

6. Podsumowanie wyników badań i wnioski

Rozwój nowych technologii, w tym technik kształtowania warstwy wierzchniej materiałów inżynierskich oraz wciąż zmieniające się warunki eksploatacyjne stosowanych rozwiązań, obligują nas do ciągłego poszukiwania nowych rozwiązań materiałowych, które w pełni zaspokoją postawione przed nimi wymagania dzisiejszego konsumenta. Wiele ośrodków badawczych w kraju i na świecie działających w obszarze inżynierii powierzchni realizuje obecnie badania mające na celu poszerzenie wiedzy i opisanie zjawisk zachodzących na powierzchni ciał stałych w zakresie nowoczesnych technik wytwarzania. Do tego typu rozwiązań z całą pewnością możemy zaliczyć techniki laserowej obróbki powierzchni oraz nowoczesne odmiany technologii próżniowych, co w pełni motywuje środowisko naukowe do podjęcia działań ukierunkowanych na zwiększenie trwałości eksploatacyjnej warstw powierzchniowych elementów wytwarzanych ze stopów aluminium. Ze względu na zapewnienie maksymalnej trwałości elementów, ograniczanej działaniem różnych mechanizmów zużycia, w szczególności zużycia trybologicznego i korozji, poszukuje się nowych rozwiązań zmierzających do polepszenia odporności warstwy wierzchniej materiału konstrukcyjnego na zużycie ścierne i korozyjne. Polepszenie własności oraz trwałości warstw powierzchniowych dokonuje się także w wyniku poprawy warunków kontaktu powierzchni trących, w tym także wykonanych ze stopów lekkich, głównie stopów aluminium. Pomimo pojawiających się opinii o braku celowości wytworzenia twardych warstw wierzchnich lub powłok na relatywnie miękkim materiale podłoża jakim jest aluminium, obserwuje się wzrastające zainteresowanie tym zagadnieniem. Wiele prac badawczych, wykonywanych także w Zakładzie Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie Politechniki Śląskiej jest obecnie realizowanych z zakresu laserowego wytwarzania warstw wierzchnich oraz próżniowego osadzania powłok PVD/CVD [70, 75, 95, 189]. Prace te wykazały w szczególności, że laserowe wtapianie proszków ceramicznych takich jak węgliki, tlenki i azotki w osnowę metalowych materiałów konstrukcyjnych oraz materiałów narzędziowych, powoduje wyraźny wzrost ich twardości, odporności na zużycie ścierne oraz odporności na zmęczenie cieplne [70, 76, 82], jak również, że nanoszenie powłok na powierzchnię metalowych i ceramicznych materiałów konstrukcyjnych i narzędziowych podnosi ich trwałość, twardość a także własności trybologiczne w porównaniu do materiałów

niepowlekanych. Efekty te wpływają bezpośrednio na zmniejszenie energochłonności oraz zwiększenie niezawodności technologicznej i trwałość elementów, co jest także ważnym aspektem podjętych badań, dotyczących obróbki powierzchni metalu lekkiego, jakim jest aluminium i jego stopy.

