



Synteza materiałów przy użyciu promieniowania laserowego

M. Kwaśnica^a, M. Bonek^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
Studenckie Koło Naukowe Laserowej Obróbki Powierzchniowej
email: mkwasnica@gmail.com

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: mirosław.bonek@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawione zostało wykorzystanie promieniowania laserowego do syntezy materiałów. Omówiono oddziaływanie wiązki laserowej na materiał, zjawiska odparowania materiału na drodze ablacji i jego osadzanie na podłożu. Opisane zostały takie pojęcia jak: charakterystyka procesu osadzania powłok, technologie i aparatura technologiczna, rodzaje i właściwości osadzanych powłok, zastosowania i dalsze kierunki rozwoju. Postęp w zakresie rozwoju aparatury technologicznej i wzrost jej dostępności dobrze rokuje w aplikacji dla tej metody w inżynierii materiałowej.

Abstract: On the paper was presented to use laser radiation for the synthesis of materials. Discusses the impact of the laser beam on the material, the phenomenon of evaporation of material through ablation and deposition on the materials There are described in terms such as: characteristics of the deposition process, coatings, technologies and technological equipment, types and characteristics of the deposited coatings, applications and future directions. Progress in the development of technological equipment and increase its availability is promising for applications for this technique in materials science.

Słowa kluczowe: laser, ablacja laserowa, warstwa wierzchnia, LAPVD, LACVD

1. WSTĘP

Technika laserowa w ostatnich latach przeżywa bardzo dynamiczny rozwój. Ciągłe doskonalenie laserów, jako narzędzie w badaniach i obróbce materiałów oraz coraz to lepsze poznanie zjawisk związanych z oddziaływaniem wiązki świetlnej z materiałem powodują, iż lasery i technika laserowa zostają powszechnie wykorzystywane w inżynierii materiałowej, a szczególnie rośnie ich zastosowanie w inżynierii powierzchniowej. Technologia laserowa staje się narzędziem szczególnie dogodnym i niejednokrotnie jedynym w wielu zastosowaniach technicznych.

2. WYKORZYSTANIE PROMIENIOWANIA LASEROWEGO DO SYNTEZY MATERIAŁÓW

Do procesów laserowej syntezy materiałów zaliczane są te technologie wykorzystujące wiązkę laserową, w wyniku zastosowania których, na obrabianej powierzchni powstają warstwy złożone z czystych metali lub związków.

Do technik tych zaliczamy:

- LAPVD (laser assisted physical vapour desposition – osadzanie par przy udziale wiązki laserowej),
- LACVD (laser assisted chemical vapour desposition – wspomagane laserowo chemiczne osadzanie par),
- laserowa synteza z cieczy i gazów.

Ablacja laserowa

W inżynierii materiałowej, wiązka laserowa jest wykorzystywana do:

- nagrzewania,
- przetapiania,
- ablacji.

Ablacja jest to proces, w którym wysokoenergetyczne kwanty promieniowania lasera wywołują obniżenie energii wiązań pomiędzy cząstkami, co umożliwia zdejmnowanie warstw atomowych jedna po drugiej [1,2].

Procesem, często utożsamianym z odparowaniem, w którym zachodzi przejście ze stanu stałego w stan gazowy z pominięciem fazy ciekłej, w określonych warunkach temperatury i ciśnienia [2].

Ablacja laserowa jest procesem rozpylania, w którym typowa prędkość usuwania materiału osiąga wielkość rzędu kilku monowarst na impuls, a powierzchnia jest modyfikowana strukturalnie lub pod względem składu w skali mezoskopowej [2]. Wysokoenergetyczne kwanty promieniowania lasera wywołują obniżenie energii wiązań pomiędzy cząstkami, co umożliwia zdejmnowanie warstw atomowych jedna za drugą [1].

