 1.2. Badania foresightowe dotyczące metod kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich

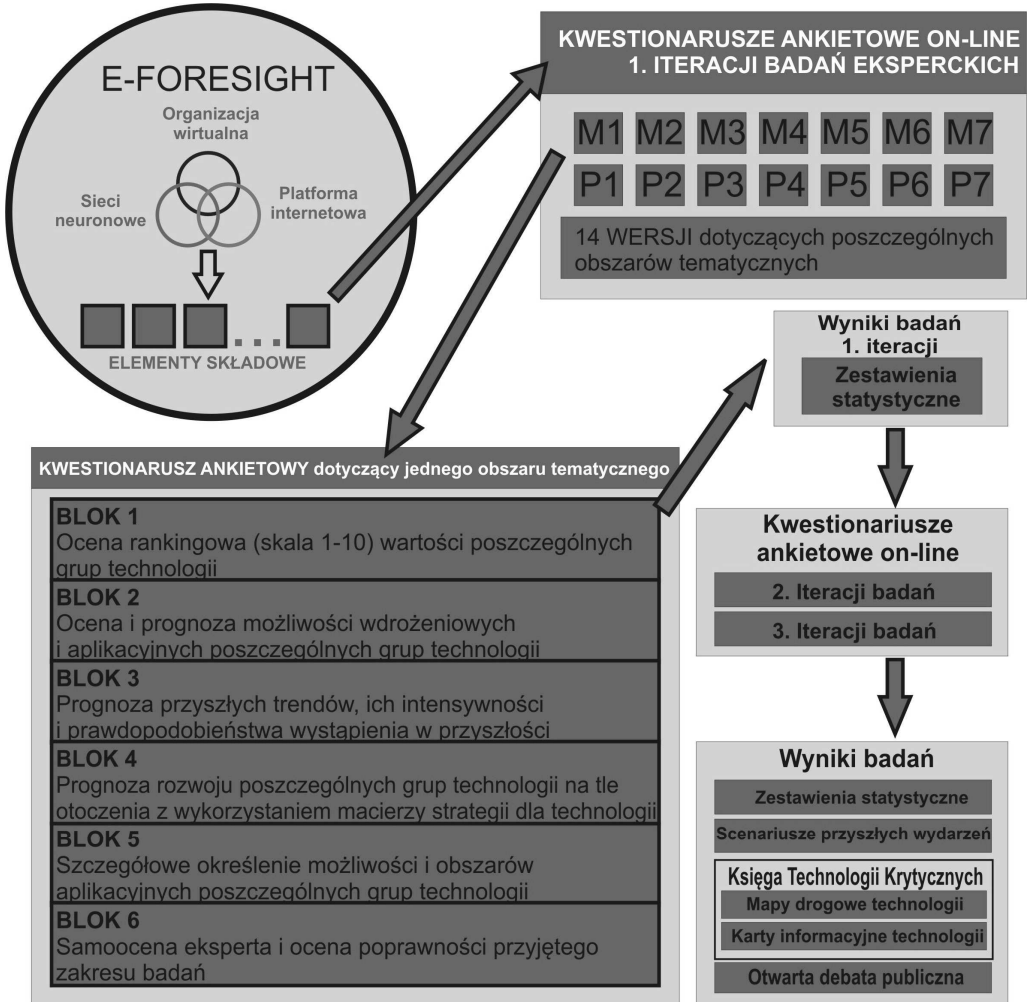
Poszukiwaniu innowacyjnych obszarów zasługujących na wsparcie finansowe służą wykonywane w ostatnim dziesięcioleciu i nadal kontynuowane na szeroką skalę za granicą [6,18,19] i w Polsce [4,17,20-26] badania foresightowe, realizowane z udziałem wysokiej klasy ekspertów o międzynarodowym znaczeniu, jako ważne źródła diagnoz kluczowych problemów naukowych, technologicznych, gospodarczych i ekologicznych oraz instrumenty prognozowania i podejmowania decyzji przez władze krajowe zarządzające nauką, środowiska biznesowe oraz instytucje administracji publicznej. Badania foresightowe odniesione do inżynierii materiałowej umożliwiają m.in. identyfikację priorytetowych innowacyjnych technologii inżynierii

powierzchni materiałów i określenie kierunków ich rozwoju strategicznego, których rozpowszechnianie i towarzysząca temu debata publiczna i wzrost świadomości przedsiębiorców w analizowanym zakresie w realny sposób przekładają się na statystyczny wzrost jakości technologii implementowanych w przemyśle, zrównoważony rozwój oraz wzmocnienie gospodarki opartej na wiedzy i innowacji. W niniejszej publikacji, która jest kolejnym wydaniem opracowania, od którego rozpoczęto uprzednio wykonane badania [22] foresightowe i materiałoznawczo-foresightowe, przedstawiono ogólny pogląd dotyczący stanu technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich, w tym biomedycznych na podstawie **analizy podstawowych danych literaturowych i uprzednio wykonanych badań własnych** [4,17,20,21]. Analiza informacji publicznych dotyczących finansowania badań ze środków publicznych, wskazuje że tematyka inżynierii powierzchni stanowi zauważalną część finansowanych projektów badawczych. Finansowano również poważniejsze projekty o zbliżonej tematyce, między innymi projekt zamawiany dotyczący materiałów gradientowych oraz projekt FOREMAT [24], którego głównym celem było opracowanie scenariuszy rozwoju technologii materiałów metalowych, ceramicznych i kompozytowych w Polsce, przy zastosowaniu najnowszych osiągnięć metodologii foresight, a także projekt ROTMED [27] dotyczący monitorowania i scenariuszy rozwoju technologii medycznych w Polsce. Projekty badawcze z natury rzeczy dotyczyły szczegółowych aspektów związanych ze zjawiskami i mechanizmami zachodzącymi w różnych materiałach w wyniku lub w trakcie obróbki powierzchniowej.

W projekcie FORSURF [22], wskazano na kierunki rozwoju najkorzystniejszych rozwiązań technologicznych dotyczących kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych produktów i ich elementów wytworzonych z materiałów inżynierskich i biomedycznych, uznanych jako krytyczne technologie inżynierii powierzchni materiałów, wraz ze wskazaniem ich aktualnej pozycji strategicznej i z określeniem ich perspektyw rozwojowych w ciągu najbliższych 20 lat, z uwzględnieniem oddziaływania warunków otoczenia. Technologie krytyczne inżynierii powierzchni materiałów są to priorytetowe technologie w tym zakresie, o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w założonym horyzoncie czasowym. uszeregowane w dwóch obszarach tematycznych Manufacturing (M) i Product (P), z których każdy jest podzielony na 7 zakresów tematycznych. Obszar Manufacturing (M) odzwierciedla punkt widzenia producenta i obejmuje procesy wytwarzania zdefiniowane stanem wiedzy i możliwościami produkcyjnymi parku maszynowego. W ramach

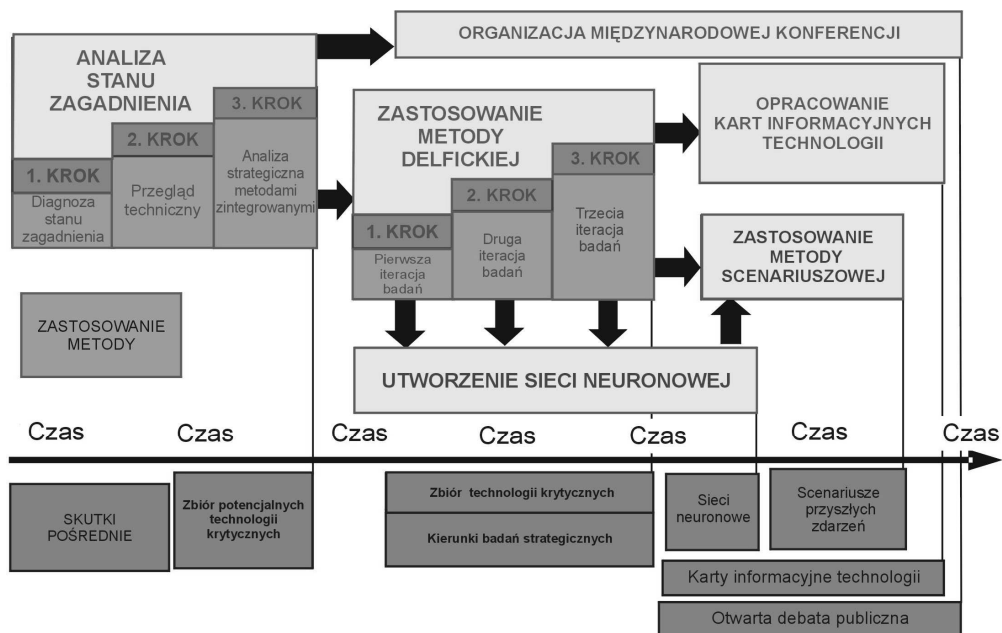
obszaru Manufacturing (M) wyróżniono następujące zakresy tematyczne: technologie laserowe w inżynierii powierzchni, technologie PVD, technologie CVD, technologie ciepłno-chemiczne, technologie polimerowych warstw wierzchnich, technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich, inne technologie inżynierii powierzchni. Obszar Product (P) jest zdefiniowany przez oczekiwane własności funkcjonalno-użytkowe wynikające z potrzeb klienta i koncentruje się na produkcie oraz materiale z jakiego został on wykonany. W ramach obszaru Product (P) wyróżniono następujące szczegółowe zakresy tematyczne: inżynieria powierzchni biomateriałów, inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych, inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych, inżynieria powierzchni materiałów narzędziowych, inżynieria powierzchni stali dla przemysłu motoryzacyjnego, inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych, inżynieria powierzchni materiałów polimerowych. Wyniki projektu FORSURF [22] są użyteczne dla szerokiego grona beneficjentów – przedstawicieli świata nauki, gospodarki, administracji publicznej i studentów. Przyjęta w projekcie **metodyka i narzędzia badawcze** e-foresightu [4,17,28] (rys. 3) są innowacyjne, nowatorskie i eksperymentalne oraz polegają na wykorzystaniu Internetu oraz technologii informacyjnych obejmujących organizację wirtualną, platformę internetową i sieci neuronowe, w nowatorski i eksperymentalny sposób wykorzystane do przeprowadzenia analizy wpływów krzyżowych pokazujących związki pomiędzy analizowanymi trendami i wydarzeniami mogącymi się w przyszłości wydarzyć w rozważanym przedziale czasowym [29], oraz innych metod badawczych zwykle stosowanych w tego rodzaju pracach [30]. Na różnych etapach projektu FORSURF zastosowano następujące metody pracy, organizacji i zarządzania: przegląd literatury, analizę danych źródłowych, definiowanie kluczowych technologii, skanowanie środowiska, mapowanie technologii, mapowanie beneficjentów, ekstrapolację trendów, analizę SWOT, analizę STEEP, panele eksperckie, burze mózgów, warsztaty, szkice, benchmarking, analizy wielokryterialne, symulacje i modelowanie komputerowe, analizy ekonometryczne, metody statystyczne oraz wykorzystano sieci neuronowe. Badania e-foresightowe [4,21] **metodą delficką** obejmują trzy iteracje ankiet wypełnionych przez wysokiej klasy ekspertów o międzynarodowym znaczeniu oraz **metodą scenariuszową** służącą utworzeniu **trzech scenariuszy zdarzeń**: optymistycznego, neutralnego i pesymistycznego, co umożliwia właściwe sterowanie procesem kierunkowania rozwoju badanych zakresów, a także skuteczne dostosowanie jednostek sfery badawczo-rozwojowej oraz przedsiębiorstw do szybko zmieniających się wymagań otoczenia globalnego.