Aluminium jest obecnie drugim po stali najczęściej stosowanym metalem konstrukcyjnym na świecie, o ciągle rosnącej popularności, co skutkuje zwiększającym się popytem na wyroby aluminiowe, wliczając w to surowiec, półfabrykat lub produkt gotowy, w szczególności w przemyśle: motoryzacyjnym, lotniczym, przetwórstwie i przechowywaniu żywności, a także w przemyśle budowlanym, elektronicznym oraz chemicznym. Przemysł samochodowy po raz pierwszy wykazał zainteresowanie aluminium już ponad sto lat temu, kiedy to metal ten był relatywnie nowym, słabo zbadanym surowcem, jednakże z powodu niskiej gęstości ($2,7 \text{ g/cm}^3$) i stosunkowo dużej odporności na korozję jest metalem o dużym potencjale aplikacyjnym wciąż rozwijającym się przemyśle motoryzacyjnym. Ciężar elementu wykonanego z aluminium to jedynie $1/3$ wagi identycznego elementu wykonanego ze stali, co w skali całego pojazdu (ok. 2000 kg) daje różnicę ok. 110-165 kg na korzyść aluminium. Już dzisiaj możliwe do osiągnięcia własności stopów aluminium stwarzają warunki, aby całkowicie zastąpić stal, stosowaną powszechnie do produkcji nadwozia. Dla przykładu 1994 roku wyprodukowano model Audi A8 w całości wykonany z aluminium, zmniejszając wagę pojazdu o ok. 250 kg. Podobne rozwiązania zastosowano dla nowej generacji Land Rover zmniejszając masę pojazdu o blisko 300 kg, w porównaniu do poprzedniego modelu. Wykonywanie karoserii samochodowych i elementów konstrukcyjnych z aluminium umożliwia duże oszczędności odnośnie zużycia paliwa, a co za tym idzie, także zmniejszenie emisji CO_2 i innych składników spalin o około 140 milionów ton rocznie. Aluminium jest obecnie drugim, po stali najczęściej używanym materiałem samochodu, stosowanym na elementy zawieszenia, podwozia, bloki silników, przyjmując, że 1 kg aluminium może zastąpić nawet do 2 kg stali lub żeliwa.

Z kolei spośród stopów aluminium najczęściej stosowaną grupę stanowią odlewnicze stopy z krzemem, ze względu na ich niską cenę oraz bardzo dobre własności użytkowe, jak np. odporność korozyjna. Z tych też względów stopy aluminium z krzemem zostały wybrane w przedstawionej pracy, jako podłoże dla wtapiania laserowego oraz osadzania próżniowego.

Jednak pomimo wielu niezaprzeczalnych zalet, jakimi charakteryzują się stopy aluminium, posiadają one również pewne wady, do których należy zaliczyć niską twardość i odporność na ścieranie, co szczególnie w odniesieniu do zastosowań wymagających wysokich własności mechanicznych i użytkowych powierzchni wytworzonego elementu. Fakt ten dość skutecznie

może ograniczać możliwości aplikacyjne tego materiału. Taki stan rzeczy był przyczyną poszukiwania możliwych rozwiązań, zmierzających ku podwyższeniu własności użytkowych na powierzchni badanych materiałów poprzez zastosowanie laserowej technologii obróbki powierzchni oraz próżniowego wytwarzania powłok metodami PVD/CVD na podłożu z odlewniczych stopów aluminium z krzemem.

Opisywana w rozprawie tematyka związana z laserową obróbką powierzchni elementów, należy do najbardziej nowoczesnych i zaawansowanych technicznie technologii stosowanych obecnie w inżynierii powierzchni materiałów inżynierskich. Obróbka powierzchniowa przy użyciu źródła, jakim jest laser jest ponadto w dzisiejszych czasach technologią bardzo nowatorską ze względu na swoje możliwości, jak np. duża oszczędność materiałów, dokładność obróbki, znacząca poprawa własności obrabianych materiałów, możliwość zastosowania pełnej automatyzacji, itp. Dlatego w pracy w szczególności zostały scharakteryzowane warstwy powierzchniowe wytwarzane technikami laserowymi jak również sama technologia laserowej obróbki powierzchniowej. Ponadto zostały częściowo opisane mechanizmy, jakie zachodzą w trakcie kształtowania laserowego powierzchni, aplikacje poszczególnych technik, ich wady i zalety, szanse i zagrożenia oraz ich możliwości i przewidywane trendy rozwojowe. Obróbka ta umożliwia również podwyższenie twardości i odporności na ścieranie powierzchni o relatywnie niewielkich rozmiarach, co może być również podyktowane względami ekonomicznymi. Zastosowanie laserowej obróbki powierzchniowej jest uzasadnione zarówno z punktu widzenia ekonomicznego jak i ze względu na zapewnienie w wielu przypadkach wyższych własności mechanicznych obrabianych powierzchni np. aluminiowych elementów konstrukcyjnych narażonych na zużycie trybologiczne, uzębienia kół zębatach lub ostrzy narzędzi skrawających, których nie dałoby się uzyskać stosując konwencjonalne metody obróbki powierzchni.