Do podstawowych zastosowań zjawiska ablacji należy zaliczyć:

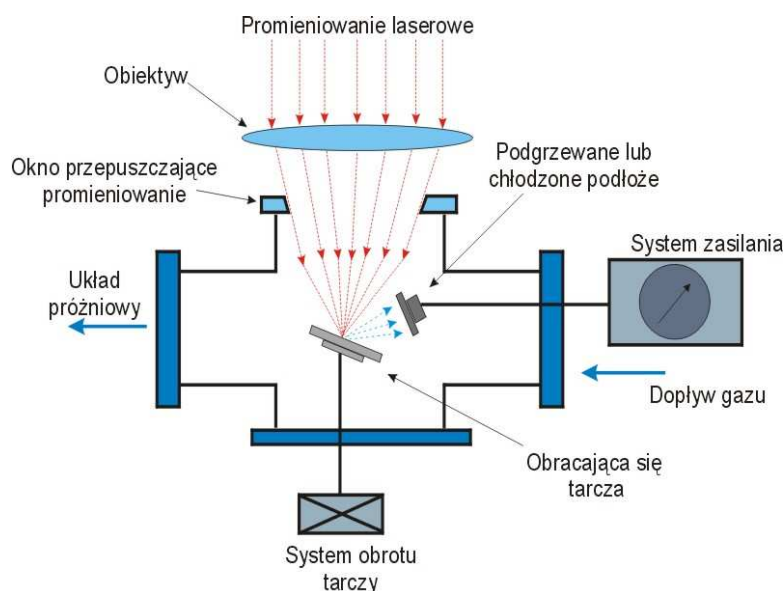
- odparowanie materiału z tarczy i nanoszenie jego par na określoną podkładkę,
- usuwanie zbędnego materiału, w celu oczyszczenia zabrudzonej powierzchni (proces stosowany często przy renowacji zabytków i dzieł sztuki); proces może być prowadzony w próżni, atmosferze powietrza oraz w obecności gazów obojętnych,
- usuwanie części materiału drogą wybuchowego odparowania i umacnianie pozostałego materiału z wykorzystaniem zjawiska fali uderzeniowej [1-4].

LAPVD – ABLACYJNE OSADZANIE POWŁOK

Synteza materiałów za pomocą laserowego odparowania materiału, nazywana techniką LAPVD, jest procesem, w którym impulsowa wiązka laserowa wykorzystywana jest do odparowania materiału z tarczy i naniesienia wytworzonych par w postaci cienkiej warstwy na określoną podkładkę. Pary kondensują i następuje wzrost nanoszonej warstwy, a jej struktura zależy od struktury i własności podłoża oraz od własności odparowanego materiału. Proces ten często nosi nazwę **ablacyjnego nanoszenia powłok**.

Podstawowymi elementami urządzenia do laserowej ablacji są (rys. 1):

- laser,
- komora robocza z wziernikami wraz z systemem mocowania i obrotu tarczy oraz podłoża,
- układ zasilania elektrycznego,
- układ wytwarzania próżni,
- układ zasilania w gaz technologiczny,
- system sterowania procesem [5].



Rysunek 1. Schemat ideowy urządzenia do ablacji laserowej [5]

Wiązka laserowa doprowadzana zostaje do komory próżniowej poprzez okno ZnSe i pod określonym kątem pada na tarczę (odparowywany materiał, przygotowany np. w postaci jednorodnego spieku), powodując gwałtowne odparowanie (ablację). Dzięki odpowiednio ustawionemu układowi: wiązka laserowa – tarcza – podłoże, pary odparowanego materiału rozchodzą się błyskawicznie (wybuchowo) w komorze próżniowej (przy ciśnieniu około – 10-6 torr) i trafiają głównie do podłoża. Kolejne akcje laserowe powodują wzrost warstwy o ściśle kontrolowanej grubości (prędkość osadzania warstwy około kilku dziesiątych nanometra/impuls). W celu poprawy adhezji pomiędzy nanoszoną powłoką a podłożem, może zostać ono podgrzane do określonej temperatury. Jeśli z kolei, chcemy uzyskać strukturę amorficzną lub nanokrystaliczną, dokonuje się dodatkowe chłodzenie podłoża. Wzrost warstw następuje w tzw. kierunkach łatwego wzrostu (dla regularnych struktur krystalograficznych są to najczęściej $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ oraz $\langle 11\bar{1} \rangle$).

