

9. Podsumowanie i wnioski

W odpowiedzi na nowe wymagania stawiane przez dzisiejszego użytkownika i zgodnie z obecnymi tendencjami do eliminowania technologii zanieczyszczających środowisko naturalne poszukuje się rozwiązań uniwersalnych, łączących tani, lekki materiał podłoża o możliwie najlepszych własnościach z odpowiednio dobraną technologią obróbki jego powierzchni. Ponieważ koszty regeneracji liczone jako suma kosztów materiałów, robocizny, energii i kosztów ogólnych, stanowią kilka do kilkudziesięciu procent wartości elementu nowego można wnioskować, że osiągnięte efekty ekonomiczne po uwzględnieniu zysku z zastosowania warstwy lub powłoki o lepszych własnościach użytkowych w porównaniu do własności materiału niepokrytego mogą być bardziej opłacalne. Właściwa interpretacja wzajemnych zależności pomiędzy własnościami i strukturą warstwy wierzchniej i podłoża oraz otaczającym środowiskiem pozwala w szerszej perspektywie dokonać analizy i precyzyjnej identyfikacji mechanizmów niszczenia, jakie występują zarówno na powierzchni jak i w rdzeniu materiału. Kluczowym zagadnieniem wydaje się być również zapewnienie jednoczesnego rozwoju zarówno technologii wytwarzania i obróbki konstrukcyjnych materiałów lekkich, w tym w szczególności stopów magnezu oraz technologii kształtowania i zabezpieczania ich powierzchni, co w konsekwencji pozwoli na zachowanie równowagi pomiędzy nowoczesnym materiałem podłoża i powłoką nowej generacji.

Ogólnie dostępne obszerne studia literaturowe dotyczące magnezu i jego stopów, cytowane w niniejszej rozprawie [1-74, 78, 83, 91, 92, 96-100, 136, 179-190, 193-196], jak również organizowane corocznie konferencje i sympozja poświęcone tematyce wytwarzania i obróbki materiałów lekkich, wskazują że stopy magnezu znajdują coraz większą rzeszę zwolenników zarówno wśród producentów jak i użytkowników. Taki trend potwierdzają również dane United States Geological Survey (USGS) Minerals Resources, według której światowa roczna produkcja pierwotnego magnezu, którego podstawowym źródłem są rudy dolomitowe, według stanu na 31 grudnia 2010 roku, wyniosła 757 tys. ton (metric tons), wzrastając w ciągu 5 lat o ponad 12%, gdy natomiast jeszcze w roku 2002 wynosiła tylko 448 tys. ton (metric tons). Podobnie, jak w przypadku stali, światowym liderem są Chiny z roczną produkcją magnezu pierwotnego 654 tys. ton (metric tons) na koniec roku 2010 i z blisko 85% udziałem w światowej produkcji. Jak podaje w połowie listopada 2011 roku China Non-Ferrous Metals Industry Association, w pierwszych 3 kwartałach 2011 roku nastąpił dalszy 3% wzrost produkcji

magnezu pierwotnego do ponad 503,7 tys. ton (metric tons) w okresie od 1 stycznia do 30 września 2011 roku.

Stopy magnezu, które z powodzeniem od dawna stosowane są w różnych gałęziach przemysłu cechujące się połączeniem niskiej gęstości i dużej wytrzymałości. Powyższe cechy w dużej mierze przyczyniły się do zastosowania stopów magnezu na szybko poruszające się części, w miejscach gdzie pojawiają się gwałtowne zmiany prędkości i w produktach gdzie wymagane jest obniżenie masy finalnej produktu. Największe zapotrzebowanie na stopy magnezu wykazywał i wykazuje również obecnie przemysł samochodowy. W seryjnie produkowanych samochodach masa elementów ze stopów magnezu mieści się w zakresie od 7 do 21 kg. Dążenie współczesnych projektantów do tworzenia konstrukcji pojazdów jak najlżejszych, a co za tym idzie o możliwie małym zużyciu paliwa, przyczyniło się do wykorzystania stopów magnezu, jako tworzywa konstrukcyjnego na koła samochodowe, tłoki silników, obudowy skrzyni biegów i sprzęgła, szkielety okien dachowych, ramy i konstrukcje drzwi, pedały, kanały ssące, kolektory, obudowy wału napędowego, mechanizmy różnicowe, wsporniki, radiatory i inne. Odlewane elementy wytwarzane ze stopów magnezu znajdują powszechne zastosowanie również w elektronice (m.in. obudowy laptopów, PDA, telefonów komórkowych, GPS, kamer termowizyjnych, modemów przemysłowych pokrywy ekranów LCD, obramowania cyfrowych ramek foto), w przemyśle lotniczym, elektrotechnice oraz na elementy budowlane, a także w przemyśle zbrojeniowym, optycznym, sportowym i innych.