Wtapiając proszki ceramiczne w osnowę badanych stopów aluminium z mocą lasera w zakresie do 2,0 kW z szybkością do 0,5 m/min i ilości podawanych proszków ceramicznych do 10 g/min potwierdzono występowanie strefowej budowy przetopienia wyodrębniając w otrzymanej warstwie wierzchniej strefy przetopienia SP, strefy wpływu ciepła SWC (rys. 5.95) oraz strefy przejściowe (rys. 5.7-5.10) o rozdrobnionej strukturze w porównaniu do materiału wyjściowego po standardowej obróbce cieplnej. Taki stan rzeczy potwierdzają również badania wykonywane przez autorów z innych ośrodków naukowych [82-85, 90, 93], które głównie skupiają się na możliwości rozdrobnieniu struktury materiałów obrabianych

i tym samym na polepszeniu własności eksploatacyjnych wytwarzanych elementów. Wykonywane badania strukturalne w zakresie przedstawianej pracy habilitacyjnej oraz wspomniane prace obce w równy stopniu potwierdzają, że strefa przetopienia, z pominięciem drobnokrystalicznego ziarna, charakteryzuje się również występowaniem struktury dendrytycznej, w której kierunki krystalizacji dendrytów są zgodne z kierunkiem odprowadzania ciepła ze strefy oddziaływania wiązki lasera.

Wzrost szybkości wtapiania powoduje skrócenie czasu oddziaływania wiązki laserowej na materiał, a tym samym skutkuje ograniczeniem ilości zaabsorbowanej energii przez podłoże i w efekcie prowadzi do ograniczenia zasięgu zmian strukturalnych. Zastosowanie zbyt wysokiej mocy lasera lub za niskiej szybkości skanowania powoduje parowanie materiału warstwy powierzchniowej i tworzenie się kraterów, natomiast zastosowanie zbyt małej mocy lub zbyt dużej szybkości wtapiania może być przyczyną nieodpowiedniego przetopienia charakteryzującego się niejednorodnym rozmieszczeniem cząstek wtapianych w osnowę odlewniczych stopów aluminium Al-Si-Cu. Osiągnięcie jednorodnej struktury warstwy wierzchniej zależy także od liniowej energii wiązki. W przypadku przyjętych podczas wykonanego wtapiania wartości jej wielkość wynosi 4 kJ/mm dla mocy 2 kW. Zbyt duża wartość energii liniowej prowadzi do zmniejszenia prędkości chłodzenia i w konsekwencji do braku rozdrobnienia ziarna w warstwie wierzchniej przetopienia i tym samym do obniżenia własności mechanicznych i użytkowych materiału. Właściwy dobór warunków wtapiania umożliwia osiągnięcie na powierzchni materiału, jednolitego kompozytu złożonego z osnowy (stop Al-Si-Cu) i wtopionych twardych cząstek ceramicznych. Określając warunki obróbki powierzchniowej należy wziąć pod uwagę kilka istotnych czynników, z których najważniejsze to: różnica gęstości i napięcia powierzchniowego (tzw. zwilżalność) pomiędzy cząstkami zastosowanych węglików lub tlenków (SiC, WC, Al₂O₃, ZrO₂) a osnową stopu, różnice absorpcji energii wiązki pomiędzy użytymi proszkami i odlewniczymi stopami aluminium oraz zróżnicowana przewodność cieplna użytych proszków, która znacząco wpływa na ilość ciepła dostarczonego z zewnątrz (od wiązki laserowej) do materiału podłoża umożliwiając tym samym uzyskanie lepszego przetopienia o równomiernie rozmieszczonych fazach cząstek dyspersyjnych.