Oddziaływanie wiązki laserowej z materiałem zależy głównie od długości fali zastosowanego promieniowania laserowego, ale też od energii impulsu i szerokości impulsu (czas trwania impulsu).

Do osadzania powłok techniką LAPVD wykorzystywane są lasery emitujące promieniowanie w zakresie nadfioletu, z uwagi na największą absorpcję tego zakresu promieniowania przez materiały oraz, co jest istotne w procesie ablacji. Przy wysokiej energii fotonów, możliwe jest rozrywanie niektórych wiązań atomowych. Rozrywania następują wskutek efektów cieplnych (do ok. 3 eV) lub wskutek oddziaływań fotochemicznych (powyżej 3 eV).

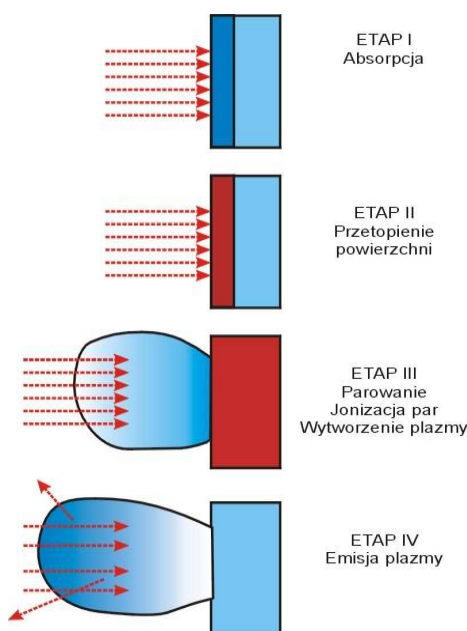
Proces LAPVD z wielu powodów jest unikalny:

- poprzez laserowe napromieniowanie materiału (tarczy) złożone materiały wieloskładnikowe mogą być osadzone z zachowaniem ich stechiometrii,
- ciśnienie w komorze oraz odległość podłoża od tarczy i jej orientacja w stosunku do wiązki laserowej mogą być łatwo ustawione,
- wydajność z tarczy (napromieniowanego materiału) jest znacznie wyższa w porównaniu z innymi technikami, ponieważ większość materiału odparowanego jest wstecznie kierowana i dlatego może być gromadzona z dużą wydajnością,
- wytwarzanie wielowarstwowych materiałów jest bardzo proste z uwagi na szybką wymianę tarcz podstawionych w obszar działania wiązki laserowej,
- materiał odparowany i osadzony stanowi nowe podłoże dla wzrostu następnych odparowywanych warstw.

Technika ablacyjnego nanoszenia powłok jest prawdopodobnie jedną z najprostszych technik otrzymywania cienkich warstw. Wytwarza się nią głównie twarde warstwy odporne na ścieranie, między innymi TiC czy TiN, ale też cienkie warstwy dla potrzeby mikroelektroniki [1-5].

Procesy zachodzące podczas osadzania powłok

Oddziaływanie wiązki laserowej z materiałem, które prowadzi do jego odparowania (ablacji), jest procesem złożonym fizycznie. Można go podzielić na cztery etapy (rys. 2).



Rysunek 2. Schemat oddziaływania wiązki laserowej z materiałem tarczy [5]

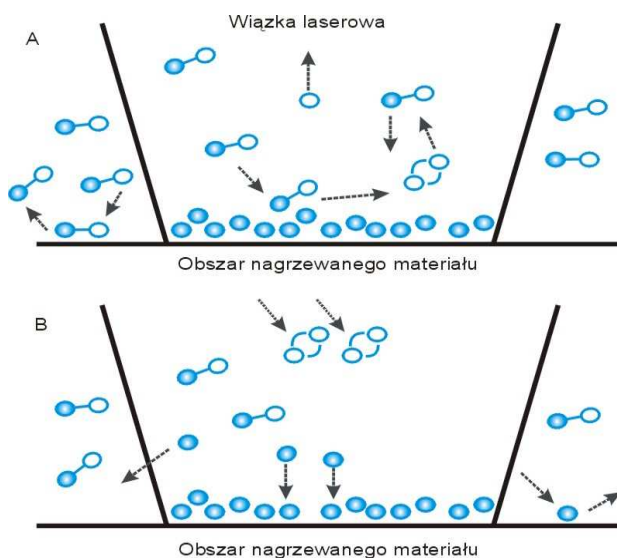
Do podstawowych etapów procesu należy zaliczyć:

- absorpcję wiązki laserowej przez materiał (tarczę),
- nagrzewanie materiału (tarczy),
- ablację materiału (gwałtowne odparowanie),
- jonizację par i tworzenie się plazmy,
- eksplozyjne rozprzestrzenianie się plazmy w komorze roboczej, głównie w kierunku pokrywanego przedmiotu (podłoża) [2].

W momencie, gdy wiązka laserowa napromieniowuje materiał, energia fal elektromagnetycznych (energia fotonów promieniowania laserowego) zostaje wykorzystana do wzbudzenia elektronów i następnie zamienia się w energię cieplną (rys. 2 - ETAP I), co powoduje równoczesne topienie cienkiej warstwy materiału (rys. 2 - ETAP II) i jego ablację – odparowanie (rys. 2 - ETAP III), a następnie rozprężanie par i utworzenie plazmy (rys. 2 - ETAP IV).

LACVD – WSPOMAGANE LASEROWO CHEMICZNE OSADZANIE PAR

Proces wspomaganego laserowo chemicznego osadzania par (LACVD) jest podobny do procesu LAPVD. W miejsce tarczy z ciała stałego, jako materiał do wytworzenia plazmy za pomocą wiązki laserowej, używany jest określony gaz (rys. 3). Laser wykorzystywany jest jako źródło energii służące do rozkładu (rozbicia) cząstek gazy, jak również do podwyższenia temperatury podłoża, na którym osadzany jest materiał. Sposobem tym osadza się różne materiały, takie jak: metale, nadprzewodniki, warstwy o właściwościach nie przewodzących [6,7].



Rysunek 3. Schemat procesu LACVD: a – drogą pyrolizy, b – drogą fotolizy [5].

Rozerwanie wiązań międzyatomowych w cząsteczkach gazowych może następować poprzez efekt pyrolizy lub fotolizy. W przypadku fotolizy, podłoże jest nagrzewane do określonej temperatury za pomocą wiązki światła laserowego; sterując mocą lasera i czasem oddziaływania światła laserowego na materiał, kontroluje się temperaturę powierzchni nagrzewanego materiału, natomiast gaz ulega rozkładowi w zetknięciu z gorącą powierzchnią podłoża. Do zalet techniki należy zaliczyć:

- zlokalizowane osadzanie cienkich warstw: wskutek zastosowania techniki LACVD następuje zlokalizowane osadzanie cienkich warstw, osadzanie takie jest możliwe do zrealizowania przy zastosowaniu techniki konwencjonalnej CVD, ponieważ ograniczona jest możliwość zlokalizowania nagrzewania,
- dużą szybkość osadzania: techniką LACVD, cienkie warstwy grubości 1 μm mogą być osadzane w czasie ok. 0,1 s.; dotychczasowe badania reakcji zachodzących w czasie procesu

LACVD wskazuje, że przebiegają one dwa do czterech razy szybciej niż te zachodzące w czasie konwencjonalnych procesów CVD,

