

3. Zakres i teza pracy

3.1. Ustalenie zakresu pracy metodami badań materiałoznawczo-heurystycznych

We wstępnym etapie planowania zakresu badawczego niniejszej rozprawy, w kontekście konieczności wyboru szczegółowej tematyki badawczej z bardzo obszernego zakresu, posłużono się nowatorską analizą wyboru technologii wykorzystującą do złożonej oceny macierze dendrologiczne [2-4, 132-138]. Ponadto w celu potwierdzenia słuszności wyboru materiału badawczego (podłoża) opisywanego w niniejszej pracy, jakim były odlewnicze stopy magnezu Mg-Al-Zn, wykonano analizę wyboru materiału podłoża stosując macierz dendrologiczną, rozpatrując jedynie trzy grupy najczęściej stosowanych materiałów konstrukcyjnych, mianowicie stal, stopy aluminium i opisywane stopy magnezu.

Z uwagi na ograniczenia zarówno sprzętowe jak i czasowe, nierealne jest objęcie szczegółowymi badaniami, zwłaszcza eksperymentalnymi, wszystkich możliwych rozwiązań, dlatego tak ważnym aspektem na etapie planowania eksperymentu wydaje się być wykorzystanie istniejących metod zarządczych w tym również, koncepcji metodologicznej zintegrowanego komputerowo prognozowania rozwoju (wg. A.D. Dobrzańskiej-Danikiewicz), w celu dokonania wyboru w pełni zobiektywizowanego. O celowości zastosowanej techniki może świadczyć fakt, że z powodzeniem została ona zaimplementowana w różnych obszarach inżynierii materiałowej, w tym również inżynierii powierzchni, tj. do analizy: grup protez stomatologicznych, w tym protez konwencjonalnych klasycznych i podścielanych miękkim materiałem, protez utrzymywanych na jednym lub dwóch implantach różniących się ponadto typem złączy [139]; porównawczej postaci geometrycznych wewnątrzustrojowych protez przelętku [140]; perspektyw związanych z wytwarzaniem, charakterystyką oraz modelowaniem struktury, własności i technologii wytwarzania nowej generacji wysoko innowacyjnych rozwiniętych porowatych i kompozytowych funkcjonalnych materiałów nanostrukturalnych z nanowłóknami [141]; obróbki laserowej stopowych stali narzędziowych do pracy na gorąco; fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) powłok na stopach miedzi z cynkiem; wybranych technologii obróbki cieplno-chemicznej stali; nakładania powłok PVD/CVD na spiekane materiały narzędziowe; teksturowania krzemu polikrystalicznego do celów fotowoltaiki; wytwarzania spiekanych materiałów gradientowych klasyczną metodą metalurgii proszków; wybranych technologii modyfikacji polimerowych warstw wierzchnich [85].

W pierwszym kroku podjętych badań materiałoznawczo-heurystycznych należy wyodrębnić spośród wszystkich dostępnych materiałów konstrukcyjnych oraz w następnym etapie technologii ich obróbki kilka jednorodnych grup, aby poddać je planowanym badaniom o charakterze eksperymentalno-porównawczym. Do określenia zobiektywizowanych wartości przypisanych poszczególnym wyodrębnionym materiałom oraz technologiom ich obróbki, wykorzystano dendrologiczną macierz wartości technologii.