Zastosowanie warstw kompozytowych wykonanych poprzez wtapianie w powierzchnie obrabianych stopów cząstek węgla wolframu lub krzemu prowadzi do podwyższenia odporności na zużycie ścierne, będąca jednym z głównych zamierzeń kształtowania własności

warstwy wierzchniej stopów Al-Si-Cu. Nie tylko właściwy dobór proszku ceramicznego użytego do wtapienia, lecz także jego rozmieszczenie oraz udział objętościowy w osnowie, modelowany poprzez różne operacje technologiczne decyduje o późniejszych własnościach użytkowych gotowego produktu.

Badając warstwę wierzchnią po wtapieniu laserowym stwierdzono wyraźne różnice odnośnie wprowadzanego proszku ceramicznego. Przykładowo struktura warstwy wierzchniej odlewniczych stopów aluminium uzyskana po wtapieniu proszku WC charakteryzuje się dużą koncentracją materiału dodatkowego na spodzie strefy przetopienia, co jest wynikiem grawitacyjnego opadania cząsteczek o relatywnie dużej gęstości ($15,69 \text{ g/cm}^3$) w roztopionym jeziorzku ciekłego metalu. Natomiast w przypadku wtapienia proszków tlenków Al_2O_3 i ZrO_2 nie stwierdzono w strukturze przetopienia użytych cząstek, które w skutek oddziaływania wiązki lasera utworzyły na powierzchni obrabianego materiału spieczoną, cienką warstwę tlenków (rys. 5.11, 5.19). Optymalny rozkład wtapianego proszku ceramicznego w osnowę stopów potwierdzono po wykonanym wtapieniu proszku SiC, charakteryzujący się równomiernym rozłożeniem cząstek w przypowierzchniowej strefie warstwy wierzchniej (rys. 5.31).

Warstwa powierzchniowa powstała w wyniku wymieszania się materiału dodatkowego i podłoża, charakteryzuje się zwiększoną twardością, co związane jest ze zmianami strukturalnymi w strefie przejściowej, w tym m. in. z obecnością silnie rozdrobnionych ziaren, wydzieleniami twardych faz, obecnością przesyconych roztworów stałych oraz korzystnym stanem naprężeń własnych.

Badając zależność zmiany twardości od wpływu rodzaju podłoża oraz zastosowanego proszku ceramicznego stwierdzono maksymalny 15% wzrost twardości w przypadku warstw wytworzonych z zastosowaniem proszku ZrO_2 , w porównaniu do twardości materiału po standardowej obróbce cieplnej (rys. 5.96).

Na podstawie badań odporności na zużycie ścierne badanych próbek metodą ball-on-plate mierząc współczynnik tarcia oraz charakteryzując profile wytarcia wykazano znaczny wzrost odporności na ścieranie wytworzonych quasi-kompozytowych warstw, w szczególności dla przypadku zastosowanego wzmocnienia w postaci drobnoziarnistego węgla wolframu.

Reasumując stwierdzono, że w wyniku obróbki cieplnej oraz wykonanego wtapienia laserowego proszków ceramicznych w powierzchnię stopów Al-Si-Cu przy użyciu lasera dużej mocy, możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości warstwy wierzchniej bez pęknięć i wad oraz o twardości przewyższającej wartości twardości uzyskane dla podłoża aluminiowego.

Polepszenie twardości możliwe jest do uzyskania w oparciu o zastosowanie optymalnych parametrów wtapiania, które wynoszą odpowiednio: prędkość wtapiania 0,5 m/min dla tlenku aluminium oraz 0,25 m/min dla pozostałych proszków, ilość podawanego proszku 1 g/min (Al_2O_3), 3 g/min (WC), 1,5 g/min (SiC), optymalna moc lasera wynosiła 2,0 kW (1,5 kW w przypadku Al_2O_3).