*Rysunek 3. Schematyczna prezentacja procesu e-foresightu [4,21])*

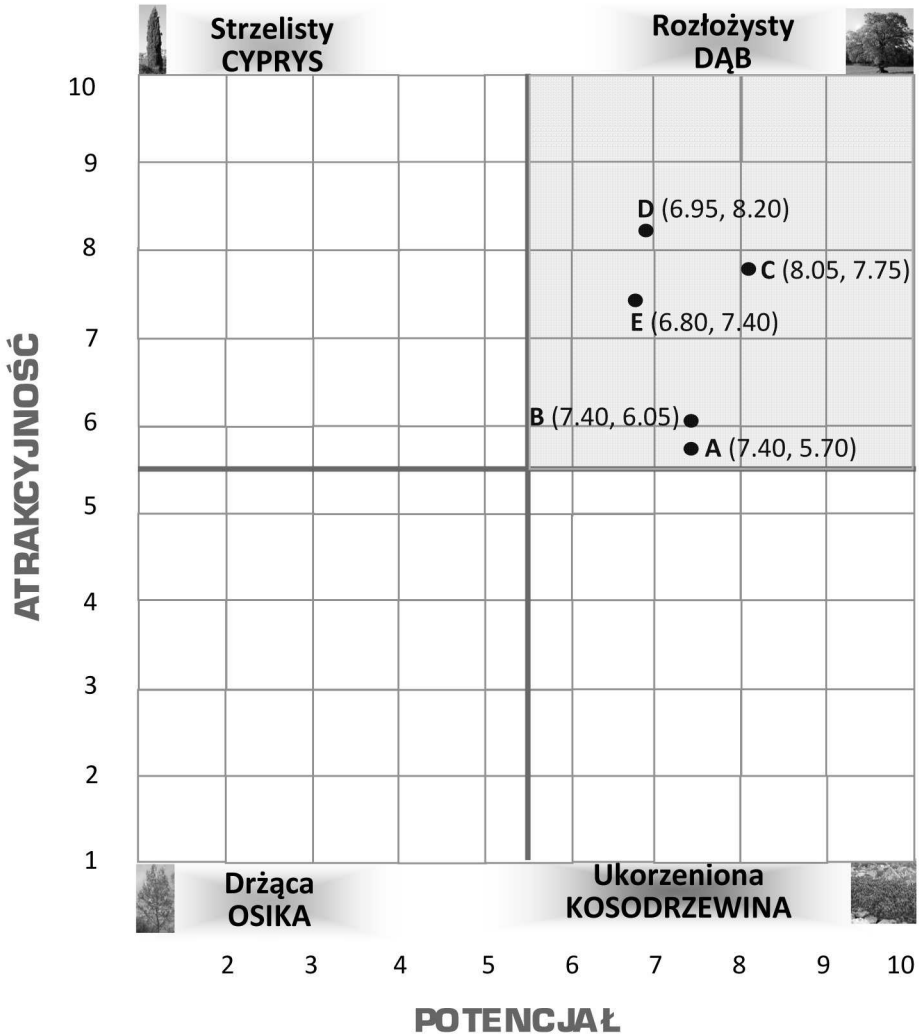
W początkowej fazie badań przeprowadzono analizę perspektyw rozwojowych ok. 500 grup technologii szczegółowych obejmującą ocenę stanu zagadnienia, przegląd technologiczny i analizę strategiczną metodami zintegrowanymi [28]. W wyniku przeprowadzonych prac wyłoniono w ramach 14 zakresów tematycznych po 10 technologii krytycznych, będących priorytetowymi technologiami inżynierii powierzchni materiałów o najlepszych perspektywach rozwojowych i/lub kluczowym znaczeniu w przemyśle w ciągu najbliższych 20 lat. Zbiór 140 technologii krytycznych poddano szczegółowej analizie w ramach trzech iteracji metody delfickiej zrealizowanej zgodnie z metodologią e-foresightu [28] (rys. 4).



**Rysunek 4.** Schemat wzajemnych oddziaływań między metodami oraz wynikami e-foresightu [4,21]

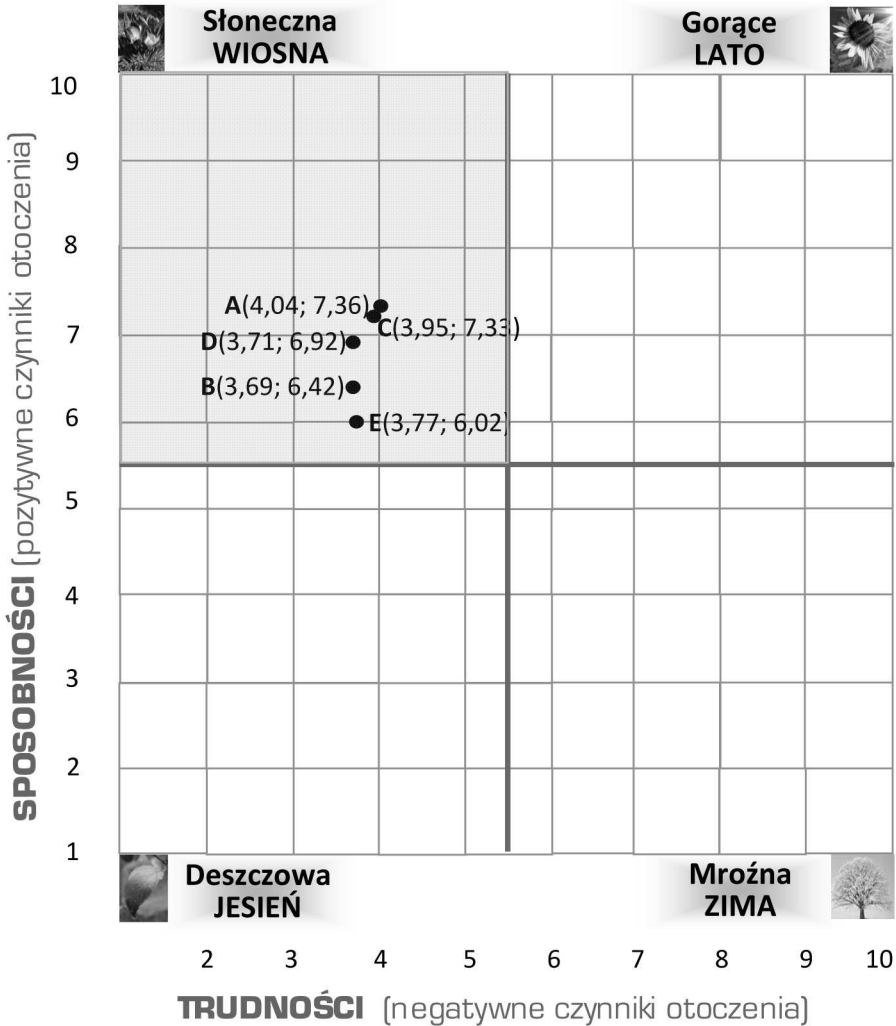
Oceny poszczególnych technologii szczegółowych dokonano natomiast na podstawie opinii ekspertów kluczowych z wykorzystaniem metodologii badań e-foresightowych podanej w pracy [4,28]. W prowadzonych badaniach zastosowano uniwersalną skalę stanów względnych będącą jednobiegunową skalę dodatnią bez zera, gdzie 1 to ocena minimalna, a 10 wybitnie wysoka.

W pierwszej kolejności spośród analizowanych technologii wyodrębniono homogeniczne grupy, które poddano ocenie pod kątem potencjału stanowiącego rzeczywistą obiektywną wartość danej grupy technologii i atrakcyjności odzwierciedlającej subiektywne postrzeżenie danej technologii przez jej potencjalnych użytkowników. Wizualizacji zobiektywizowanych wartości potencjału i atrakcyjności poszczególnych wyodrębnionych grup technologii służą dendrologiczne macierze wartości technologii [31] (rys. 5), złożone z ćwiartek, na które odpowiednio nanoszone są wyniki dokonanej oceny. Według przyjętych założeń, najlepiej rokującą ćwiartką gwarantującą przyszły sukces jest tzw. rozłożysty dąb, gdy tzw. strzelisty cyprys i ukorzeniona kosodrzewina mogą też zapewnić sukces, lecz przy odpowiednim postępowaniu, co jest jednak mało prawdopodobne lub niemożliwe w przypadku tzw. drżącej osiki.



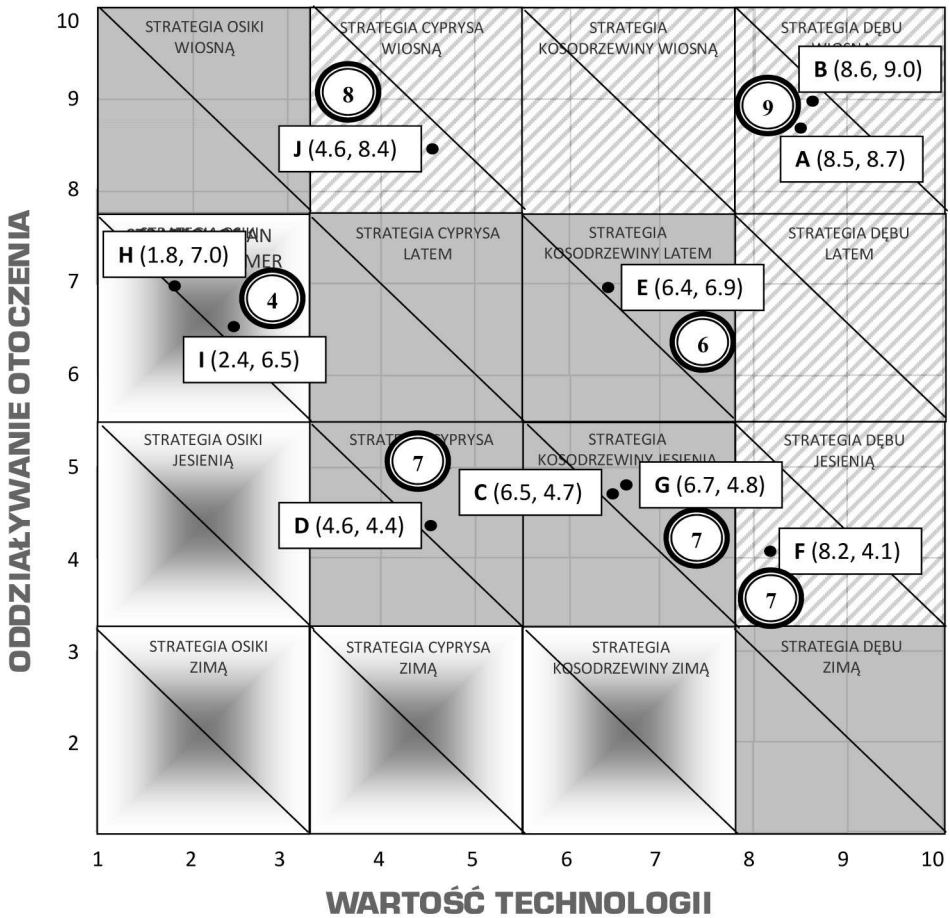
**Rysunek 5.** Dendrologiczna macierz wartości technologii sporządzona dla stali narzędziowych stopowych do pracy na gorąco stopowanych laserowo proszkami węglików, odpowiednio: (A) NbC, (B) TaC, (C) TiC, (D) VC, (E) WC [4,21,32]