Podstawą wykorzystanej metodologii zintegrowanego komputerowo prognozowania rozwoju w prezentowanych macierzach była powszechnie znana wiedza dotycząca nauk o zarządzaniu metodami tzw. portfelowymi (oferowanymi klientowi przez przedsiębiorstwo), pozwalająca w graficzny sposób prezentować wyniki analiz porównawczych. W prowadzonych badaniach heurystycznych do oceny poszczególnych obszarów tematycznych, pod kątem ich wartości i siły oddziaływania na otoczenie, zastosowano uniwersalną skalę stanów względnych będącą jednobiegunową skalą dodatnią bez zera, gdzie 1 to ocena minimalna, a 10 wybitnie wysoka [2-4, 132-138]. Dendrologiczna macierz wartości pozwala w stosunkowo prosty sposób zobrazować wyniki oceny poszczególnych grup materiałów i w dalszym etapie technologii ich obróbki pod kątem potencjału, stanowiącego rzeczywistą obiektywną wartość analizowanego obszaru, tzw. twarde, wymierne cechy i atrakcyjności, odzwierciedlającej subiektywne postrzeganie danego zakresu wśród jej potencjalnych użytkowników, tzw. miękkie własności [2-4, 132-138]. Potencjał danej grupy prezentowany na osi poziomej jest wynikiem analizy wielokryterialnej dokonanej na podstawie oceny eksperckiej oraz szeroko zakrojonej wiedzy literaturowej, uwzględniającej w odpowiednich proporcjach potencjał: kreatywny, aplikacyjny, jakościowy, rozwojowy i techniczny. Na osi pionowej przedstawiono znaczenie atrakcyjności danej grupy, będące średnią ważoną oceny eksperckiej oraz danych literaturowych z zakresu badawczego dokonanych na podstawie kryteriów szczegółowych odpowiadających atrakcyjności gospodarczej, ekonomicznej, humanistycznej, przyrodniczej i systemowej. W zależności od oceny poziomu potencjału i atrakcyjności, które określono w ramach oceny eksperckiej i literaturowej, zarówno każdy z analizowanych materiałów konstrukcyjnych, jak i poszczególne technologie inżynierii powierzchni, umieszczono w jednej z ćwiartek macierzy dendrologicznej.

W macierzy dendrologicznej do oceny przydatności materiału i technologii wyróżniono cztery ćwiartki, tj.: pierwsza ćwiartka wyróżnia się ograniczonym potencjałem i dużą atrakcyjnością; druga ćwiartka opisuje najlepszą możliwą sytuację, gwarantującą przyszły sukces, w której badana dziedzina charakteryzuje się zarówno dużym potencjałem, jak i dużą

atrakcyjnością; trzecia ćwiartka charakteryzuje przedział o ograniczonym potencjale i atrakcyjności, w którym przyszły sukces jest mało prawdopodobny lub niemożliwy; czwarta ćwiartka to pole o ograniczonej atrakcyjności i dużym potencjale pozwalające przy zastosowaniu odpowiedniej strategii uzyskać silną pozycję.

Badania technologii obróbki zastosowanych stopów zawężono jedynie do obszaru inżynierii powierzchni, ponieważ szeroki wachlarz dostępnych rodzajów powłok oraz metod kształtowania struktury i własności warstwy powierzchniowej materiałów inżynierskich, w tym również stopów magnezu pozwala w precyzyjny i kompleksowy sposób zaprojektować najkorzystniej zestawione własności rdzenia i warstwy wierzchniej wytworzonego elementu.

Do określenia wartości poszczególnych grup materiałów oraz w drugim etapie technologii ich obróbki powierzchniowej, zastosowano metodę punktacji ważonej w celu oceny porównawczej, zmierzającej do kwalifikacji przydatności poszczególnych grup materiałów i technologii w kontekście relacji między nimi [2-4, 132-138]. Szczegółowe kryteria oceny atrakcyjności i potencjału rozpatrywanych obszarów prezentowanych w rozprawie przedstawiono w tablicach 1 i 3. Zestawionym kryteriom przypisano określone wagi, a następnie

Tablica 1. Szczegółowe kryteria oceny potencjału i atrakcyjności grup materiałów poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym

Lp.	Potencjal	Waga
Kryterium 1	Mała gęstość materiału	0,4
Kryterium 2	Zdolność materiału do tłumienia drgań	0,1
Kryterium 3	Dobre własności odlewnicze	0,1
Kryterium 4	Wysokie własności mechaniczne i dobra spawalność	0,2
Kryterium 5	Wysoka odporność korozyjna	0,2
Lp.	Atrakcyjność	Waga
Kryterium 1	Dostępność półproduktu (surowca, pierwiastka)	0,4
Kryterium 2	Podatność materiału do ponownego przetwarzania-recykling	0,1
Kryterium 3	Niskie koszty produkcyjne oraz cena finalna wytworzonego materiału	0,2
Kryterium 4	Mały stopień skomplikowania technologii produkcji	0,1
Kryterium 5	Różnorodność stosowanych technologii wytwarzania elementów i półproduktów z danego materiału oraz mnogość możliwych do zaimplementowania technologii obróbki (cieplna, plastyczna, powierzchniowa)	0,2