Niemniej jednak dużym minusem technik laserowego wtapiania proszków ceramicznych, w szczególności tlenków jest przedwczesna sublimacja i rozpad dużej części materiału wtapianego w skutek napromieniowania go wiązką laserową o dużej energii, jeszcze przed etapem wprowadzenia go do ciekłego jeziora. Poza tym zbyt duża ilość proszku, będącego równocześnie absorbentem promieniowania laserowego, a co za tym idzie nośnikiem ciepła lub zbyt intensywne wdmuchiwanie go w powierzchnię obrabianych stopów Al-Si-Cu, powoduje nadmierną, niepożądaną reakcję materiału dodatkowego, której towarzyszy zazwyczaj intensywny płomień reakcji rozpadu. W następstwie tego typu oddziaływań na drodze proszek - wiązka laserowa - materiał podłoża powstają na powierzchni obrabianego stopu liczne dziury i wypływy materiału na zewnątrz przetapianej ścieżki, duże zawirowanie materiału przetapianego oraz mogą się tworzyć niepożądane, nieforemne, wysokie spieki będące kompozycją materiału rodzimego i przetapianych proszków.

Pomimo, iż zastosowanie wtapiania laserowego proszków ceramicznych, a w szczególności węglików okazało się zabiegiem celowym i w dużej mierze wpływającym na poprawę twardości (rys. 5. 96) oraz odporności na ścieranie (rys. 5. 97-5.101) dla małych powierzchni, metoda ta wykazuje jednak swoje wady, do których zaliczyć należy dużą chropowatość powierzchni uniemożliwiającą pomiar tego parametru po wtapianiu laserowym oraz niską odporność korozyjną powodowaną przede wszystkim licznymi nieciągłościami uzyskanych warstw. Wśród wad wymienić należy również czynniki ekonomiczne, polegające w szczególności na braku zasadności stosowania wtapiania laserowego do obróbki dużych powierzchni, ze względu na większe koszty technologii w porównaniu do metod tradycyjnych np. technik malarskich lub powlekania galwanicznego.

Duża chropowatość powierzchni na równi z małą odpornością korozyjną (rys. 5.115), która wyklucza aplikacyjność quasi-kompozytowych warstw uzyskanych przez wtapianie laserowe w środowisku korozyjnym, skierowały główny nurt badań w kierunku technik próżniowych pokrywania powierzchni stopów aluminium w celu eliminacji niskich własności użytkowych warstw kompozytowych. Niska odporność korozyjna wytworzonej laserowo warstwy wierzchniej była jednym z powodów podjęcia badań nad uzyskaniem warstwy

powierzchniowej w oparciu o techniki PVD i CVD wykorzystując metodę CAE PVD (powłoki Cr/CrN/CrN, Cr/CrN/TiN, Ti/Ti(C,N)/CrN, Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N, Ti/(Ti,Si)N/(Ti,Si)N) oraz metodę PA CVD (powłoka Ti/DLC/DLC), celem uzyskania zarówno poprawy twardości i odporności na ścieranie jak również zapewnienia odpowiedniej odporności korozyjnej.

Badania strukturalne potwierdziły, że w badanych powłokach PVD występują roztwory stałe wtórne azotku tytanu TiN i chromu CrN o sieci regularnej jako podstawowe fazy, a także izomorficzne fazy węglikoazotku tytanu Ti(C,N) i azotku aluminium (Ti,Al)N o sieci heksagonalnej. Natomiast w przypadku metody CVD występuje powłoka węglowa, diamentopodobna DLC, której zaletą jest bardzo wysoka gładkość w skali nano, dzięki czemu powłoki te nazywane są często nanogładkimi. Profilowa zmiana stężenia pierwiastków chemicznych (rys. 5.101-5.105) tworzących powłoki wskazuje, iż uzyskane powłoki wykazują budowę gradientową, co w przypadku powłok PVD spowodowane jest zmiennym przepływem gazów reaktywnych oraz zmianą prądu na łukowych źródłach par w metodzie katodowego odparowania łukiem elektrycznym. Także w przypadku metody CVD gradient składu chemicznego powłok zależy od wielkości przepływu oraz zmiany prężności gazu w czasie trwania procesu krystalizacji warstw. O przyczepności powłok do podłoża oprócz adhezji decyduje między innymi niewielkie dyfuzyjne przemieszczanie się pierwiastków w strefie połączenia, które jest wynikiem implantacji jonów o dużej energii padających na spolaryzowane ujemnie podłoże. Świadczą o tym wyniki badań uzyskane z użyciem spektrometru optycznego wyładowania jarzeniowego GDOS (rys. 5.85-5.88), gdyż jak opisano w pracach [95, 163], wysokoenergetyczne jony padające na spolaryzowane podłoże wywołują lokalny wzrost temperatury, przyspieszenie chemisorpcji i intensyfikację procesów dyfuzji powierzchniowej. Może także występować penetracja jonów na głębokość ok. kilku nm oraz częściowe rozpylanie atomów nanoszonej powłoki.