Kolejna meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia [33] (rys. 6) przedstawia graficznie wyniki oceny oddziaływania zewnętrznych czynników pozytywnych (sposobności) i negatywnych (trudności) na analizowane technologie. Każda z ocenionych przez ekspertów grup technologii jest umieszczana w odpowiedniej ćwiartce macierzy. Przyszły sukces odpowiadający najkorzystniejszej sytuacji zewnętrznej gwarantuje tzw. słoneczna wiosna, natomiast sukces technologii jest obarczony ryzykiem, lecz jest możliwy w ćwiartkach



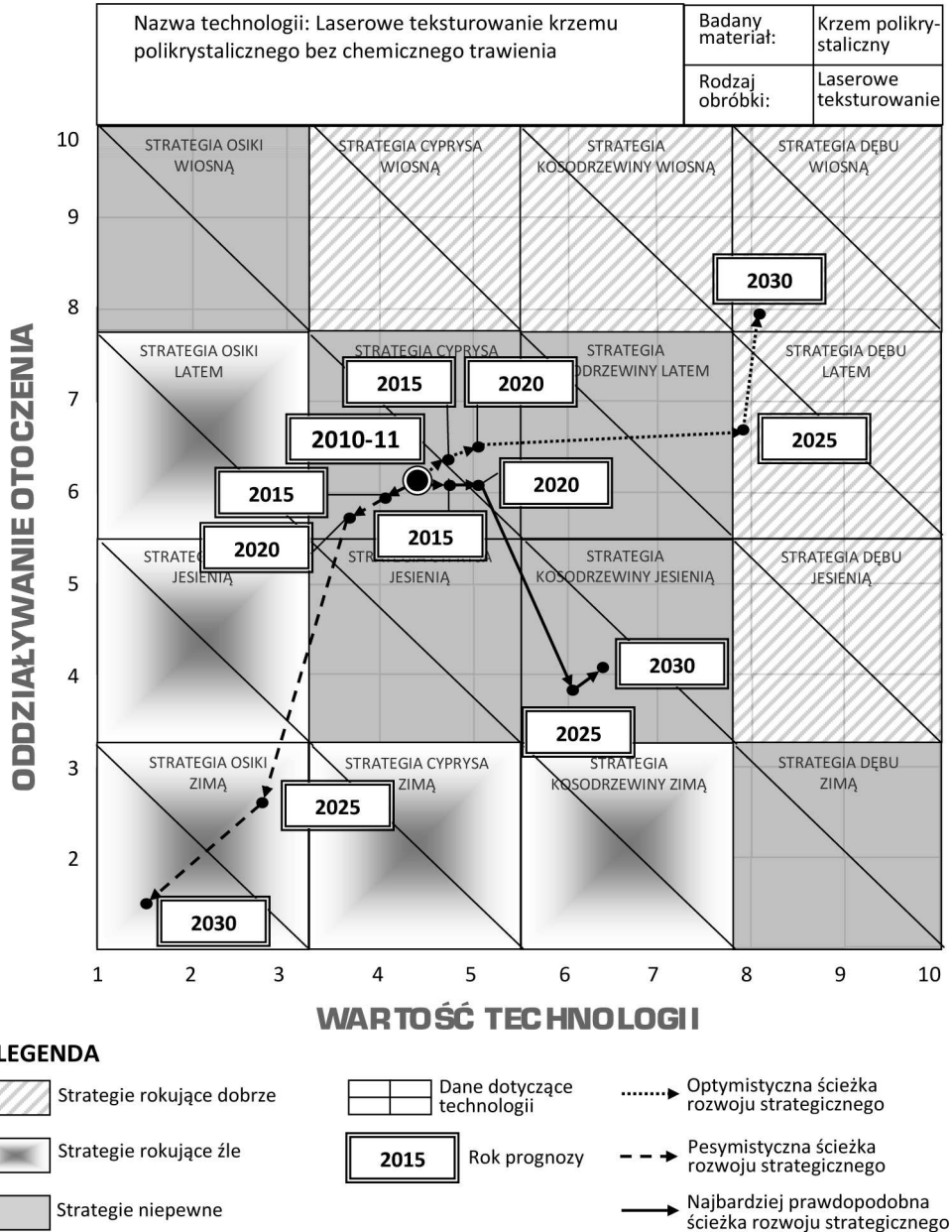
**Rysunek 6.** Meteorologiczna macierz oddziaływania otoczenia sporządzona dla odlewniczych stopów magnezu Mg-Al-Zn poddanych obróbce laserowej z użyciem proszków węglików odpowiednio: (A) TiC, (B) WC, (C) VC, (D) SiC i tlenku (E)  $Al_2O_3$  [4,21,33]

odpowiadających tzw. deszczowej jesieni dającej szansę na spokojny progres przy otoczeniu neutralnym oraz tzw. gorącemu latu przy otoczeniu burzliwym. Rozwój technologii jest natomiast trudny bądź niemożliwy do osiągnięcia przy tzw. mroźnej zimie. Opracowana w kolejnym etapie szesnastopolowa macierz strategii dla technologii [34] (rys. 7), przedstawiająca graficznie miejsce każdej grupy technologii z uwzględnieniem jej wartości i intensywności oddziaływania otoczenia i wskazująca rekomendowaną strategię postępowania,



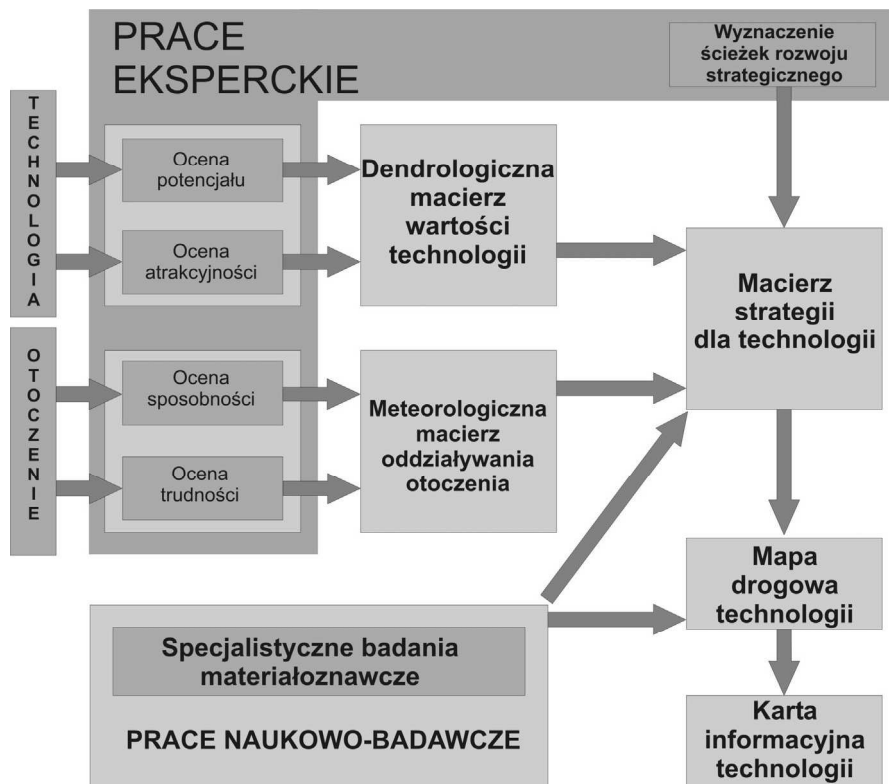
**Rysunek 7.** Macierz strategii dla technologii sporządzona dla obszaru tematycznego „Technologie PVD”, gdzie: (A) CAD, (B) RMS, (C) PPM, (D) IBAD, (E) HHCD, (F) EB-PVD, (G) BARE, (H) ICB, (I) TAE, (J) PLD [4,21,34]

utworzono wykorzystując opracowany program komputerowy bazujący na sformułowanych zależnościach matematycznych [31] na podstawie wyników badań eksperckich uprzednio ujętych w macierzach: dendrologicznej i meteorologicznej. Strategiczne perspektywy rozwojowe danej grupy technologii wyrażono liczbami umieszczonymi w kółkach (rys. 7), natomiast strzałkami zaznaczono ścieżki rozwoju strategicznego odzwierciedlające prognozowaną sytuację danej technologii w przypadku zajścia pozytywnych, neutralnych lub negatywnych zjawisk zewnętrznych (rys. 8). Opracowana prognoza przedstawia kilkuwariantową wizję przyszłych wydarzeń i dotyczy przedziałów czasowych do roku 2015, 2020, 2025 i 2030.