obliczono wartości wagone i ich sumę, będące podstawą analizy porównawczej, co przedstawiono w tablicach 2 i 4. Następnie wieloaspektowe wyniki zwizualizowano przy pomocy dendrologicznych macierzy wartości badanego obszaru (rys. 13, 14). Wykonana analiza preferencji jednoznacznie wskazuje, że najwyższą ocenę wagoną, wzięwszy pod uwagę przyjęte kryteria w grupie materiałów, otrzymują stopy magnezu, które w szerokim zakresie spełniają wymagania i oczekiwania wobec nowoczesnych materiałów inżynierskich, narzucone przez wciąż zmieniające się otoczenie, oznaczone na rysunku 13 jako M_1 . Badania potwierdzają również, że stopy aluminium charakteryzują się wysokim poziomem atrakcyjności.

Natomiast w grupie technologii najwyższe noty (druga ćwiartka) otrzymują technologie laserowe oraz metody PVD i CVD, oznaczone na rysunku 14 jako T_1 , T_2 i T_3 , wytypowane jako najbardziej predysponowane technologie obróbki powierzchniowej stopów magnezu, znacznie przewyższające ocenami pozostałe analizowane metody pokrywania. Pozostałe techniki oceniono na poziomie ćwiartki trzeciej lub pierwszej co może świadczyć, w przypadku technologii z obszaru trzeciej ćwiartki o powolnym wypieraniu tych metod przez nowsze bardziej ekologiczne i uniwersalne techniki. Natomiast w przypadku technologii, które zlokalizowano w obszarze pierwszym należy sądzić, że wymagają one dalszych badań i nakładów umożliwiających im potencjalny rozwój. Jedynym odstępstwem od założeń mogą być technologie nakładania warstw malarskich, które z reguły mieszczą się w kwadracie czwartym, czyli w odniesieniu do malowania, technologia jest nieatrakcyjna, ale powszechnie stosowana z uwagi na jej nieskomplikowany mechanizm nakładania warstw i niski koszt aplikacyjny. Niemniej jednak według postawionych kryteriów potencjału i atrakcyjności, w odniesieniu do przyszłych zastosowań aplikacyjnych, charakterystycznych dla użytych materiałów podłoża (stopów magnezu), techniki pokryć malarskich zakwalifikowano do ćwiartki trzeciej.

Wstępnie dokonana analiza wskazuje na celowość badania technologii obróbki laserowej (T_3) oraz nanoszenia powłok w procesach fizycznego osadzania z fazy gazowej PVD (T_1) oraz chemicznego osadzania z fazy gazowej CVD (T_2) na podłożu z odlewniczych stopów magnezu (wybrano stopy Mg-Al-Zn) jako jednych z najbardziej rozwojowych obszarów inżynierii powierzchni stopów metali lekkich (rys. 14). Z tych powodów wyselekcjonowano zakres materiałów i technologii stanowiących zakres niniejszego opracowania. Wytypowane technologie – T_1 , T_2 , T_3 szczegółowo scharakteryzowano w kolejnych podrozdziałach niniejszej rozprawy.

Tablica 2. Wyniki analizy wielokryterialnej grup materiałów poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym

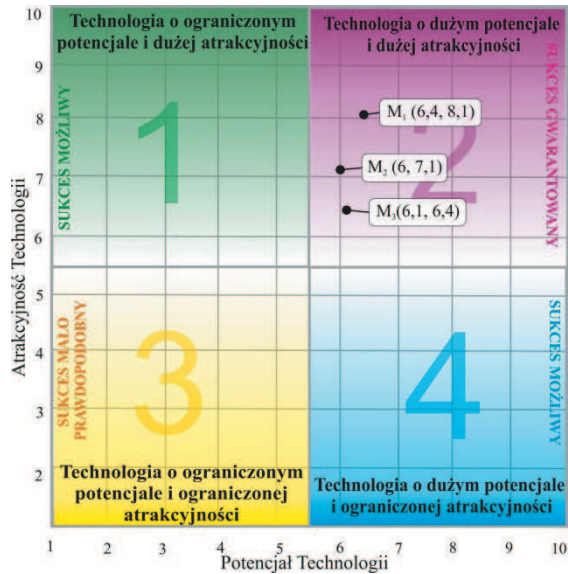
Symbol	Grupa materiałów	Potencjal						Atrakcyjność					
		Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5	Średnia ważona	Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5	Średnia ważona
M ₁	Stopy magnezu	4	0,8	0,8	0,6	0,2	6,4	4	0,9	1,2	0,4	1,6	8,1
M ₂	Stopy aluminium	2,8	0,5	0,7	0,8	1,2	6	2,8	0,7	1,2	0,8	1,6	7,1
M ₃	Stale	1,6	0,4	0,5	1,8	1,8	6,1	2	0,4	1,6	0,8	1,6	6,4