Pomimo licznych niezaprzeczalnych zalet, jakimi charakteryzują się stopy magnezu posiadają one również słabe strony, tj.: niską twardość i odporność na ścieranie i korozję w odniesieniu do alternatywnych materiałów inżynierskich, co w efekcie końcowym znacznie zawęży zakres ich zastosowań [55-62]. W ostatnich latach postęp jaki się dokonał w zakresie wytwarzania i inżynierii powierzchni materiałów lekkich pozwala skutecznie polepszyć własności zarówno rdzenia jak i warstwy wierzchniej stopów magnezu [3-54, 57, 61-67, 92, 96-98, 191, 197-205].

Obecnie światowe tendencje rozwoju technologii kształtowania warstw wierzchnich materiałów lekkich koncentrują się w głównej mierze na poznawaniu i pogłębieniu wiedzy zakresu otrzymywania i nakładania powłok z wykorzystaniem wiązki laserowej oraz technik fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej [4]. Zauważalne są również trendy wykorzystujące techniki multipleksowe łączące charakterystyczne cechy kilku metod. Cechy obróbki laserowej takie jak bezkontaktowość, selektywność oraz możliwość pełnej automatyzacji, pozwalają na precyzyjną obróbkę wybranych fragmentów podłoża, przy dokładnie regulowanej

głębokości i szerokości oddziaływania wiązki laserowej. Podobnie nanoszenie powłok w procesach PVD i CVD jest jednym z bardziej efektywnych sposobów nanoszenia powłok zapewniających oprócz wymaganych własności użytkowych, możliwość kształtowania walorów estetycznych przy niezaprzeczalnym aspekcie ekologicznym – technologii bezodpadowej, spełniającej wymagania czystej produkcji.

Niemniej jednak pomimo faktu, iż oddziaływanie promieniowania laserowego z materiałem oraz znajomość zjawisk zachodzących w trakcie nanoszenia powłok metodami PVD i CVD są od wielu lat intensywnie badanymi i rozwijanymi zagadnieniami to opracowywanie nowoczesnych, specjalistycznych technologii z tego zakresu umożliwiających wprowadzenie na rynek nowej generacji materiałów wymaga wciąż wiele wysiłku i obszernych badań laboratoryjnych. Taki stan rzeczy związany jest głównie z bogactwem zjawisk fizycznych i chemicznych towarzyszących wspomnianej obróbce powierzchniowej. Podjęcie tego problemu w Polsce związane jest z nieustannym dążeniem do rozwijania i aplikacji nowoczesnych metod wytwarzania materiałów konstrukcyjnych, w szczególności kształtowania warstw powierzchniowych w wielu przypadkach odpowiedzialnych za własności końcowe rozpatrywanego elementu.

Wyniki badań własnych oraz studiów literaturowych potwierdzają, że struktura badanych stopów, a także uzyskane własności mechaniczne, odporność na ścieranie i odporność na działanie czynnika korozyjnego są zróżnicowane w zależności od stężenia składników stopowych, a w szczególności aluminium zmieniającego się w zakresie od 3 do 12%, a także od zastosowanej obróbki cieplnej i powierzchniowej materiału (rys. 25-130 i tabl. 12-13). Wykonana obróbka cieplna, złożona z przesycań z chłodzeniem w wodzie, a także ze starzenia z chłodzeniem w powietrzu, powoduje umocnienie stopów $\text{MCMgAl}_{12}\text{Zn}_1$, $\text{MCMgAl}_9\text{Zn}_1$, $\text{MCMgAl}_6\text{Zn}_1$ magnezu zgodnie z mechanizmem umocnienia wydzieleniowego wywołanym poprzez hamowanie poślizgów dyslokacji wskutek oddziaływania pól naprężeń równomiernie zlokalizowanych wydzieleni fazy γ - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, co zgodnie z oczekiwaniami [9-16, 56, 58-62] powoduje dodatkowy wzrost własności wytrzymałościowych, odporności na zużycie ściernie, a także odporności na działania czynnika korozyjnego. Dyspersyjne wydzielenia znajdujące się w roztworze stałym w starzonych stopach magnezu mają w większości badanych przypadków uprzywilejowaną orientację krystalograficzną z osnową. Część z nich (rys. 33, 34) wykazuje relacje:

$$(1\bar{1}01)_\alpha - \text{Mg} \parallel (10\bar{1})\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$$

$$[11\bar{2}0]_\alpha - \text{Mg} \parallel [111]\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$$

zgodne z podanymi przez S. Guldburga i N. Ryuma [179] dla występujących między innymi w strukturze eutektycznej stopów Mg zawierających 33% Al. Wydzielenia fazy γ -Mg₁₇Al₁₂ mają najczęściej kształt pręcików oraz płytek, a dominującym kierunkiem ich wzrostu są kierunki z rodziny $\langle 110 \rangle$ α -Mg (rys. 33, 34).

Dodatkową poprawę własności mechanicznych i użytkowych można także uzyskać w wyniku umocnienia roztworu stałego cząstkami faz dyspersyjnych o kontrolowanej wielkości wprowadzonych w warstwę wierzchnią analizowanych stopów w procesie wtapiania laserowego oraz poprzez rozdrobnienie ziarna obszaru przypowierzchniowego obrabianego materiału [3, 4, 20-25, 30, 32, 33, 61, 65, 78, 200-202]. Uzyskanie efektu znacznego rozdrobnienia ziarna, w wyniku mikrokryształizacji możliwe jest dzięki szybkiemu odprowadzaniu ciepła z jeziora przetopienia przez podłoże magnezowe o dużej pojemności cieplnej i bardzo dobrym przewodnictwie cieplnym, co z kolei skutkuje wzrostem powierzchni granic ziarn stanowiących trwałą przeszkodę dla spiętrzających się na nich dyslokacji i umocnieniem materiału.

Struktura materiału krzepnącego po wtapianiu laserowym charakteryzuje się budową strefową o zróżnicowanej morfologii związanej z krystalizacją stopów magnezu (rys. 39-61). Obserwuje się charakterystyczną dla tych obszarów wielokrotną zmianę kierunku wzrostu kryształów. W obszarze znajdującym się na granicy między fazami stałą i ciekłą, występują niewielkie dendryty, których główne osie zorientowane są zgodnie z kierunkami odprowadzania ciepła (rys. 53, 57, 58). Wyniku obserwacji metalograficznych potwierdzono, że struktura wytworzonych warstw kompozytowych jest wolna od wad z wyraźnym rozdrobnieniem ziarn materiału rodzimego zawierająca głównie równomiernie rozmieszczone dyspersyjne cząstki zastosowanego węgliku TiC, WC, SiC lub tlenku Al₂O₃, co również potwierdzono badaniami rentgenograficznymi i elektronograficznymi. Wyjątek od reguły stanowią stopy z laserowo wtopionymi cząstkami węgliku wanadu, których udział w strefie przetopienia jest nieznacznym (rys. 43-48, 50-61). Podczas wtapiania laserowego następuje silna cyrkulacja ciekłego metalu, a po przejściu wiązki laserowej gwałtowne krzepnięcie. Grubość warstwy wierzchniej kształtowanej laserowo odgrywa ważną rolę w określaniu własności, okresu użytkowania i końcowego zastosowania otrzymanego materiału [206].