*Rysunek 8. Ścieżki rozwoju strategicznego wyznaczone dla technologii laserowego teksturowania krzemu polikrystalicznego [4,21,35]*

Podstawą wielu formułowanych ocen i wniosków w ramach projektu FORSURF są badania materiałoznawczo-forseightowe, jako autorskie podejście w wielu pracach zrealizowanych

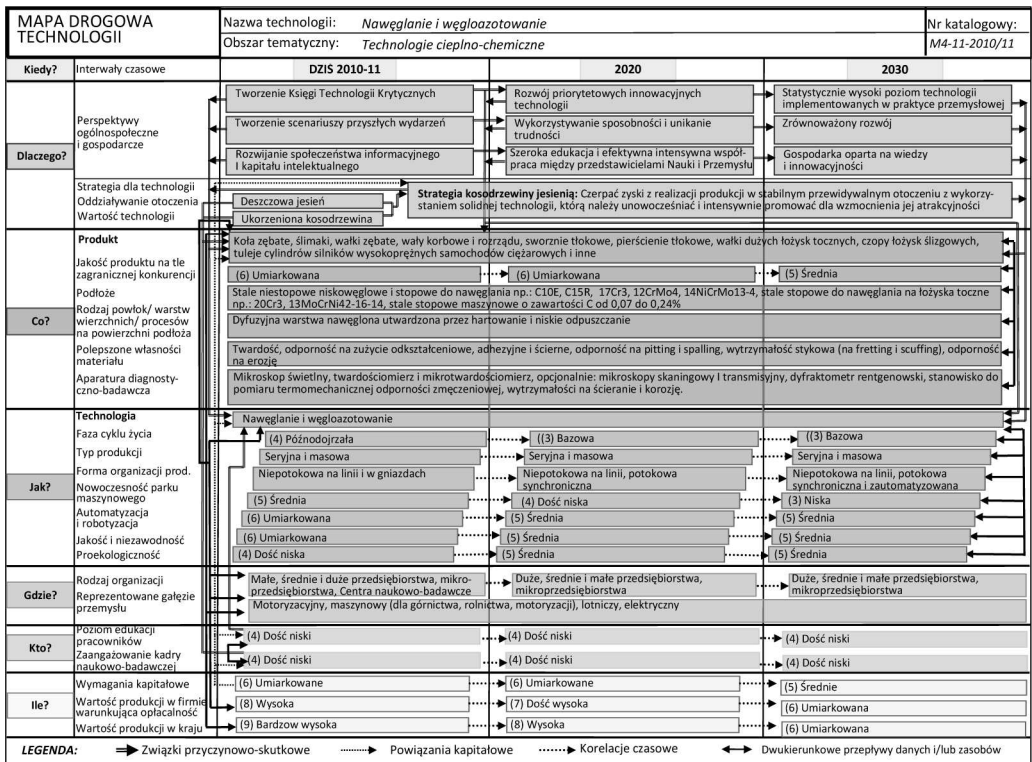


**Rysunek 9.** Metodologia interdyscyplinarnych badań foresightowo-materiałoznawczych [4,21,37,41]

w związku z tym foresightem [4,29,32,33,35-38]. Synergiczne oddziaływanie metod badań materiałoznawczych i foresightowych o interdyscyplinarnym charakterze przeprowadzonych z użyciem metodologii badań dotyczącej w głównej mierze foresightu technologicznego [39,40] będącego elementem dziedziny wiedzy zwanej organizacją i zarządzaniem oraz inżynierii powierzchni wchodzącej w skład szerzej rozumianej inżynierii materiałowej, jest gwarantem trafności i adekwatności ocen dokonywanych według opracowanej metodologii [4,21,31]. Na niektórych etapach przeprowadzonych badań wykorzystano również metody wywodzące się ze sztucznej inteligencji, statystyki, technologii informacyjnej, budowy i eksploatacji maszyn, zarządzania strategicznego i operacyjnego. Główne założenia metodologiczne prowadzonych badań zostały przedstawione graficznie na rysunku 9.

Wyniki wykonanych eksperymentalno-porównawczych badań stanowią dane źródłowe służące utworzeniu map drogowych technologii. Opracowane według autorskiej koncepcji

m.in. w pracach [29,32,33,35-38,41] (rys. 10) mapy drogowe technologii stanowią bardzo wygodne narzędzie analizy porównawczej umożliwiając wybór najlepszej z technologii pod względem wybranego kryterium. Horyzont czasowy całości wyników badań naniesionych na mapy drogowe technologii wynosi 20 lat, na osi odciętych umieszczając trzy przedziały czasowe dotyczące kolejno lat: 2010-11, 2020 i 2030. Oś rzędnych map drogowych technologii zawiera siedem głównych warstw uporządkowanych hierarchicznie, a informacje zawarte w poszczególnych warstwach odpowiadają kolejno na pytania: Kiedy? Dlaczego? Co? Jak? Gdzie? Kto? Ile? Powiązania pomiędzy poszczególnymi warstwami i podwarstwami map drogowych technologii przedstawiono za pomocą strzałek, reprezentujących odpowiednio związku przyczynowo-skutkowe, powiązania kapitałowe, korelacje czasowe i dwukierunkowe przepływy danych i/lub zasobów. W górnych warstwach map drogowych technologii zawarte są informacje najbardziej ogólne określające przesłanki ogólnospołeczne i ekonomiczne,



Rysunek 10. Przykładowa mapa drogowa technologii sporządzona dla nawęglania i węgloazotowania [4,21,37]



przyczyny i powody realizowanych działań, w środkowych – charakteryzujące produkt i technologie jego wytwarzania, natomiast w warstwach dolnych sprecyzowane są szczegóły organizacyjno-techniczne, dotyczące miejsca, wykonawcy i kosztów. Warstwy środkowe mapy drogowej technologii są poddane dwóm typom oddziaływania – pchaniu ze strony warstw dolnych i ssaniu ze strony warstw górnych. Niezaprzeczalną zaletą map drogowych technologii jest elastyczność, wobec czego mapy mogą być uzupełniane i dostosowywane do specyfiki branży, wielkości firmy lub oczekiwań przedsiębiorcy.

Opis procesu technologicznego i charakterystykę zjawisk fizykochemicznych towarzyszących procesom technologicznym, zalety i wady danej technologii, najbardziej perspektywiczne technologie szczegółowe oraz technologie zastępcze / alternatywne, jako informacje techniczne stanowiące istotną pomoc podczas wdrażania danej technologii w praktyce przemysłowej, w szczególności w małych i średnich przedsiębiorstwach nie dysponujących możliwościami wykonywania badań we własnym zakresie, zawierają karty informacyjne technologii (rys. 11) opracowane w pracach [29,32,33,35-38,41]. W kartach informacyjnych technologii określone są ponadto rodzaje możliwych do naniesienia powłok, warstw wierzchnich lub procesów zachodzących na powierzchni podłoża, a także szczególne własności powłok / warstw wierzchnich / powierzchni podłoża wytworzonych w wyniku procesów technologicznych. Podano także ogólne fizykochemiczne warunki realizacji procesu technologicznego, metody przygotowania materiału podłoża, rodzaje urządzeń badawczych i specyficzne oprzyrządowanie. Wpływ zastosowanej technologii na własności materiału, skuteczność przeciwdziałania skutkom zużycia przez zastosowanie technologii, sektor przemysłowy o najwyższej aplikacyjności technologii, możliwe do zastosowania metody modelowania i sterowania komputerowego oraz perspektywy rozwojowe poszczególnych analizowanych technologii zamieszczono w opracowanych kartach technologii na podstawie danych pozyskanych z badań eksperckich, wyznaczonych z wykorzystaniem uniwersalnej skali stanów względnych: Dodatkowo każda karta informacyjna technologii zawiera ogólny lub przykładowy schemat rozpatrywanego procesu produkcyjnego oraz trójelementowy wykaz rekomendowanych źródeł literaturowych [4,37]).

Wyniki projektu FORSURF [22] są **możliwie do wdrożenia** i praktycznego wykorzystania w gospodarce. Projekt służy również **animacji debaty publicznej**, obejmującej krajowych i zagranicznych przedstawicieli świata nauki, gospodarki i administracji publicznej, w celu upowszechnienia wyników projektu w środowiskach zainteresowanych podjętą tematyką.

a)

KARTA INFORMACYJNA TECHNOLOGII	Nazwa technologii	Natrysk hydrodynamiczny	Nr katalogowy	
	Obszar tematyczny	Technologie polimerowych warstw wierzchnich	M5-02-2010/11	
Istota zjawiska fizyko-chemicznego		Wpływ aplikacji technologii na przewidywane i oczekiwane własności materiału	Poziom	
W procesie natrysku hydrodynamicznego farba jest sprężana do bardzo wysokiego ciśnienia przy pomocy pompy na przykład membranowej. Pompa membranowa zasysa materiał natryskowy i podaje go pod ciśnieniem do dyszy zamontowanej w pistolecie. Przy wysokim ciśnieniu następuje rozpylenie materiału i możliwość jego natrysku na malowany detal. Tak wysokie ciśnienie pozwala na bardzo duże rozdrobnienie cząstek farby. Strumień farby pędzący z dużą prędkością z dyszy, rozбивa się w kontakcie z powietrzem na bardzo małe cząstki i pokrywa równomiernie przedmiot. Korzyści jakie przynosi ta metoda to dobre rozpylenie, znaczne zmniejszenie rozproszenia materiału w czasie natrysku i bardzo dobra jakość powłok: duża gładkość brak efektu pęcherzenia. Kolejne zalety to duża szybkość pracy oraz prosta i wygodna obsługa. W tym systemie rozpylanie odbywa się bez udziału powietrza, stąd z angielskiego nazwa AIRLESS (wolny od powietrza).		Nizszy koszt wytwarzania Energoszczędność Odporność na korozję Odporność na promieniowanie Odporność na łączenie Możliwość poddania recyklingowi Twardość	Dość wysoki (7) Umiarkowany (6) Średni (5) Średni (5) Średni (5) Dość niski (4) Dość niski (4) Dość niski (4)	
Rodzaj możliwej powłoki/ warstwy wierzchniej lub procesów zachodzących na powierzchni podłoża		Skuteczność przeciwdziałania technologii skutkiem zużycia	Poziom	
x jednowarstwowa	wielofazowa	Korozja równomierna	Wybitny (10)	
wielowarstwowa	gradientowa	Korozja lokalna i wżerowa	Bardzo wysoki (9)	
multiwarstwowa (>100 warstw)	x kompozytowa	Erozja	Wysoki (8)	
przemiany fazowe powierzchni podłoża	x zmiana składu chemicznego na powierzchni podłoża	Zużycie ściernie	Dość wysoki (7)	
Szczególne własności powłok/ warstw wierzchnich/ powierzchni podłoża w wyniku zajęcia procesów		Fretting	Średni (5)	
mechaniczne	x magnetyczne	x optyczne	x trybologiczne	Średni (5)
chemiczne	dyfuzyjne	termiczne	x antykorozyjne	Dość niski (4)
elektryczne	hydromechaniczne	akustyczne	Inne	Dość niski (4)
zalety	Wady		Poziom	
Wysoka wydajność; oszczędność materiału malarskiego; znacznie większa grubość powłoki w porównaniu z natryskiem pneumatycznym oraz mniejsze zapylenie i stęplenie par rozpuszczalników.	Wysokie koszty urządzenia; konieczność opanowania tej techniki malowania i praca z wysokimi ciśnieniami wymagająca wykwalifikowanej załogi.		Sekcje przemysłu wg klasyfikacji PKD o najwyższej aplikacyjności technologii	
Najbardziej perspektywiczne technologie szczególne /lub obszar zastosowań	Nanoszenie emalii, lakierów, emulsji, farb, farb akrylowych na elementy konstrukcyjne, części maszyn i urządzeń, blachy samochodowe, zbiorniki, cysterny, wymienniki ciepła. Szerokie perspektywy natrysk hydrodynamiczny w osłonie powietrza (zalety połączone) metody hydrodynamicznej i pneumatycznej).		Produkcja pozostałego sprzętu transportowego Prod. metalowych wyr. gotowych z wyr. maszyn i urządzeń Produkcja pojazdów samochodowych	
Technologie zastępcze/ alternatywne	Najbardziej konkurencyjną metodą stosowaną w przemyśle jest malowanie proszkowe. Wśród metod alternatywnych można wymienić natrysk pneumatyczny czy napylenie płomieniowe.		Produkcja mebli Roboty związane z budową obiektów inż. lądowej i wodnej Roboty budowlane związane ze wzrostem budynków Produkcja wyrobów z drewna i korka, z wyłączeniem mebli	
Rekomendowane źródła literatury	1. J.J. Licari, Coating materials for electronic applications, Springer, 2003. 2. W. McElroy, Painter's Handbook, Craftsman Book Company, 1988. 3. J.P. Hund, Spray application processes, Metal Finishing 108/11-12 (2010) 133-149.		Prod. komputerów, wyrobów elektronicznych i optycznych Aplikacyjność metod modelowania i sterowania komputerowego w odniesieniu do technologii	
		Modelowanie wieloosłowe	Dość wysoki (7)	
		Systemy ekspertowe	Umiarkowany (6)	
		Dynamika molekularna	Umiarkowany (6)	
		Metody Monte Carlo	Średni (5)	
		Automaty komórkowe	Dość niski (4)	
		Aktualna faza cyklu życia technologii	Bazowy (3)	
		Perspektywy rozwojowe	Wysoki (8)	

b)