Tablica 3. Szczegółowe kryteria oceny potencjału i atrakcyjności grup technologii poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym

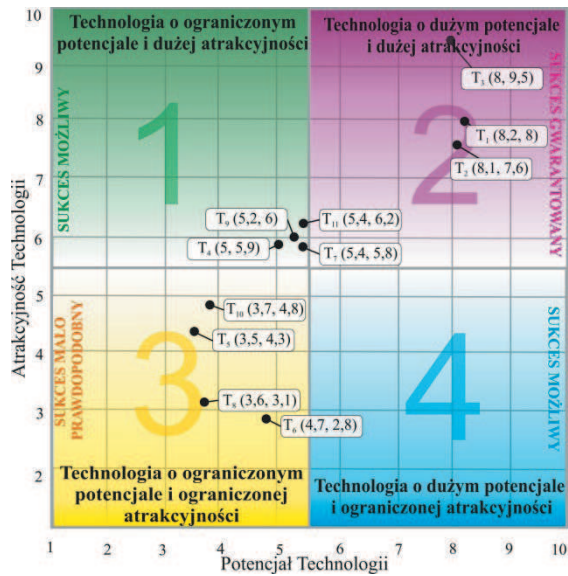
Lp.	Potencjal	Waga
Kryterium 1	Możliwość otrzymania złożonych własności i struktury powierzchni (wieloskładnikowe, wielowarstwowe, wielofazowe, gradientowe, kompozytowe, metastabilne, nanokrystaliczne)	0,3
Kryterium 2	Duże możliwości wyboru materiału powierzchni, a więc szeroka rozpiętość własności powierzchni	0,2
Kryterium 3	Możliwość uzyskania twardych warstw powierzchniowych o specjalnych własnościach ochronnych (antykorozyjne, trybologiczne)	0,2
Kryterium 4	Uzyskanie warstw powierzchniowych o dobrej przyczepności do materiału podłoża	0,2
Kryterium 5	Możliwość otrzymania w jednym procesie technologicznym powierzchniowych warstw gradientowych o dowolnym składzie chemicznym i strukturze	0,1
Lp.	Atrakcyjność	Waga
Kryterium 1	Ekologiczna czystość procesu obróbki powierzchniowej (brak szkodliwych produktów reakcji chemicznych i konieczności ich utylizacji)	0,2
Kryterium 2	Możliwość wytworzenia warstw powierzchniowych o własnościach niemożliwych do otrzymania innymi metodami	0,3
Kryterium 3	Szerokie możliwości dalszego rozwoju technologii	0,2
Kryterium 4	Możliwość pełnej automatyzacji i robotyzacji procesu obróbki powierzchniowej	0,1
Kryterium 5	Konieczność zastosowania dużej precyzji prowadzenia procesów obróbki powierzchniowej	0,2

Tablica 4. Wyniki analizy wielokryterialnej grup technologii poddanych badaniom materiałoznawczo-heurystycznym