Morfologia i grubość uzyskanych powłok w mniejszym stopniu niż przyczepność wpływają na trwałość powłok, jednakże również stereometria powierzchni może decydować o wytrzymałości połączenia podłoże-powłoka. Struktura powierzchniowa uzyskanych powłok PVD na stopach aluminium (rys. 5.49-5.60) charakteryzuje się, w szczególności dla systemów Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N i Ti/Ti(C,N)/CrN widoczną niejednorodnością, która w dużej mierze spowodowana jest występowaniem zakrzepniętych kropli metalu wybitych z tarcz w trakcie osadzania powłok oraz zagłębień powstałych na skutek wypadania zakrzepniętych kropli. Wypadanie zastygłych kropeł osadzonego materiału jest związane z różnicami wartości

współczynnika przewodzenia ciepła, powstającymi w trakcie chłodzenia powierzchni podłoża, po zakończeniu nanoszenia powłok pomiędzy utworzonymi powłokami azotowymi lub węglikoazotkowymi i podłożem. Analiza składu chemicznego z mikroobszaru kropeł (rys. 5.80, tablica 5.6) potwierdza obecność głównie pierwiastków pochodzących z rozpylanej tarczy w zależności od rodzaju powłoki.

Jednym z głównych wskaźników pozwalających na określenie własności użytkowych cienkich powłok osadzonych próżniowo na podłożu aluminiowym jest obciążenie krytyczne L_c [N] wyznaczone w próbie zarysowania (rys. 5.113), będące miarą przyczepności powłok do podłoża, w dużej mierze zależne od odpowiedniego materiału powłoki (składu chemicznego, składu fazowego). W przypadku powłoki Cr/CrN/CrN wartość maksymalna obciążenia krytycznego wyniosła 14 N, czyli ok. 40% więcej w porównaniu do powłok Ti/TiCN/TiAlN, oraz Ti/TiCN/CrN, gdzie występuje wyraźna zależność pomiędzy fazami tworzącymi powłokę z przyczepnością warstwy. Powłoki zawierające fazy (Ti,Al)N, Ti(C,N) oraz DLC wykazują gorszą przyczepność do aluminiowego podłoża w porównaniu do powłok zawierających fazę CrN oraz (Ti,Si)N. Niska przyczepność do podłoża spowodowana jest najpewniej występowaniem wiązań metalicznych w powłokach z azotkiem tytanu i azotkiem chromu. W przypadku powłok zawierających fazę (Ti,Si)N o sieci heksagonalnej występują wiązania kowalencyjne, a w przypadku powłok CrN wiązania jonowo-kowalencyjne [105, 175], co wpływa na ich lepszą przyczepność do podłoża.

Badając własności mechaniczne uzyskanych powłok potwierdzono, że charakteryzują się one mikrotwardością w granicach od 1700 do 2200 $HV_{0,05}$ (rys. 5.102), gdzie najwyższe wartości uzyskano dla powłok typu Ti/Ti(C,N)/CrN oraz Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N. Nie stwierdzono także istotnych różnic mikrotwardości naniesionych powłok w zależności od podłoża aluminiowego, jednakże minimalnie większą mikrotwardość do 3% (mieszczącą się w granicy błędu pomiarowego) stwierdzono dla powłok naniesionych na stopu AlSi9Cu4, co znajduje potwierdzenie również w innych pracach [95, 163, 189].