KARTA INFORMACYJNA TECHNOLOGII	Nazwa technologii	Natrysk hydrodynamiczny	Nr katalogowy
	Obszar tematyczny	Technologie polimerowych warstw wierzchnich	M5-02-2010/11
Opis przebiegu procesu technologicznego			
<p>W procesie nanoszenia powłok natryskiem hydrodynamicznym można wyróżnić kilka etapów. Pierwszym etapem jest przygotowanie powierzchni poprzez jej odtłuszczenie i usunięcie cząstek niezwiązanych z podłożem. W kolejnym etapie dochodzi do właściwego natrysku hydrodynamicznego. W ostatnich czasach najpopularniejsze są lekkie, przenośne agregaty natryskowe wysokociśnieniowe napędzane silnikami elektrycznymi. Napęd przenoszony jest na wałek napędowy przy pomocy kół i paska zębatego. Wałek napędowy porusza tłok pompy farby. Przy posuwisto-zwrotnych ruchach tłoka otwierają lub zamykają się zawory: ssący i wylotowy umożliwiając pompowanie farby. Materiał natryskowy uzyskuje w wężu wysokociśnieniowym odpowiednio duże ciśnienie i jest wtryskiwany przez dyszę pistoletu na malowany obiekt. Regulatorem ciśnienia można sterować ilością farby oraz ciśnieniem natrysku w dyszy pistoletu. Tak wysokie ciśnienie pozwala na bardzo duże rozdrobnienie cząstek farby. Strumień farby pędzący z dużą prędkością z dyszy, rozбивa się w kontakcie z powietrzem na bardzo małe cząstki i pokrywa równomiernie przedmiot. W kolejnym etapie następuje odparowanie rozpuszczalnika i tęplenie powłoki. Ze względu na zwiększoną gęstość używanych w tym procesie lakierów a zarazem mniejszą ilość stosowanych rozpuszczalników, czas od użytkowania, jest w porównaniu z tradycyjnym natryskiem krótki.</p>			
Ogólne fizyko-chemiczne warunki realizacji procesu technologicznego			
Standardowy zakres parametru procesu	Jednostka	od	do
Temperatura	°C	20	24
Ciśnienie	MPa	6	35
Warunki prądowo-napięciowe	V	Hz	230 50 400 60
Czas	Zależny od malowanej powierzchni		
Środowisko/ atmosfera	Proces przebiega w środowisku o ograniczonej wilgotności		
Specyficzne warunki realizacji procesu	Zazwyczaj lakierowanie wymaga szczelnych kabln		
Metoda(-y) wstępnego przygotowania materiału podłoża			
Procesy malarskie natryskowe zazwyczaj poprzedzone są chemicznym bądź/ i mechanicznym czyszczeniem powierzchni.			
Typ/ rodzaj urządzenia			
Specjalistyczny agregat z wbudowaną pompą wysokociśnieniową i aplikatorem przystosowanym do wysokiego ciśnienia lakieru			
Specyficzne oprzyrządowanie			
Dysze; aplikatory; agregaty.			
Przykładowy schemat przebiegu procesu natrysku hydrodynamicznego drogą atomizacji hydraulicznej i atomizacji z ogrzewaniem.			

**Rysunek 11.** Przykładowa karta drogowa technologii sporządzona dla natrysku hydrodynamicznego w obszarze tematycznym technologii polimerowych warstw wierzchnich (opracowana przez A.D. Dobrzańską-Danikiewicz, M. Szymiczek i G. Wróbla)

Debata publiczna przyczynia się do dalszego zacieśniania współpracy pomiędzy sferą badawczo-rozwojową a gospodarką i aktywizacji przepływu kadr między tymi grupami, co jest również utylitarną konsekwencją działań realizowanych w ramach projektu, skutkującą polepszeniem sytuacji konkurencyjnej gospodarki i nauki polskiej na tle innych państw Europy i świata. Stworzona w ramach projektu **platforma internetowa** umożliwi ogółowi społeczeństwa, a w szczególności środowiskom przemysłowym, ośrodkom naukowym, organizacjom społecznym pozyskiwanie w dowolnym momencie szczegółowych informacji dotyczących celów, założeń i wykonawców projektu, śledzenie wyników wykonanych prac oraz wyrażanie własnych opinii na jego temat w ramach konsultacji społecznych on-line, co zapewnia występowanie pętli **sprzężenia zwrotnego**. Promocja wyników projektu oraz szerokie wykorzystanie elektronicznych narzędzi, takich jak strona internetowa, bazy danych o technologiach kształtowania własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych oraz produktach do których mogą być zastosowane, konferencje, warsztaty i seminaria zapewniają dostęp do wyników projektu bardzo **szerojemu gronu użytkowników** jego rezultatów.

### **1.3. Współczesne znaczenie technologii kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich**

Poprawa własności użytkowych produktów wymagana przez nowe strategie rozwoju materiałów inżynierskich, w tym biomedycznych oraz technologii procesów materiałowych związana jest bardzo często z odpowiednim kształtowaniem struktury i własności **warstw powierzchniowych** materiałów inżynierskich i biomedycznych. Własności użytkowe wielu produktów i ich elementów zależą bowiem nie tylko od możliwości przeniesienia obciążeń mechanicznych przez cały czynny przekrój elementu z zastosowanego materiału lub od jego własności fizykochemicznych, lecz bardzo często także lub głównie od struktury i własności warstw powierzchniowych [4,8,10,13,16,17,20,21,42]. W wyniku odpowiedniego doboru materiału elementu wraz z procesami kształtującymi jego strukturę i własności oraz rodzaju i technologii warstwy powierzchniowej, zapewniających wymagane własności użytkowe, możliwe jest najkorzystniejsze zestawienie własności rdzenia i warstwy powierzchniowej wytworzonego elementu. W tym obszarze Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie Instytutu Materiałów Inżynierskich

i Biomedycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach ma również znaczące dokonania m.in. w metodach obróbki cieplno-chemicznej [37,43-53], gradientowych materiałów uzyskiwanych metodami metalurgii proszków [36,54-69], powłok nanoszonych metodami PVD i CVD [29,38,41,70-129], technologii hybrydowych [130-133], warstw powierzchniowych uzyskiwanych metodami obróbki laserowej [32,33,134-178], warstw stosowanych w fotowoltaice [35,179-193], warstw i pokryć nanostrukturalnych [194-203].

Zdefiniowanie wiodących technologii i kierunków badań strategicznych w zakresie metod kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych stanowi warunek opracowania własnych strategii rozwojowych przez wiele małych i średnich przedsiębiorstw i poprawy ich konkurencyjności w skali krajowej i globalnej, w wyniku aplikacji i rozwoju zaawansowanych technologii kształtowania struktury i własności powierzchni, jako istotnego fragmentu technologii wytwarzania produktów oraz warunkuje bardziej elastyczną adaptację produkcji do aktualnych potrzeb rynkowych. Technologie kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych są coraz bardziej powszechnie stosowane w wielu sektorach produkcyjnych przemysłu, w tym w przemyśle budowy maszyn i narzędzi, samochodowym, lotniczym, metalurgicznym, elektrotechnicznym, elektronicznym, tworzyw sztucznych, wyposażenia medycznego, urządzeń sanitarnych, budownictwie, elektrotechnice, elektronice, jubilerstwie. Branża obróbki powierzchniowej i pokrywania powierzchni to jeden z najbardziej dynamicznie rozwijających się sektorów gospodarki, np. w Niemczech z kilkunastoprocentową dynamiką w porównaniu ze średnim około 2,7% wzrostem gospodarczym w tym kraju, co zaprezentowano m.in. na targach „ŚWIAT POKRYĆ POWIERZCHNI” Centralnego Związku Technik Obróbki Powierzchniowej ZVO w Stuttgarcie w Niemczech w 2008 roku. Analizy niemieckie wskazują, że wzrost gospodarczy firm aktywnych w obszarze inżynierii powierzchni jest zatem ponad 4-krotnie większy niż średnia krajowa, a kształtowanie struktury i własności warstw powierzchniowych produktów i ich elementów wytworzonych z materiałów inżynierskich i biomedycznych zapewnia polepszenie własności użytkowych, trwałości i niezawodności produkcji. Z nieproporcjonalnie wysoką, kilkunastoprocentową dynamiką rozwijał się sektor pokryć galwanicznych i obróbki powierzchni, obejmujący wyłącznie przedsiębiorstwa małe i średnie, zatrudniające od 5 do 400 pracowników. Podstawowe zainteresowanie tą problematyką przejawiają przedstawiciele przemysłu (77%) oraz służb serwisowych (16%). Równocześnie obecne zainteresowania zawodowe w Niemczech dotyczą usług w zakresie obróbki powierzchniowej (44%), urządzeń

czyszczących i przygotowujących do obróbki powierzchni (22%), technologii elektrolitycznych (21%), specjalnych systemów obróbki powierzchniowej (17%), materiałów lakierniczych i surowców do obróbki powierzchniowej (9%), systemów lakierniczych, emalierskich i pokrywania materiałami polimerowymi (9%), systemów kontroli zanieczyszczeń powodowanych przez obróbkę powierzchniową (9%), systemów kontrolno-pomiarowych stosowanych do obróbki powierzchniowej (6%), systemów obróbki laserowej oraz plazmowej (2%) i systemów kształtowania struktury powierzchni (1%). Wśród zagadnień najbardziej interesujących wymieniane są technologie elektrolityczne (38%), urządzenia czyszczące i przygotowujące do obróbki powierzchni (30%), usługi w zakresie obróbki powierzchniowej (28%), systemy kontrolno-pomiarowe stosowane do obróbki powierzchniowej (24%), specjalne systemy obróbki powierzchniowej (23%), materiały lakiernicze i surowce do obróbki powierzchniowej (21%), systemy lakiernicze, emalierskie i pokrywania materiałami polimerowymi (20%), systemy kontroli zanieczyszczeń powodowanych przez obróbkę powierzchniową (14%), systemy obróbki laserowej oraz plazmowej (11%) i systemy kształtowania struktury powierzchni (5%).