Symbol	Grupa technologii	Potencjal					Atrakcyjność						
		Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5	Średnia ważona	Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Kryterium 4	Kryterium 5	Średnia ważona
T ₁	Techniki PVD, w tym również Cathodic Arc Deposition	2,7	1,6	1,8	1,2	0,9	8,2	1,8	2,7	1,6	0,9	1	8
T ₂	Techniki CVD, w tym również Plasma Assisted CVD	2,7	1,6	1,8	1,2	0,8	8,1	1,4	2,7	1,6	0,9	1	7,6
T ₃	Techniki laserowe przetapiania/stopowania/wtapienia	2,7	1	1,8	2	0,5	8	1,8	2,7	2	1	2	9,5
T ₄	Natryskiwanie cieplne	1,5	1	1,4	0,6	0,5	5	1,2	1,8	0,6	0,9	1,4	5,9
T ₅	Procesy anodowania	0,6	0,2	1,2	1,2	0,3	3,5	1,2	1,5	0,2	0,4	1	4,3
T ₆	Technologie galwaniczne	0,9	1	1,2	1,4	0,2	4,7	0,4	0,9	0,2	0,9	0,4	2,8
T ₇	Ablacja laserowa-PLD	1,5	1	1	1,4	0,5	5,4	1,6	1,2	1,2	0,6	1,2	5,8
T ₈	Nakładanie powłok malarskich	0,3	0,8	1	1,4	0,1	3,6	0,6	0,6	0,2	0,9	0,8	3,1
T ₉	Implantacja jonów	1,5	1	1	1,2	0,5	5,2	1,4	1,8	1,2	0,6	1	6
T ₁₀	Azotowanie jarzeniowe	0,6	0,4	1,2	1,2	0,3	3,7	0,8	1,8	0,6	0,8	0,8	4,8
T ₁₁	Technologie hybrydowe (multipleksowe)	1,5	1	1,2	1,2	0,5	5,4	1	2,7	1,2	0,5	0,8	6,2



Rysunek 13. Dendrologiczna macierz wartości prezentująca pozycjonowanie typowanych grup materiałów poddanych badaniom zintegrowanego komputerowo prognozowania rozwoju



Rysunek 14. Dendrologiczna macierz wartości prezentująca pozycjonowanie typowanych grup technologii poddanych badaniom zintegrowanego komputerowo prognozowania rozwoju

3.2. Teza i główne cele pracy

Wykonane badania własne oraz szerokie studium literaturowe z tego zakresu wskazują na fakt, że nadanie nowych cech eksploatacyjnych i użytkowych powszechnie stosowanym materiałom, w tym również analizowanym stopom Mg-Al-Zn bardzo często uzyskuje się poprzez obróbkę cieplną, tj. umocnienie wydzieleniowe i/lub obróbkę powierzchniową wskutek nanoszenia lub wytworzenia na powierzchni obrabianych materiałów powłok lub warstw w procesach inżynierii powierzchni predysponowanych do danej grupy materiałów.

Własności mechaniczne oraz odporność na zużycie ścierne i korozyjne odlewniczych stopów magnezu Mg-Al-Zn, można kształtować przez umocnienie roztworowe atomami obcych pierwiastków rozpuszczonych w osnowie oraz poprawnie zastosowanym utwardzaniem wydzieleniowym (przesycanie i starzenie) będące gwarantem wystąpienia w całej objętości wewnątrz strukturalnych przemian fazowych i procesów wydzieleniowych, polegających na wytworzeniu w stopie dyspersyjnych wydzieleni, blokujących przemieszczanie się dyslokacji.

Pierwszy etap przesycania polega na nagraniu stopu i szybkim chłodzenie zatrzymującym nadmiar składnika stopowego w roztworze, dzięki czemu uzyskuje się przesycony roztwór stały. Stop posiadający dużą nadwyżkę energii swobodnej, dąży do jej zmniejszenia co może dokonać się jedynie w drodze wydzielenia nadmiaru składnika przesycającego. Starzenie w temperaturze podwyższonej pozwala na precyzyjne sterowanie procesem wydzielenia za pomocą czasu i temperatury starzenia, dzięki czemu można uzyskać strukturę z drobnymi wydzieleniami, równomiernie rozłożonymi w całej objętości ziarna.