W warstwie wierzchniej badanych odlewniczych stopów magnezu występują trzy strefy: strefa bogata w nierozpuszczone cząstki wtopione w warstwę wierzchnią na powierzchni stopów magnezu, strefa przetopienia (SP) i strefa wpływu ciepła (SWC). Zarówno strefa SP jak i SWC

w zależności od stężenia aluminium w osnowie magnezowej, użytej mocy lasera oraz proszku ceramicznego mają różną grubość, a także kształt (rys. 49). Udowodniono, że wraz ze wzrostem użytej mocy lasera zwiększa się obszar występowania zarówno strefy przetopienia, jak i strefy wpływu ciepła, (rys. 43-61), a także zmienia się kształt lica ściegu co potwierdzają także studia literaturowe [206-208]. Największą grubością warstwy wierzchniej 3,59 mm charakteryzują się stopy MCMgAl12Zn1 obrabiane z mocą lasera 2,0 kW, w powierzchnię których wtopiono węgiel krzemu.

Moc lasera w zakresie 1,2-2,0 kW zapewnia możliwość uzyskania płaskich, regularnych ściegów przetopienia, o dużej gładkości powierzchni (rys. 39-48). Nieliczne nierówności i wgłębienia warstwy wierzchniej stopów Mg-Al-Zn z laserowo wtopionymi cząstkami węglików powstają w następstwie intensywnego nagrzewania powierzchni. W zależności od rodzaju podłoża, mocy lasera, szybkości wtapiania, a także zastosowanego proszku, powierzchnia, na której powstaje duży gradient napięcia powierzchniowego, jest nierównomiernie nagrzana, co ma bezpośredni wpływ na ukształtowanie się roztopionego materiału w jeziorce przetopienia. Część stopu oraz podawanych w obszar przetopienia cząstek ceramicznych odparowuje pod wpływem wysokiej temperatury panującej podczas obróbki laserowej, stąd charakterystyczne wgłębienia na powierzchni lica przetopienia. Stwierdzono również, że niezależnie od zastosowanego proszku ceramicznego, w zakresie mocy wiązki lasera od 1,2 do 2,0 kW chropowatość uzyskanych kompozytowych warstw wierzchnich zwiększa się w porównaniu do chropowatości nieobrobionej powierzchni odlewniczych stopów magnezu.

Zwiększenie trwałości eksploatacyjnej i użytkowej wykonanych elementów ze stopów Mg-Al-Zn możliwe jest również przy wykorzystaniu technik uszlachetniania ich warstwy wierzchniej w procesie osadzania z fazy gazowej, co również udowodniono w ramach obszernych badań własnych, wbrew panującej opinii, że pokrywanie stopów magnezu powłokami PVD i CVD jest niecelowe, z uwagi na ich relatywnie niewielką twardość [46-54]. Uzyskane powłoki w wybranych wariantach umocnione roztworowo, wytworzone w wyniku syntezy faz nierównowagowych (metastabilnych) o następującej konfiguracji Ti/Ti(C,N)-gradient/CrN; Ti/Ti(C,N)-gradient/(Ti,Al)N; Ti/(Ti,Si)N-gradient/(Ti,Si)N oraz powłoki Cr/CrN-gradient/CrN; Cr/CrN-gradient/TiN i Ti/DLC-gradient/DLC charakteryzują się wyraźną niejednorodnością powierzchni związaną z występowaniem w strukturze licznych mikrocząstek w kształcie kropeł wybitych z tarczy w trakcie procesu osadzania powłok, a także zagłębieniami powstałymi na skutek wypadania niektórych kropeł w trakcie krzepnięcia. Powyższy efekt

związany jest niewątpliwie z różnicami we współczynnikach przewodnictwa ciepła oraz różnicą naprężeń między utworzoną powłoką, a zastygniętymi kroplami metalu powstającymi w trakcie chłodzenia powierzchni podłoża, po zakończeniu procesu nanoszenia powłoki [105-107].