Pomiędzy tymi dwoma zestawieniami występują znaczące różnice. Niezależnie od oceny tego, na ile adekwatny jest podział na wskazane zakresy zainteresowań oraz od oceny reprezentatywności wykonanych ankiet należy bezsprzecznie stwierdzić, że obserwuje się znaczące zainteresowanie postępowaniem w wymienionej branży przemysłowej [17,20]. Przewidywanie intensywnego rozwoju tej branży również w Polsce, uzasadnia zainteresowanie wymienioną problematyką. Branża ta oprócz wielkich wytwórców, np. samochodów, samolotów lub urządzeń energetycznych, obejmuje wiele przedsiębiorstw małych i średnich, w tym również często kooperujących z wielkimi wytwórcami produktów gotowych. Wdrażanie nowości technologicznych w tym zakresie w jednostkach przemysłowych, a zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach, z pewnością nie jest zadowalające. Należy zauważyć, że problem nie dotyczy wyłącznie awangardowych technologii realizowanych przez wzorcowe przedsiębiorstwa, lecz również bezwzględnej potrzeby podwyższenia średniego poziomu realizacji tych technologii przez statystyczną większość producentów, w tym zwłaszcza drobnych, co ma bardzo istotne znaczenie dla jakości i trwałości, statystycznej większości produktów trafiających na rynek oraz istotnie decyduje o **konkurencyjności krajowej gospodarki**. Problem ma zatem ważne znaczenie gospodarcze. W długim horyzoncie czasowym polskie przedsiębiorstwa, powinny kłaść bowiem nacisk na ciągły rozwój zaawansowanych technologii wytwarzania i poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań, w celu realizacji produkcji elastycznie

reagującej na ciągle zmiany preferencji klientów. Rozwój ten powinien bazować na osiągnięciach sfery badawczo-rozwojowej, której zasadnicze kierunki badań powinny być zbieżne z kierunkami rozwoju firm wynikającymi z szans, jakie płyną dla nich z otoczenia, zapewniając deklarowany zrównoważony rozwój.

Współcześnie bardzo często wytwarza się materiały powierzchniowo gradientowe. Koncepcja **funkcjonalnych materiałów gradientowych** (FGM – j. ang.: *functionally graded materials*) dotycząca materiałów, w których własności zmieniają się w sposób ciągły lub dyskretny (stopniowo), wraz z położeniem, została teoretycznie przewidziana jeszcze w roku 1972 przez Bevera i współpracowników [204,205], lecz rozwinięta dopiero po 15 latach w ramach projektu badawczego podjętego w Japonii, kiedy to opracowano liczne metody wytwarzania takich materiałów [206-210], i szczegółowo przebadana w ostatnim dziesięcioleciu w ramach priorytetowego programu w Niemczech [211], a w latach 2005-2007 także w Polsce, w ramach których metodycznie przeanalizowano wiele nowoczesnych technologii wytwarzania materiałów tej kategorii. Gradientowe własności materiałów uzyskuje się dzięki zmieniającym się z położeniem składem chemicznym, składem fazowym i strukturą lub uporządkowaniem atomów. Wśród procesów wytwarzania funkcjonalnych materiałów gradientowych można wyróżnić metody metalurgii proszków związane ze zróżnicowaniem wielkości ziarn na przekroju [212-216] jak również z gradientem temperatury w czasie spiekania [217], udziałem fazy ciekłej [218], wspomaganiami laserowego i wyładowania plazmowego [219,220]. Wśród współczesnych metod można wyróżnić związane z gradientem udziału objętościowego faz i zróżnicowaniem wielkości ziarn w materiałach dwu lub wielowarstwowych [211,221], w tym także przez zalewanie gęstwy. Metoda ta została również zbadana w Austrii [222] w odniesieniu do węglików spiekanych i cermetali [223] jak również w Hiszpanii [224] w odniesieniu do stali szybko tnących. W Izraelu opracowano metodę wtapiania NbC w osnowę stali szybko tnącej z użyciem lasera [225]. Gradientowe warstwy stopowane wytworzono z użyciem lasera w Chinach [226-228] na podłożach z różnych metali. Warstwy gradientowe są również wytwarzane metodami PVD na podłożu ze spiekanych materiałów narzędziowych [229-234]. Można uzyskiwać warstwy gradientowe przez spiekanie w reaktywnej atmosferze [222], jak również w obecności par metali, np. Cr [235]. We wszystkich wymienionych zakresach istotny jest również wkład własnych prac Zakładu Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach [236-241].

Ustawicznym dążeniem projektantów jest wola opracowania i wytworzenia idealnego materiału, np. narzędziowego, który wykazywałby równocześnie maksymalnie możliwą odporność na zużycie w warunkach pracy oraz wysoką ciągliwość. Z natury rzeczy takie połączenie własności jest niemożliwe do uzyskania. Podejmowano wobec tego różne próby choćby częściowego rozwiązania problemu przez stworzenie struktur warstwowych, m.in. metodami obróbki cieplno-chemicznej, przez wytworzenie materiałów kompozytowych oraz pokrywanie jednowarstwowe metodami CVD i PVD, a także napawanie lub natryskiwanie twardych warstw metodą metalizowania natryskowego. Każda z tych metod wykazuje jednak ograniczenia, związane m.in. z nieodpowiednią grubością warstwy wierzchniej, a zwłaszcza z problemami związanymi z nieodpowiednią przyczepnością wytworzonej warstwy lub ze zbyt dużymi naprężeniami między warstwą wierzchnią a podłożem, co często jest przyczyną przyspieszonego złuszczenia lub odpryskiwania warstwy, zwłaszcza w warunkach superpozycji wewnętrznych naprężeń strukturalnych i naprężeń zewnętrznych wynikających z obciążeń w warunkach pracy. **Hybrydowe technologie** zawierające między innymi procesy obróbki cieplno-chemicznej, stopowania, przetapiania lub wtapiania laserowego, formowania wtryskowego proszku, a także fizycznego osadzania z fazy gazowej zapewniają pełne i kompleksowe rozwiązanie problemu projektowania materiałów do odpowiednich zastosowań. Jest to nowoczesny kierunek technologiczny i atrakcyjny badawczo. W tym świetle ponownie atrakcyjne stały się klasyczne technologie, w tym obróbki cieplno-chemicznej. Obecnie koncepcja funkcjonalnych materiałów gradientowych, w tym **narzędziowych materiałów gradientowych**, należy bowiem do jednej z najpowszechniej badanych w świecie, jako jedna z możliwości dostosowywania (j. ang.: *tailoring*) własności różnych elementów i narzędzi do wymogów eksploatacyjnych. We wszystkich wymienionych zakresach istotny jest również wkład własnych prac Zakładu Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach [242-267].

Koncepcja gradientu struktury i własności materiałów obecnie najczęściej dotyczy warstw powierzchniowych różnych grup materiałów inżynierskich, w tym konstrukcyjnych, narzędziowych, funkcjonalnych oraz biomedycznych. Powoduje to coraz większe zainteresowanie ośrodków naukowych w całym świecie tą problematyką, a nawet swoisty nawrót do technologii, których jak się wydawało znaczenie poprzednio nawet zmalało. Ten nawrót zainteresowań wynika głównie z przesłanek ekonomicznych, ale również ekologicznych, a także

wynika ze zwiększenia własności eksploatacyjnych produktów wytworzonych z udziałem tych technologii, które często stosowane są jako hybrydowe, łącząc różne technologie zapewniające najlepsze możliwie własności kolejno na sobie nałożonych warstw powierzchniowych. W tych zakresach istotny jest również wkład własnych prac Zakładu Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach [15,130-133].

Obróbka powierzchni przez **uzupełnienie ubytków** w eksploatowanych długotrwale elementach maszyn i urządzeń, np. pojazdów samochodowych i silników spalinowych, oraz kształtowanie struktury i powierzchni ponownie ukształtowanych elementów konstrukcyjnych, stanowić może obecnie podstawę re-manufacturingu. Przykładowo w Chinach, kraju o gospodarce najintensywniej rozwijającej się w świecie, wybudowano całkowicie nowe fabryki wyposażone w najnowsze dostępne na świecie urządzenia do obróbki powierzchniowej, z wykorzystaniem technologii laserowych, plazmowych, PVD i CVD, w których całkowitej renowacji poddawane są zużyte całkowicie samochody, z których odzyskuje się nieużyte elementy, a pozostałe poddaje się re-manufacturingowi. Koszty ponownego wyprodukowania pojazdu stanowią jedynie część kosztów produkcji pojazdu nowego, przy ponownym zapewnieniu 100% trwałości. Ma to również ogromne znaczenie dla **wtórniego obrotu surowcami** i ich **recyklingu** i niewątpliwie stanowi oryginalny wkład do idei zrównoważonego rozwoju i popierania technologii proekologicznych.

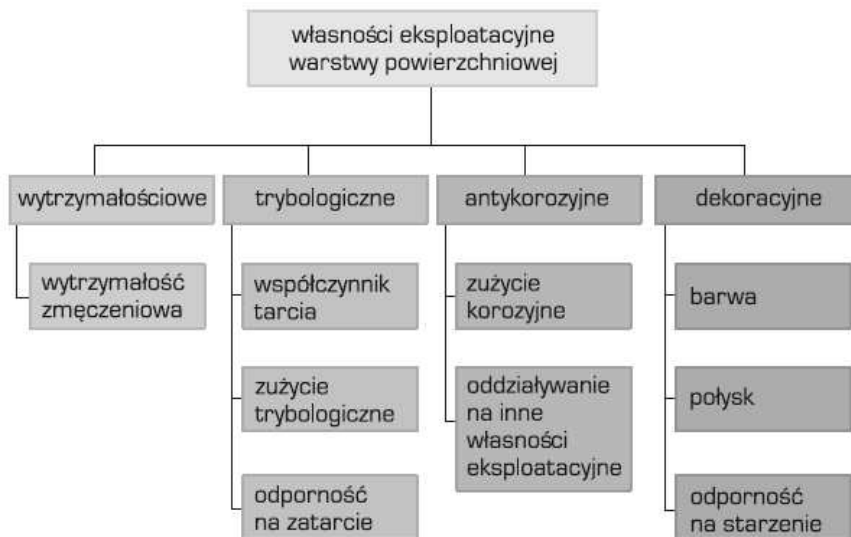
O ile rozeznanie nowoczesnych technologii kształtowania struktury i własności powierzchni poszczególnych grup materiałów inżynierskich i biomedycznych przez środowisko naukowe można uznać za dobre, o tyle wdrażanie nowości technologicznych w tym zakresie w jednostkach przemysłowych, a zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach, z pewnością nie jest zadowalające. Należy przy tym zauważyć, że problem nie dotyczy wyłącznie awangardowych technologii realizowanych przez wzorcowe przedsiębiorstwa, lecz również bezwzględnej potrzeby podwyższenia średniego poziomu realizacji tych technologii przez statystyczną większość producentów, co ma bardzo istotne znaczenie dla jakości i trwałości, statystycznej większości produktów trafiających na rynek oraz istotnie decyduje o konkurencyjności krajowej gospodarki. W świetle tych uwag problem ma ważne znaczenie gospodarcze. Technologie obróbki powierzchniowej wymagają upowszechnienia oraz wdrożenia we wszelkich uzasadnionych przypadkach, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach, które