Ponadto zwiększenie twardości oraz odporności głównie korozyjnej, odporności na ścieranie i zmęczenie cieplne możliwe jest do osiągnięcia dzięki wytworzeniu jednorodnej chemicznie, drobnokrystalicznej warstwy wierzchniej bez zmiany składu chemicznego materiału przy użyciu lasera dużej mocy lub wskutek zastosowania prostych jednowarstwowych lub jednoskładnikowych powłok wytworzonych metodami odpowiednio fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej PVD lub CVD. Jeszcze korzystniejsze efekty w postaci zwiększenia wspomnianych własności użytkowych i eksploatacyjnych można uzyskać w wyniku wtapiania cząstek twardych faz węglików i tlenków w uprzednio obrobioną cieplnie warstwę wierzchnią materiału, w celu wytworzenia drobnokrystalicznej, quasi- kompozytowej warstwy wierzchniej oraz wskutek występującego w trakcie wtapiania laserowego mechanizmu szybkiej mikro- i/lub nanokrystalizacji RSP (ang. Rapid Solidification Processing). Możliwe jest również wytworzenie na powierzchni uprzednio obrobionego cieplnie materiału, hybrydowych warstw

PVD i CVD o złożonym składzie chemicznym, złożonych z gradientowej warstwy przejściowej oraz wieloskładnikowej warstwy zewnętrznej, uzyskanych dzięki odpowiedniej optymalizacji warunków procesu ich nanoszenia, wpływających na strukturę i własności powłok, tj. warunków napięciowo-prądowych, temperatury nanoszenia oraz ciśnienia roboczego gazów.

Potwierdzenie i charakterystyka wspomnianych mechanizmów i zależności ma nie tylko znaczenie poznawcze, ale również pozwala określić szersze perspektywy metodologiczne i aplikacyjne prezentowanych odlewniczych stopów magnezu nazywanych często metalem przyszłości, co ma szczególne znaczenie w czasie, gdy wyraźnie mówi się o konieczności dostarczania materiałów inżynierskich na żądanie. Powyższe przesłanki pozwoliły na sformułowanie następującej tezy pracy:

Zastosowanie obróbki powierzchniowej, w tym fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej PVD i CVD oraz obróbki laserowej przy wykorzystaniu technologii wtapiania w powierzchnię stopów Mg-Al-Zn twardych cząstek ceramicznych powoduje poprawę twardości oraz odporności na zużycie ściernie i korozyjne badanych stopów.

Natomiast głównym celem wykonanych badań jest opracowanie metodologii badawczej oraz technologii obróbki odlewniczych stopów magnezu Mg-Al-Zn z wykorzystaniem nowoczesnych technik inżynierii powierzchni oraz wskazanie różnic w mechanizmach decydujących o kształtowaniu własności tych stopów zarówno w rdzeniu, jak i w warstwie powierzchniowej.

W ramach niniejszej rozprawy przeprowadzono badania i analizy, obejmujące następujące zagadnienia:

- Charakterystykę przemian fazowych i procesów wydzieleniowych zachodzących podczas obróbki cieplnej w badanych odlewniczych stopach Mg-Al-Zn o zróżnicowanym stężeniu składników stopowych, zapewniających uzyskanie pożądanej struktury oraz ich wpływu na strukturę, własności wytrzymałościowe, jak również odporność na korozję tych materiałów;
- Porównanie wpływu obróbki powierzchniowej na strukturę i własności stopów Mg-Al-Zn, wykonanej z wykorzystaniem metod PVD w procesie katodowego odparowania łukiem elektrycznym, CVD w procesie chemicznego osadzania z fazy gazowej ze wspomaganiami plazmowym oraz w procesie laserowego wtapiania twardych cząstek ceramicznych przy użyciu lasera diodowego dużej mocy (HPDL) w powierzchnię obrabianych materiałów w odniesieniu do stanu wyjściowego stopów umocnionych wydzieleniowo;
- Ustalenie korelacji pomiędzy występującymi mechanizmami strukturalnymi, a własnościami mechanicznymi i użytkowymi badanych stopów Mg-Al-Zn;

- Wykonanie analiz komputerowych, przy wykorzystaniu sieci neuronowych umożliwiających wyznaczenie i/lub predykcję struktury i własności mechanicznych stopów Mg-Al-Zn na podstawie temperatury przemian fazowych, optymalizację warunków obróbki cieplnej, wyznaczenie zakresu chropowatości i modelowanie własności mechanicznych powierzchni stopów magnezu obrobionych przy użyciu wtapienia laserowego oraz określenie odporności na ścieranie, twardości i chropowatości wytworzonych powłok PVD i CVD.