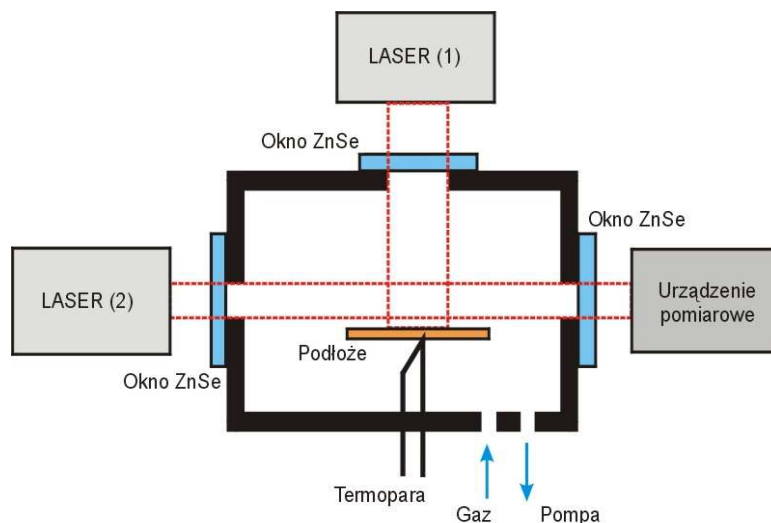
- szybkość chłodzenia i nagrzewania: istnieje możliwość stosowania szerokiej gamy szybkości nagrzewania i chłodzenia w technice LACVD; osiągnięcie dużych szybkości nagrzewania i chłodzenia, jest możliwe poprzez zmianę sposobu i czasu oddziaływania promieniowania laserowego, pozwala regulować wielkość ziarna w cienkiej warstwie; dla przykładu, bardzo drobnoziarniste warstwy (również amorficzne) można uzyskać stosując krótkie impulsy laserowe; również, technika CVD, pozwala uzyskiwać gruboziarniste powłoki z uwagi na to, że czas pozostawania materiału przy wysokiej temperaturze jest dostatecznie długi,
- szybkość przepływu strunienia gazu: w technice konwencjonalnej CVD, szybkość osadzania warstwy oraz jej własności w bardzo dużym stopniu zależą od szybkości przepływu gazu oraz w konsekwencji od kształtu przedmiotu i wielkości komory, w której prowadzony jest proces; z uwagi na zlokalizowane nagrzewanie i duże szybkości nanoszenia techniki LACVD, efektywność procesu praktycznie nie zależy od szybkości przepływu gazu [2,8-10].

Do najistotniejszych niezależnych parametrów procesu należy zaliczyć:

- moc wyjściową lasera,
- średnicę wiązki,
- długość fali promieniowania laserowego,
- szybkość skanowania lub czas nagrzewania,
- refleksyjność powierzchni,
- temperaturę podłoża,
- własności cieplne podłoża.

Odpowiadającymi im zmiennymi zależnymi są:

- szybkość osadzania,
- skład chemiczny i mikrostruktura warstwy,
- geometria warstwy,
- grubość osadzonej warstwy [5].



Rysunek 4. Schemat ideowy urządzenia do prowadzenia procesu LACVD techniką dwóch wiązek laserowych [5]

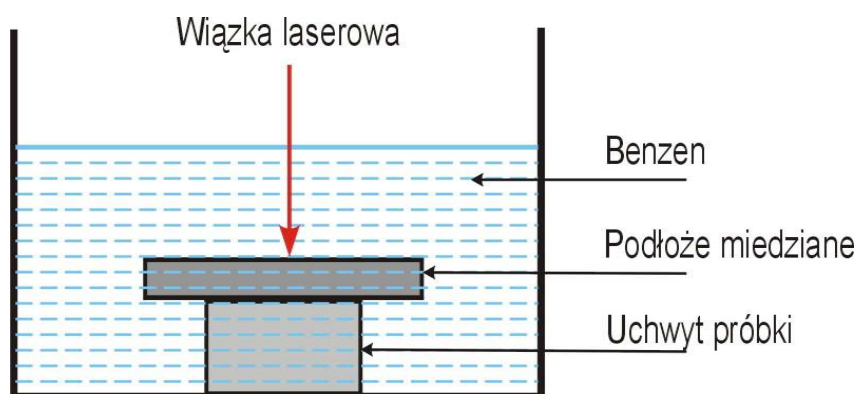
Proces można znacznie przyspieszyć poprzez zastosowanie dwóch wiązek laserowych, z których jedna kierowana równolegle do podłoża ma na zadanie rozkład cząstek gazów i ich jonizację, druga natomiast skierowana prostopadłe do podłoża intensyfikuje osadzanie par na podłożu (rys. 4) [2-5].