dysponują relatywnie małymi środkami na badania i rozwój. Wszystkie z argumentów wspomnianych w projekcie FutMan w odniesieniu do nowych materiałów inżynierskich dotyczą także technologii kształtowania struktury i własności warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich i biomedycznych, co szczegółowo wykazano w projekcie FORSURF. Najczęściej z powodów ekonomicznych, ale również ekologicznych winny być wdrażane nowe technologie w tym zakresie, które często należą do domeny **nanotechnologii**, a kształtowane powłoki powierzchniowe o grubości kilku mikrometrów złożone mogą być z kilkudziesięciu do kilkuset warstw. Technologie obróbki powierzchniowej są coraz bardziej powszechnie stosowane we wszystkich niemal sektorach produkcyjnych przemysłu, w tym samochodowym, budownictwie, wyposażenia medycznego, urządzeń sanitarnych, elektrotechnice, elektronice, a nawet przy wytwarzaniu biżuterii. Ale jest też wiele innych sektorów będących ważnymi odbiorcami dla branży obróbki powierzchniowej, w tym między innymi przemysł budowy maszyn i narzędzi, przemysł metalurgiczny, elektrotechniczny, elektroniczny, tworzyw polimerowych oraz przemysł lotniczy. W wyniku odpowiedniego doboru procesów kształtujących strukturę i własności produktów, rodzaju i technologii warstwy powierzchniowej oraz materiału podłoża elementu zapewniane są bowiem wymagane własności użytkowe wytworzonych elementów. W tym zakresie również istotny jest wkład własnych prac Zakładu Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach [268-281].

#### **1.4. Ogólna klasyfikacja warstw powierzchniowych i metod kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich**

**Struktura i własności warstw powierzchniowych** bardzo często, a nawet głównie, decydują o własnościach użytkowych wielu produktów i ich elementów (rys. 12). Również względy ekonomiczne nakazują stosowanie w takich przypadkach warstw powierzchniowych, zapewniających wymagane własności użytkowe przy równoczesnym użyciu możliwie tanich materiałów na rdzeń elementu, od którego wymaga się z reguły mniejszych własności użytkowych. W wyniku odpowiedniego doboru materiału elementu wraz z procesami kształtującymi jego strukturę i własności oraz rodzaju i technologii warstwy powierzchniowej,



*Rysunek 12. Najważniejsze własności eksploatacyjne warstwy powierzchniowej*

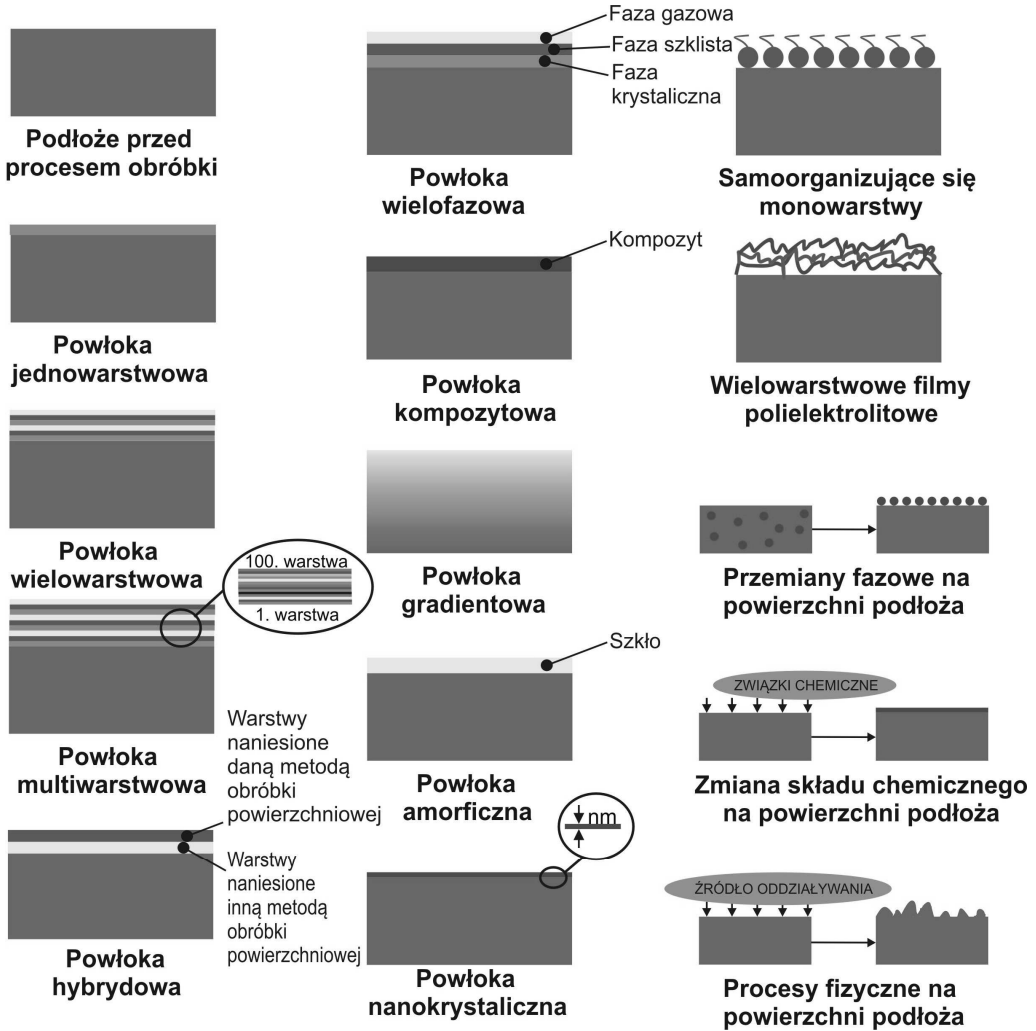
zapewniających wymagane własności użytkowe, możliwe jest również najkorzystniejsze zestawienie własności rdzenia i warstwy powierzchniowej wytworzonego elementu.

Uzyskane warstwy powierzchniowe mogą być:

- **warstwami wierzchnimi**, ograniczonymi powierzchnią obrabianego elementu, obejmującymi obszar materiałów o własnościach różniących się od własności materiałów rdzenia, uzyskanymi w wyniku łącznego działania sił mechanicznych, elektrycznych, ciepła, czynników chemicznych,
- **powłokami**, czyli warstwami metalu, stopu, materiału ceramicznego, materiału polimerowego lub innych materiałów, naniesionymi trwale na powierzchnię podłoża, w celu uzyskania wymaganych własności fizycznych, antykorozyjnych lub dekoracyjnych.

**Warstwy powierzchniowe ze względu na zastosowanie**, można podzielić na:

- **wykazujące wymagane własności fizyczne** zapewniające produktom lub ich elementom określone własności mechaniczne, jak wysoką twardość w stosunku do właściwej dla podłoża, zwiększoną odporność na zużycie trybologiczne, zwiększoną przewodność elektryczną lub cieplną, dużą odporność na działanie wysokiej temperatury,
- **antykorozyjne**, w tym o charakterze anodowym lub katodowym, przeciwdziałające korozji elektrochemicznej, jak również stanowiące barierę dyfuzyjną dla korozji gazowej,



**Rysunek 13.** Schematyczne przykłady warstw powierzchniowych oraz procesów zachodzących na powierzchni podłoża ze względu na uwarunkowania technologiczne [4,21]

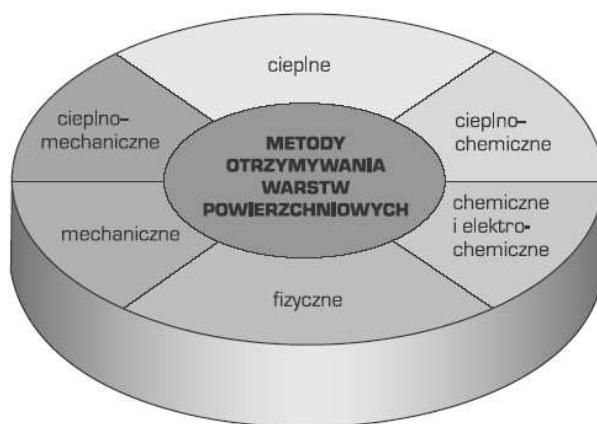
- **dekoracyjne i ochronno-dekoracyjne**, nadające produktom estetyczny wygląd zewnętrzny, o czym decyduje barwa, połysk, odporność na pokrywanie się nalotem i ewentualnie faktura powierzchni oraz zdolność do fluorescencji, fosforescencji lub radioaktywności, a często także równoczesnej odporności antykorozyjnej.

Warstwy powierzchniowe ze względu na uwarunkowania technologiczne można podzielić w sposób podany na rysunku 13 i w tabelicy 1.