W wyniku badań fraktograficznych wykonanych w elektronowym mikroskopie skaningowym, analizowanych powłok PVD i CVD stwierdzono, że naniesione powłoki charakteryzują się jedno-, dwu-, lub wielowarstwową strukturą w zależności od zastosowanego systemu warstw, a poszczególne warstwy są równomiernie nałożone i szczelnie przylegają do podłoża i o siebie (rys. 75-80). Struktura naniesionych warstw uzależniona jest w szczególności od rodzaju i warunków procesu, a także od typu konstytuowanej powłoki. W oparciu o strukturę otrzymaną przy wykorzystaniu mikroskopu transmisyjnego prześwietleniowego i techniki pola ciemnego ustalono, że powłoki charakteryzują się zwartą budową o dużej jednorodności ziarn, a także małym rozrzucie pod względem ich wielkości mieszczącym się w przedziale od 10 do 20 nm (rys. 81-87). Jedyne odstępstwo stanowi faza TiN w powłoce Cr/CrN/TiN, której wielkość ziarn zmierzono na poziomie ~ 200 nm. W przypadku powłok DLC potwierdzono, że badana powłoka węglowa zawiera niewielkie domeny grafitowe i może być sklasyfikowana, jako częściowo zgrafityzowany materiał węglowy.

Niewielkie dyfuzyjne przemieszczanie się pierwiastków w strefie połączenia będące wynikiem implantacji jonów o dużej energii padających na spolaryzowane ujemnie podłoże oraz profilowa zmiana stężenia pierwiastków chemicznych tworzących powłoki wskazują, iż uzyskane powłoki charakteryzują się strukturą gradientową, co w przypadku powłok PVD spowodowane jest zmiennym przepływem gazów reaktywnych oraz zmianą natężenia prądu na łukowym źródle par metali w procesie katodowego odparowania łukiem elektrycznym (rys. 92, 93), co również potwierdzono w pracach [209, 210].

Projektowanie systemu podłoże-powłoka opiera się na takim doborze materiału powłokowego, aby ograniczać lub całkowicie eliminować dominujące mechanizmy zużycia, które w przypadku stopów magnezu szczególnie widoczne są w zakresie słabej odporności korozyjnej i trybologicznej. Dlatego tak ważne jest przemyślane i celowe użycie odpowiedniej technologii kształtowania warstwy wierzchniej stopów Mg-Al-Zn, predysponowanej dla danego typu zastosowania, która w efektywny sposób zwiększy trwałość elementów. Kluczowym zagadnieniem wydaje się być również korelacja pomiędzy zapotrzebowaniem, czyli precyzyjnie określoną praktyczną potrzebą, materiałem podłoża i jego własnościami, a zastosowaną techniką nakładania warstw.

Wyniki pomiarów własności mechanicznych i użytkowych próbek poddanych obróbce cieplnej i powierzchniowej potwierdzają, że zarówno zróżnicowane stężenie aluminium w osnowie stopów jak i zastosowana obróbka, wpływają na zmianę twardości, odporności na ścieranie i odporności korozyjnej badanych odlewniczych stopów magnezu. Przyczyna takiego stanu upatrywana jest w mechanizmach umocnienia badanych materiałów, umożliwiającących generowanie w materiałach krystalicznych przeszkód dla swobodnie przemieszczających się w ich strukturze dyslokacji. Poszczególne rodzaje umocnienia identyfikowane są w zakresie odpowiedniej obróbki cieplnej lub powierzchniowej analizowanych stopów, wśród których wyróżnia się umocnienie: roztworowe przez atomy aluminium, pierwiastka przesycającego oraz wydzieleniowe zachodzące w stopach po obróbce cieplnej charakteryzujące się wydzieleniem w osnowie stopów twardych faz o dużej dyspersji (γ -Mg₁₇Al₁₂), umocnienie przez rozdrobnienie ziarna i cząstkami faz dyspersyjnych, występujące w zakresie technologii laserowego wtapiania oraz w przypadku stopów pokrywanych powłokami PVD i CVD, umocnienie roztworowe nanoszonych warstw.