LASEROWA SYNTEZA MATERIAŁÓW Z FAZY CIEKŁEJ

Laserowa synteza materiałów z fazy ciekłej jest jedną z nowoczesnych technik służących do syntezy z fazy ciekłej materiałów w postaci warstw lub nanocząstek. W tych warunkach napromieniowanie laserowe powierzchni ciała stałego ma miejsce tylko wówczas, gdy jest ono zanurzone w cieczy posiadającej wystarczająco dużą przepuszczalność dla wiązki światła laserowego o określonej długości (rys. 5). Przepuszczalność cieczy dla światła laserowego jest w tej metodzie podstawą jej powodzenia. Wskutek zaabsorbowania energii wiązki laserowej, warstwa wierzchnia materiału podłoża jest gwałtownie ogrzewana a następnie chłodzona w cieczy. Wywołuje to powstanie stanu pewnej nierównowagi w cieczy na granicy z podłożem (w pobliżu granicy ciało stałe - ciecz). Wskutek zaistnienia takiej sytuacji, następuje rozerwanie wiązań w cząsteczkach fazy ciekłej, prowadzące do wytworzenia faz metastabilnych. Zasadniczo istnieją trzy główne parametry, które mają decydujący wpływ na przebieg procesu syntezy materiałów z określonych cieczy i osadzania ich na podłożach, którymi są:

- długość fali,
- energia,
- czas trwania impulsu laserowego [2-7].

Technika ta nie została jeszcze dotychczas dostatecznie poznana i opisana. Wykorzystując tę technikę, wytworzono cienkie warstwy takich materiałów jak: węgliki, azotki żelaza, tytanu, tantal, wolframu, krzemu, itd.. Do wytworzenia warstw podłoża były obrabiane w takich cieczach jak: benzen (C_6H_6), woda (H_2O), amoniak (NH_3), itd.. Warty podkreślenia jest fakt, że powierzchnia ciała stałego może być w tych warunkach łatwo obrabiana, a wytworzona warstwa nie wykazuje kontaminacji, jest bowiem chroniona przez ciecz. Dla przykładu, techniką tą otrzymywano z benzenu cienkie warstwy diamentu na podłożu monokryształów miedzi. Wielkość kryształów diamentów wynosiła 2 – 3 μm . W zależności od ilości zastosowanych impulsów zmieniała się wielkość kolonii, dochodząc przy 4 impulsach do ok. 40 – 50 μm [5].



Rysunek 5. Schemat ideowy procesu laserowej syntezy materiałów z fazy ciekłej [5]

CHARAKTERYSTYCZNE CECHY METODY OSADZANIA LASEREM IMPULSOWYM – PLD

Wpływ na charakterystykę procesu **PLD** (ang. pulsed laser deposition – osadzanie laserem impulsowym) w pewnej mierze mają: rodzaj osadzanego materiału oraz gęstość energii wiązki laserowej. Niektóre z nich jednak możemy traktować jako cechy uniwersalne, a mianowicie:

- **średnia szybkość osadzania** – znaczne szybkości osadzania uzyskuje się po przekroczeniu progu dla gęstości energii około 3 – 5 J/cm². Średnia szybkość osadzania w procesie wyniosła około 0,05 nm/μs [6],
- **przenoszenie stechiometrii** – jest to jedna z głównych zalet procesu osadzania laserem impulsowym, odróżniającą ją od innych technik wytwarzania powłok. Stechiometria osadzonej powłoki jest zbliżona do odparowanej tarczy – stwierdzono to w większości badanych przypadków. Wyższe ciśnienie par jednego ze składników, zróżnicowanie rozkładu kąтового dla poszczególnych pierwiastków może być powodem braku stechiometrii. Istnieje możliwość korygowania składu osadzanych faz poprzez atmosferę w komorze reakcyjnej,
- **kropelki w osadzonej powłoce** – jest to cecha, która stanowi największe ograniczenie stosowania metody PLD. Ma ona znaczny wpływ na jakość powierzchni osadzanych powłok. Zakrzepnięte kropelki, czy cząstki, pojawiające się obok osadzających się atomów i jonów w otrzymywanej powłoce, występują w dwóch charakterystycznych wielkościach: <0,5 i około 1 – 3 μm. Ich ilość zależy od gęstości energii w wiązce, materiału odparowanej tarczy i nierówności na jej powierzchni i rośnie bardzo silnie wraz ze wzrostem ilości impulsów z tego samego miejsca tarczy. W celu eliminacji tego niekorzystnego zjawiska stosowane są różne metody, między innymi: poprawę gęstości i jakości powierzchni tarczy, optymalizację gęstości energii w wiązce i położenia podłoża. Inną metodą jest stosowanie filtrów prędkości pomiędzy tarczą, a podłożem,
- **adhezja** – uzyskiwane metodą PLD powłoki charakteryzują się generalnie dobrą adhezją do podłoża. Stwierdza się to pomimo występowania stosunkowo wysokich naprężeń własnych w powłokach. Osiągają one wielkości rzędu GPa. Przejście od podłoża do osadzonej powłoki ma charakter dyfuzyjny, co wiąże się z dużą energią kinetyczną z jaką odparowana struga osiąga podłoże [5],
- **przesycenie** - w powłokach z układów metalicznych (zmienna rozpuszczalność w stanie stałym) uzyskuje się wyższy stopień przycycenia niż w powłokach otrzymanych innymi technologiami niż osadzania laserem impulsowym. Następuje to na skutek dużych szybkości krystalizacji z fazy gazowej. Istnieje nawet możliwość pojawienia się struktur amorficznych w osadzanych powłokach,
- **jednorodność powłok** – powłoki (metaliczne) utworzone metodą PLD wykazują dużo większą jednorodność (w skali mikro) od tych, które wytworzone zostały na drodze rozpylania. W początkowej fazie osadzania, jak wykazały przeprowadzone badania, powstaje warstwa o strukturze jeszcze drobniejszej niż rozwijana w etapach dalszych. Wraz ze wzrostem grubości powłoki, od 50 nm do 1000 nm, zachodzi coraz wyraźniejsze pojawienie osadzonych warstw, bezpośrednio stykających się z podłożem,
- **naprężenia własne w powłoce** – osadzone powłoki charakteryzują się wysokimi naprężeniami własnymi rzędu GPa. Wysokie wartości mogą związane być z niewielką grubością i o stanie naprężeń może decydować napięcie powierzchniowe,
- **wielkość ziarna** – wytwarzane powłoki posiadają strukturę nanokrystaliczną,

- **tekstura** – dobrze wykształcona tekstura krystalograficzna to jedna z zalet metody PLD. Uprzywilejowane są łatwe kierunki wzrostu podczas krystalizacji, zazwyczaj o niskich wskaźnikach Millera.

3. KIERUNKI ZASTOSOWAŃ SYNTEZY MATERIAŁÓW

Technika LAPVD może być wykorzystywana do osadzania cienkich warstw prawie wszystkich materiałów. Wygoda stosowania tej techniki spowodowała, iż stała się ona bardzo popularna, o czym świadczy fakt, że dotychczas ponad 128 różnych materiałów było osadzanych tą techniką w postaci różnych warstw [6], a ich liczba rośnie w szybkim tempie.

Do nowych materiałów mających wpływ na postęp w elektronice należą wysokotemperaturowe nadprzewodniki (HTSC), np. tlenkowy materiał z układu Y – Ba – Cu – O (YBCO). Technologia PLD posiada istotne zalety w stosunku dotychczas stosowanych metod nanoszenia powłok HTSC.

Prowadzone są badania zastosowania techniki osadzania powłok poprzez ablację w układach nadprzewodników typu: Sr – Nd – Cu – O, Nd – Ce – Cu – O, Sr – Al – Ta – O, Cr – Ca – Cu – O lub La – Sr – Cu – O.