*Tablica 1. Klasyfikacja warstw powierzchniowych ze względu na uwarunkowania technologiczne*

Rodzaje możliwych warstw wierzchnich i powłok lub procesów zachodzących na powierzchni podłoża		
jednowarstwowa	wielofazowa	amorficzna
wielowarstwowa	gradientowa	nanokrystaliczna
multiwarstwowa (>100 warstw)	kompozytowa	hybrydowa
przemiany fazowe warstwy wierzchniej podłoża	zmiana składu chemicznego warstwy wierzchniej podłoża	procesy fizyczne na powierzchni podłoża

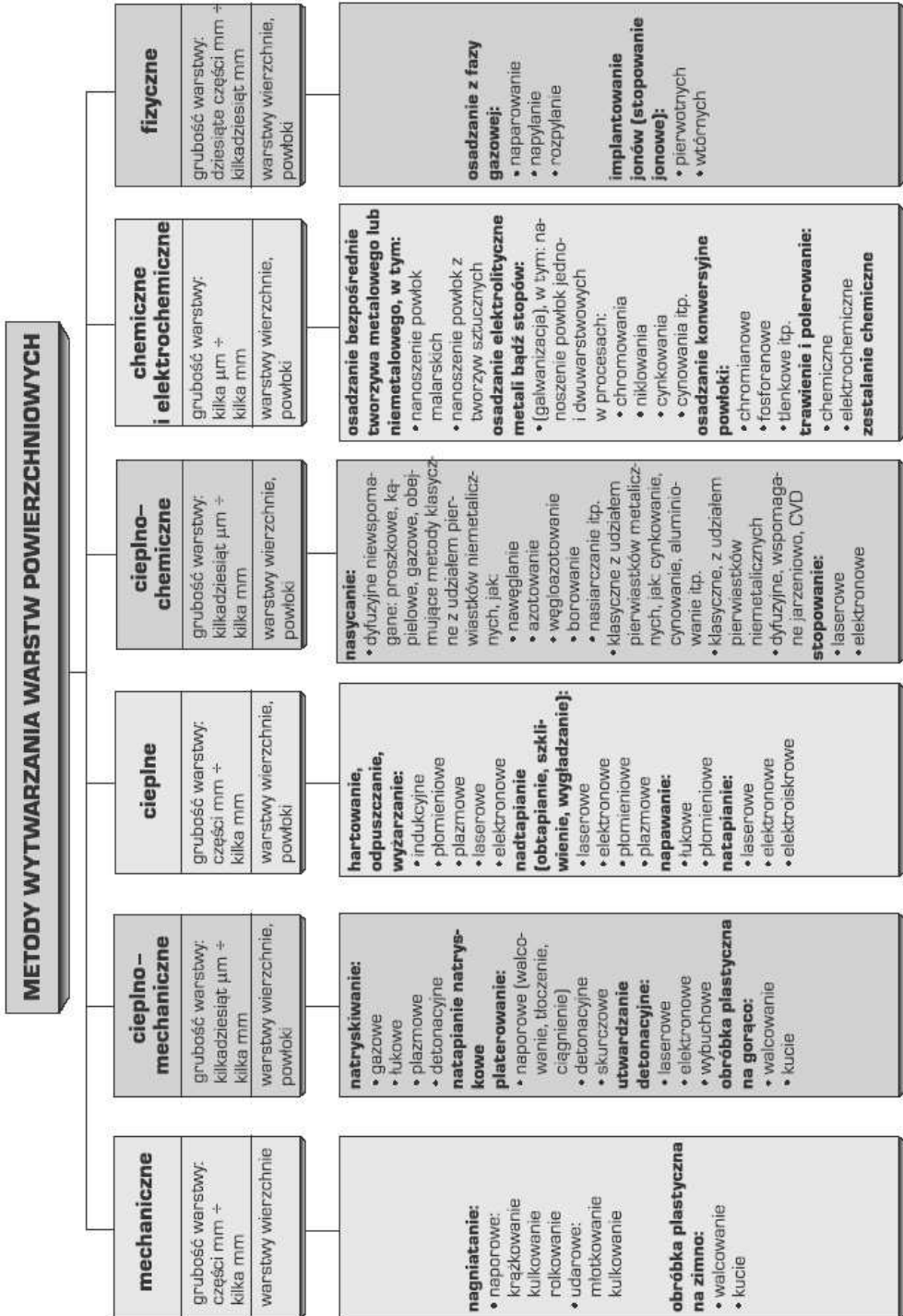
**Metody wytwarzania warstw powierzchniowych** w zależności od rodzaju zjawisk przebiegających podczas ich wytwarzania można podzielić na 6 grup (rys. 14), z których każda pozwala na uzyskanie odpowiedniego rodzaju warstwy powierzchniowej o zróżnicowanej grubości i przeznaczeniu [8,10,17].



*Rysunek 14. Metody wytwarzania warstw powierzchniowych*

Do procesów technologicznych konstituowania warstw powierzchniowych zestawionych na rysunku 15 są zaliczane metody:

- **mechaniczne**, wykorzystujące nacisk lub energię kinetyczną narzędzia albo cząstek w celu umocnienia warstwy wierzchniej na zimno bądź otrzymania powłoki ochronnej na zimnym podłożu,
- **ciepło-mechaniczne**, w których wykorzystuje się łączne oddziaływanie ciepła i nacisku w celu otrzymania powłok, jak również niekiedy warstw wierzchnich,



Rysunek 15. Podział metod wytwarzania warstw powierzchniowych ze względu na sposób powstawania warstw

- **cieplne**, które są związane z oddziaływaniem ciepła na warstwę powierzchniową materiałów w celu spowodowania zmian struktury materiałów, głównie metali, w stanie stałym, jak również zmian stanu skupienia ze stanu stałego w ciekły i następnie odwrotnie, materiałów pokrywanych (nadtopienie), jak i pokrywających (napawanie lub natapianie),
- **cieplno-chemiczne**, w których oddziałują łącznie ciepło i aktywny chemicznie ośrodek, w celu pokrycia obrobionego materiału, głównie stopów metali, wymaganym pierwiastkiem lub substancją chemiczną dla spowodowania zmian struktury warstwy powierzchniowej; wśród metod cieplno-chemicznych oddzielną grupę stanowią procesy chemicznego osadzania z fazy gazowej CVD,
- **chemiczne i elektrochemiczne**, polegające na bezpośrednim osadzeniu materiału niemetalowego lub metalowego na powierzchni obrabianego elementu (np. powłoki malarskie, z materiałów polimerowych, powłoki galwaniczne i konwersyjne), usuwaniu zanieczyszczonej lub utlenionej warstwy powierzchniowej w procesach trawienia i polerowania lub zestalania cieplno-chemicznego przez samoutlenianie oraz polimeryzację tlenową substancji błonotwórczych bądź sieciowanie w temperaturze pokojowej lub podwyższonej żywic chemoutwardzalnych nanoszonych metodami lakierniczymi,
- **fizyczne**, związane z osadzaniem powłok adhezyjnie połączonych z podłożem, niekiedy z udziałem połączeń dyfuzyjnych w wyniku zjawisk fizycznych przebiegających pod ciśnieniem atmosferycznym (np. odparowanie rozpuszczalnika podczas nanoszenia powłoki malarskiej) lub zwykle pod ciśnieniem obniżonym, z udziałem jonów, jak napawanie, napyłanie, rozpylanie, implantowanie jonów lub pierwiastków metalicznych bądź niemetalicznych; do metod tych należy fizyczne osadzanie z fazy gazowej PVD, związane z odparowaniem metali lub stopów lub rozpylaniem katodowym w próżni i jonizacją gazów par metali, których cechą jest krystalizacja par z plazmy.

W zależności od zastosowanych procesów technologicznych obróbki powierzchniowej, należy w odpowiedni sposób przygotować powierzchnię obrabianego elementu, w wyniku czego można polepszyć różne, pożądane własności warstwy wierzchniej. W tabelicy 2 porównano **różne procesy technologiczne obróbki powierzchniowej**.

**Tablica 2. Porównanie procesów technologicznych obróbki powierzchniowej (opracowano według danych N.A. Watermana i M.F. Ashby'ego)**

Proces	Podstawowe polepszone własności	Dodatkowe korzystne własności	Zachowanie wymiarów	Przygotowanie powierzchni	Koszt	Możliwość zastosowania	Zniekształcenie	Limit grubości, $\mu\text{m}$	Temperatura podłoża, $^{\circ}\text{C}$
Malowanie	odporność korozyjna	–	●	szczotkowanie	●	◐	●	●	~20
Powłoki organiczne proszkowe	odporność korozyjna	lepsza odporność na ścieranie po malowaniu	●	szczotkowanie, odfuszczenie	◐	◐	●	●	●
Galwanizacja	odporność korozyjna i na ścieranie	smarność, przewodność cieplna i elektryczna	◐	odfuszczenie	◐	◐	●	~100	~20
Powlekanie bezprądowe	odporność korozyjna i na ścieranie	smarność, własności elektryczne i magnetyczne	●	odfuszczenie	◐	○	●	25	<100
Powlekanie zanurzeniowe	odporność korozyjna	Al daje odporność na utlenianie	●	platerowanie (Al); odfuszczenie (Zn)	◐	◐	◐	100	740 (Al) 450 (Zn) 850 (zółżel)
Inne metody cynkowania	odporność korozyjna	–	●	odfuszczenie	◐	◐	◐	500	450
Emaliowanie	odporność korozyjna i na ścieranie	żaroodporność, obojętność chemiczna	●	przedmuchiwanie	◐	◐	◐	200	800-900
Natryskiwanie na gorąco	odporność na zużycie	izolacja cieplna, odporność erozyjna	○	przedmuchiwanie	⊗	◐	●	500	200
Metalizowanie natryskowe	odporność na zużycie	odporność korozyjna	○	przedmuchiwanie	⊗	◐	◐	●	–
CVD	odporność na zużycie i na korozję	–	○	specjalne	○	○	⊗	2000	>1200
PACVD	odporność na zużycie i na korozję	–	●	specjalne	○	○	●	10	>600
PVD	odporność na zużycie i na korozję	–	●	specjalne	○	◐	●	10	>500
PAPVD	odporność na zużycie i na korozję	bariera cieplna, odporność erozyjna, własności magnetyczne i elektryczne	●	specjalne	○	◐	●	25	>500

Proces	Podstawowe polepszone własności	Dodatkowe korzystne własności	Zachowanie wymiarów	Przygotowanie powierzchni	Koszt	Możliwość zastosowania	Zniekształcenie	Limit grubości, $\mu\text{m}$	Temperatura podłoża, $^{\circ}\text{C}$
Platerowanie przez walcowanie	odporność korozyjna	–	●	szczotkowanie	●	⊗	●	●	20
Powlekanie chemiczne konwersyjne	odporność korozyjna i na zużycie	smarność	●	obróbka skrawaniem	●	○	●	700	80
Nawęglanie	odporność na zużycie	wytrzymałość zmęczeniowa	○	obróbka skrawaniem	●	◐	◑	2000	825÷950
Węglazotowanie wysokotemperaturowe	odporność na zużycie	–	○	obróbka skrawaniem	●	◐	◑	750	800÷870
Azotowanie	odporność na zużycie	wytrzymałość zmęczeniowa	●	obróbka skrawaniem	●	◐	●	500	500÷590
Węglazotowanie niskotemperaturowe	odporność na zużycie	anty scuffing	●	obróbka skrawaniem	●	◐	●	250	540÷600
Borowanie	odporność na zużycie	twardość na gorąco	●	obróbka skrawaniem	◑	◐	◑	25	1100
Chromowanie	odporność korozyjna i na utlenianie	–	●	obróbka skrawaniem	◑	◐	◑	1000	1300
Aluminiowanie	odporność korozyjna i na utlenianie	–	●	obróbka skrawaniem	◑	◐	◑	1000	1000
Hartowanie powierzchniowe	odporność na zużycie	wytrzymałość zmęczeniowa	●	obróbka skrawaniem	●	◐	◑	5000	1000
Nagniatanie	wytrzymałość zmęczeniowa	–	●	obróbka skrawaniem	●	◐	●	250	~20

Oznaczenia: ○ bardzo dobry, tak, wysoki, ◐ średni, umiarkowany, niekiedy, ● nie, niski, żaden, nie ma, ◑ dobry, ◒ ograniczony, ⊗ różny.