Wszystkie zmiany własności obrabianych powierzchniowo stopów magnezu są ściśle związane ze zmianami ich struktury, składu chemicznego i fazowego w obszarach przypowierzchniowych [3-54, 57, 61-67, 92, 96-98, 191, 197-208]. Uzyskane wyniki badań mechanicznych i użytkowych po obróbce laserowej wykazały istotne różnice w zależności od użytego, szerokiego zakresu jej warunków, zastosowanych proszków i podłoży potwierdzając, że największy przyrost twardości, mikrotwardości i odporności na ścieranie nastąpił w przypadku stopów MCMgAl3Zn1 i MCMgAl6Zn1 wzbogaconych laserowo cząstkami ceramicznymi. Ponadto wykonane analizy i przedstawione w rozprawie wyniki badań powłok wytworzonych w procesie PVD i CVD na powierzchni odlewniczych stopów magnezu, wykazują wyraźny, przekraczający 100% przyrost mikrotwardości w porównaniu do mikrotwardości materiału podłoża. Wzrost mikrotwardości powierzchni stopów magnezu w wyniku osadzania powłoki z fazy gazowej często koreluje ze wzrostem odporności na ścieranie badanych podłoży, w szczególności powłok Ti/Ti(C,N)/CrN i Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N. Niemniej jednak dążenie do podwyższenia twardości powierzchni w celu zwiększenia odporności na ścieranie badanych elementów nie zawsze jest uzasadnione, czego dobrym przykładem są również badane w pracy powłoki diamentopodobne typu DLC, nazywane często powłokami samosmarującymi. Dobre własności trybologiczne powłok DLC związane są głównie z poślizgiem, zachodzącym w warstwie przejściowej, powstającej w strefie kontaktu tarciovego, jako

konsekwencja procesów grafityzacji i utleniania, co również potwierdzają źródła literaturowe [118-120, 191, 192]. Zgodnie z zastosowanym obciążeniem 5 N, wyniki drogi tarcia dla powłok DLC kształtowały się na poziomie przewyższającym nawet 70-krotnie wyniki drogi tarcia np. dla powłoki Cr/CrN/CrN, których twardość była porównywalna z twardością powłok diamentopodobnych.

Wszystkie przedstawione zależności wskazują, że odporność korozyjna stopów magnezu zarówno po obróbce cieplnej jak i powierzchniowej jest tym większa, im niższe są wartości gęstości prądu korozji. Wynika to ze wzrostu wartości oporu polaryzacji badanego materiału, a więc z mniejszego roztwarzania anodowego powierzchni. Ponieważ badania korozyjne określające odporność stopów Mg-Al-Zn na korozję wżerową dla poszczególnych wariantów obróbki cieplnej i powierzchniowej wykonywano w różnych warunkach wyniki należy rozpatrywać osobno dla każdego rodzaju powierzchni. Jednakże ogólny zauważalny trend wynikający z wykonanych badań potwierdza, że odlewnicze stopy magnezu, w powierzchnię których wtopiono twarde cząstki drobnoziarnistych proszków charakteryzują się mniejszą odpornością na korozję wżerową w odniesieniu do stopów po zwykłej obróbce cieplnej. Zastosowanie pokryć PVD i CVD na powierzchni odlewniczych stopów magnezu może zapewnić wyższą odporność korozyjną elementów w odniesieniu do odporności korozyjnej elementów po zwykłej obróbce cieplnej, w wybranych wariantach obróbki, tj.: po naniesieniu powłoki Ti/DLC/DLC i Cr/CrN/CrN, dla wszystkich badanych podłoży oraz powłoki typu Cr/CrN/TiN na podłożu MCMgAl12Zn1 i MCMgAl19Zn1.

W celu określenia relacji pomiędzy założonymi warunkami obróbki, podłożem i uzyskanymi wynikami pomiarów, posłużono się zaprojektowanymi modelami obliczeniowymi z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, które są efektywnym narzędziem wspomagającym proces oceny własności mechanicznych i użytkowych obiektów badań. Zmiany własności, uwzględnione w modelu obliczeniowym potwierdziły zgodności modelu po symulacji z wynikami eksperymentu, dostarczając tym samym dodatkowego materiału do oceny przyczyn strukturalnych i mechanizmów ich rozwoju. Szczególnego podkreślenia wymaga aspekt praktyczny, jaki stwarzają opracowane modele, mogące z powodzeniem zastępować wymienione próby technologiczne w zakresie warunków technologicznych i składów chemicznych objętych modelowaniem.