Wzrost mikrotwardości otrzymanych powłok powiązany jest także ze wzrostem odporności na ścieranie badanych podłoży, dotyczy to w szczególności powłok Ti/Ti(C,N)/CrN i Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N, dla których odnotowano najwyższą odporność na zużycie ścierne, wśród wszystkich analizowanych powłok PVD. Natomiast najniższymi wartościami odporności na zużycie ścierne, w wykorzystanej metodzie ball-on-plate charakteryzują się powłoki DLC z warstwą amorficznego uwodornionego węgla a-C:H, (rys. 5.103, 5.104) o wartości $< 0,1 \mu m$.

Potwierdzono również, że dla zastosowanego obciążenia 5N powłoki DLC odznaczają się także najkorzystniejszymi wartościami drogi tarcia, które kształtowały się na poziomie przewyższającym nawet 40-krotnie wyniki drogi tarcia dla powłoki Cr/CrN/CrN. Diamentopodobne warstwy DLC, określane jako samosmarujące, zawdzięczają swoje własności alotropowej postaci występującego w nich węgla, którego atomy tworzą trzy rodzaje hybrydyzacji: sp^3 , sp^2 i sp^1 . Stwierdzono, że warstwy te zawierają wszystkie wymienione rodzaje orbitali, przy czym atomy węgla o hybrydyzacji sp^1 występują tylko w niewielkich ilościach. Ponadto źródła literaturowe potwierdzają, że istotnym czynnikiem wpływającym na własności warstw diamentopodobnych jest także całkowita zawartość w nich wodoru, który wypełnia wiązania pomiędzy atomami węgla [167-174].

Biorąc pod uwagę powyższe przesłanki można, na podstawie wykonanych analiz sformułować następujące wnioski:

1. Wykonane badania pozwoliły na zrealizowanie celów pracy oraz udowodnienie tezy, że zastosowanie powierzchniowej obróbki laserowej oraz technologii PVD/CVD do polepszenia własności eksploatacyjnych powierzchni odlewniczych stopów aluminium umożliwia wytworzenie warstwy powierzchniowej charakteryzującej się lepszymi własnościami mechanicznymi i trybologicznymi w odróżnieniu do materiału rdzenia. Wykazano, że warstwa wierzchnia uzyskana technologią laserowego wtapiania i przetapiania, jak również zastosowane powłoki osadzone próżniowo z fazy gazowej PVD i CVD mają większą twardość i odporność na ścieranie w porównaniu do materiału aluminiowego po konwencjonalnej obróbce cieplnej. Ponadto wtapianie laserowe proszkami ceramicznymi wpływa w dużym stopniu na rozdrobnienie struktury w strefie przetopienia oraz w strefie wpływu ciepła w badanym zakresie mocy lasera, podwyższając tym samym własności uzyskanych warstw.
2. Badania własności użytkowych wytworzonych laserowo warstw wierzchnich wskazują na wzrost twardości i odporności na ścieranie warstwy wierzchniej z wtopionymi proszkami węglików WC i SiC oraz relatywnie niską odporność korozyjną. Dla proszków tlenków glinu i cyrkonu warstwa wierzchnia uzyskana metodą wtapiania laserowego ma postać powłoki tlenkowej, w skład której wchodzi pierwiastki obecne we wtapianych proszkach ceramicznych. W przypadkach warstw wierzchnich po wtapianiu proszków tlenków nie potwierdzono występowania strefy przetopienia, a tym samym obecności wtapianych cząstek w osnowie stopów aluminium. Proszek WC oraz SiC wprowadzony

w trakcie wtapiania laserowego do osnowy wybranych stopów aluminium ma postać równomiernie rozłożonych cząstek w strefie przetopionej.