Badania struktury, własności mechanicznych i użytkowych odlewniczych stopów magnezu po obróbce cieplnej przesycania i starzenia oraz po obróbce powierzchniowej z wykorzystaniem

metod PVD, CVD oraz technik laserowych, opisywane w niniejszej rozprawie, jak również opublikowane w trakcie realizacji projektów badawczych dotyczących omawianych zagadnień [3, 4, 20-25, 30-33, 35-37, 46-54], wskazują na użyteczność opracowanych technologii w odniesieniu do nowych możliwości aplikacyjnych np. w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym w produkcji elementów konstrukcyjnych i wyposażenia środków transportu, a także do regeneracji już wcześniej eksploatowanych elementów z odlewniczych stopów magnezu.

Na podstawie otrzymanych wyników badań eksperymentalnych oraz wykonanych analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Udowodniono postawioną tezę rozprawy habilitacyjnej wykazując, że zastosowanie obróbki powierzchniowej, w tym fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej CVD i PVD oraz obróbki laserowej przy wykorzystaniu technologii wtapiania w powierzchnię stopów Mg-Al-Zn twardych ceramicznych cząstek powoduje poprawę twardości oraz odporność na zużycie ścierne i korozyjne wytypowanych do badań stopów obrobionych cieplnie.
2. Wyniki pomiarów własności mechanicznych i użytkowych próbek poddanych obróbce cieplnej i powierzchniowej potwierdzają, że wykonana obróbka cieplna, złożona z przesyłania z chłodzeniem w wodzie, a także ze starzenia z chłodzeniem w powietrzu, powoduje umocnienie MCMgAl₁₂Zn₁, MCMgAl₉Zn₁, MCMgAl₆Zn₁ odlewniczych stopów magnezu zgodnie z mechanizmem umocnienia wydzieleniowego wywołanym poprzez hamowanie poślizgów dyslokacji wskutek oddziaływania pól naprężeń równomiernie zlokalizowanych wydzieleni fazy γ -Mg₁₇Al₁₂. Połączenie odpowiednio dobranej obróbki cieplnej z możliwościami kształtowania struktury i składu fazowego metalicznej osnowy stopów magnezu z wykorzystaniem technologii wtapiania laserowego, zapewnia dodatkowo podwyższenie własności mechanicznych i użytkowych powierzchni wskutek znacznego rozdrobnienia ziarna oraz wytworzenia warstwy mikrokompozytu o równomiernie rozłożonych cząstkach faz dyspersyjnych. Wzrost własności mechanicznych i użytkowych badanych stopów możliwy jest również poprzez wytworzenie na ich powierzchni powłok z fazy gazowej, częściowo umocnionych roztworowo, nanoszonych w systemie miękkie podłoże – gradientowa warstwa przejściowa, o płynnej zmianie jednego lub kilku jej składników od podłoża do zewnętrznej jej powierzchni – oraz powłoka zewnętrzna, w wyniku katodowego odparowania łukiem elektrycznym oraz w procesie chemicznego osadzania z fazy gazowej ze wspomaganiami plazmowym.

3. Opracowane wykresy wpływu temperatury oraz czasu przesycania i starzenia, a także stężenia aluminium, mocy lasera, zastosowanego proszku oraz rodzaju zastosowanej powłoki PVD lub CVD na twardość, chropowatość i odporność na ścieranie analizowanych odlewniczych stopów magnezu po obróbce cieplnej i powierzchniowej z wykorzystaniem sieci neuronowych pozwoliły na opracowanie modelu zależności pomiędzy: stężeniem aluminium, temperaturą i czasem przesycania, ośrodkiem chłodzącym, a twardością; stężeniem aluminium, temperaturą i czasem przesycania, temperaturą i czasem starzenia, a twardością; stężeniem aluminium, szybkością wtapiania, mocą lasera oraz rodzajem wtapianych cząstek i chropowatością i twardością uzyskanej warstwy oraz stężeniem aluminium, rodzajem zastosowanej powłoki PVD lub CVD i chropowatością, ścieralnością oraz mikrotwardością uzyskanych powłok. Wyniki otrzymane w odpowiedzi sieci, umożliwiły pełną integrację wiedzy materiałoznawczej i narzędzi informatycznych, potwierdzając zgodność modelu po symulacji z wynikami wykonanych eksperymentów, co również potwierdza słuszność przedstawionych analiz komputerowych eliminujących konieczność wykonywania kosztownych i czasochłonnych badań doświadczalnych.