3. Wytworzenie powłok na powierzchni odlewniczych stopów aluminium, poprzez ich osadzenie z fazy gazowej, 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 metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej ze wspomaganie plazmowym powoduje poprawę twardości oraz odporność na zużycie ścierne i korozyjne wytypowanych do badań stopów obrobionych cieplnie.
4. Wyniki badań mikrotwardości, chropowatości oraz odporności na korozję wskazują na aplikacyjny charakter naniesionych próżniowo powłok PVD/CVD w szczególności powłok węglikoazotkowych w układach Ti/Ti(C,N)/CrN oraz Ti/Ti(C,N)/(Ti,Al)N. Wysoki potencjał użytkowy wykazuje także powłoka DLC, charakteryzujące się ponadto relatywnie niskim współczynnikiem tarcia przy względnie wysokiej mikrotwardości oraz odporności na zużycie ścierne.

Intensywny rozwój technologii, coraz bardziej zaostrzane normy i przepisy środowiskowe oraz nowoczesne rozwiązania w zakresie innowacyjnych urządzeń laserowych i próżniowych obligują współczesnych naukowców do intensyfikacji badań z zakresu obróbki powierzchniowej stopów metali lekkich. Dlatego też należy sądzić, że uzyskane wyniki badań prezentowane w poniższej publikacji mogą posłużyć, jako podstawa dalszych działań badawczych wykorzystujących wtapianie i przetapianie laserowe jak również próżniowe techniki osadzania powłok CAEPVD i PACVD do podwyższania własności powierzchni stopów metali lekkich. Istotnym elementem badań powinno być również rozpoznanie możliwości transferu zastosowanych technologii do przemysłu oraz ich zweryfikowanie i rozwijanie w warunkach produkcyjnych. W szczególności przewiduje się, że przyszłe kierunki rozwoju dotyczące technik laserowych oraz próżniowego osadzania powłok obejmować będą:

- zbadanie możliwości celowego zastosowania wtapiania laserowego proszków ceramicznych w osnowę stopów metali lekkich w oparciu o wykorzystanie innych źródeł wiązki laserowej, w szczególności lasera włóknowego oraz tarczowego, charakteryzującego się większą gęstością mocy, mniejszą wielkością plamki w ognisku wiązki, a także bardziej precyzyjne określenie szerokości i głębokości wtapiania.

- rozwinięcie dotychczas wykonanych badań, obejmujących wtapienie laserowe z uwzględnieniem zróżnicowanej granulacji oraz kształtu wprowadzanego do osnowy proszku ceramicznego, badając własności warstwy wierzchniej w zależności od wielkości wtapianych cząstek i ich dyspersji w osnowie,
- zastosowanie różnych możliwości przygotowania powierzchni przed obróbką laserową (anodowanie, trawienie, piaskowanie, malowanie mające na celu zwiększenie absorpcji promieniowania laserowego) zapewniające lepszą dyspersję cząstek proszku w osnowie oraz zastosowanie topników w celu zmniejszenia oporu powierzchniowego oraz poprawę zwilżalności proszków ceramicznych,
- badanie innych stopów metali lekkich, w szczególności stopów tytanu, określając celowość wytwarzanych laserowo warstw wierzchnich oraz nakładania powłok CAEPVD i PACVD, z zamiarem podwyższenia twardości, odporności na ścieranie oraz zachowaniem wysokiej odporności korozyjnej,
- wykorzystanie synergizmu, powstałego w wytworzonych układach areologicznych na skutek wytworzenia powłok PVD/CVD na uprzednio obrobionym laserowo materiale podłoża, w celu wyeliminowania relatywnie niewielkiej odporności korozyjnej warstwy wierzchniej uzyskanej w wyniku wtapienia proszków ceramicznych,
- rozwinięcie zakresu badań własnych w zakresie powłok PVD/CVD trzeciej i czwartej generacji (nanokompozytowych i gradientowych) osadzanych na podłożu metalowe, w tym w szczególności ze stopów metali lekkich,
- poszerzenie zakresu badań o testy wytrzymałościowe, zarówno dla warstw wierzchnich wytwarzanych laserowo jak i powłok osadzanych próżniowo, w celu określenia własności wytrzymałościowych, także w warunkach dynamicznych.