Ze względu na fakt, iż metoda PLD umożliwia uzyskiwanie heterogenicznych układów złożonych z nadprzewodnika, ferroelektryka oraz warstwy buforowej, w szeregu laboratoriach zagadnienie to stanowi ciągle przedmiot intensywnych badań. Przykładowo przedmiotem analizy był heterogeniczny układ SrAlTaO/steksturowany [001] LaAlO.

Prace związane z nadprzewodnikami prowadzone są w sposób ciągły, a ich wyniki pozostają jednakże w tajemnicy licznych przemysłowych laboratoriów firm produkujących układy elektroniczne.

Intensywne prace prowadzone są nad uzyskaniem metodą ablacyjnego nanoszenia powłok cienkich warstw o własnościach specjalnych. Metoda służy jako technologia wykończeniowa powierzchni, w celu uzyskania twardej i odpornej na zużycie powłoki czy uzyskania cienkiej warstwy materiału ceramicznego często o unikalnych właściwościach. Prowadzone są badania nanoszenia biomateriałów na podłożu metalicznych. W zakresie uzyskiwania warstw twardych, badania koncentrują się na wytwarzaniu warstw typu AlN, gdzie wartość CN jest wyższa od diamentu. Nanoszone są warstwy TiN na podłoża stopów metalicznych, amorficzne warstwy węglowe, a także nonofazy typu diamentu na podłożu Cu, stali nierdzewnej lub Si.

Dla uzyskania wysokich własności tribologicznych, metoda PLD jest wykorzystana w celu wytwarzania warstwy WS₂, tak na podłożu stalowym, jak i ze stopów aluminium, kompozytów MMCs na bazie Al₇Si lub warstwy TiC.

W zakresie warstw ceramicznych o różnych zastosowaniach, wykonane zostały badania naniesionych materiałów, takich jak: Al₂O₃, ZrO₂, SiC, BN, BaTiO₃ na zróżnicowane podłoża. Metoda PLD wykorzystana zostaje do wytwarzania warstw metalicznych: Au, Cu lub Ni na korundzie (Al₂O₃) czy Fe, Zr, Nb, Ti, Hf, Co, Pd w aspekcie tworzenia struktur amorficznych bądź nanokrystalicznych.

4. PODSUMOWANIE

Synteza materiałów przy użyciu promieniowania laserowego jest technologią, która staje się coraz to bardziej powszechną i zastępuje dotychczas stosowane metody wytwarzania powłok.

Technologie laserowe, ze względu na coraz łatwiejszą dostępność laserów, wprowadzane są obecnie bardzo szeroko do inżynierii materiałowej, a w szczególności do inżynierii powierzchniowej. Technika laserowa staje się narzędziem szczególnie dogodnym i niejednokrotnie jedynym w wielu zastosowaniach technicznych. Ciągły jej rozwój ma znaczący wpływ na metodę ablacyjnego nanoszenia powłok, która również rozwija i doskonali się w bardzo szybkim tempie.

Możliwość sterowania szerokiej gamy parametrów podczas procesu osadzania (np. moc lasera, długość wiązki laserowej, atmosfera i ciśnienie w komorze roboczej) powoduje, iż ilość możliwych materiałów stosowanych w metodzie PLD rośnie w szybkim tempie oraz posiadamy dużą kontrolę nad właściwościami nanoszonej powłoki (np. rodzaj struktury, grubość nanoszonej powłoki).

Wytwarzanie cienkich warstw na drodze ablacji i osadzania laserem impulsowym jest stosunkowo nową technologią i prace nad jej doskonaleniem podjęto wiele wybitnych naukowców na całym świecie.

LITERATURA

1. B. Major, Nanokrystaliczne warstwy uzyskiwane z wykorzystaniem ablacji laserowej, *Inżynieria Materiałowa*, nr 5, 2005
2. Ł. Major, J. Morgiel, B. Major, W. Rakowski, J. Lackner, Diagnostyka powłok tribologicznych typu Cr/CrN wytworzonych techniką ablacji laserowej, *Inżynieria Materiałowa*, nr 5, 2005
3. J. Kusiński, Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków 2000
4. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznastwo, Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2006.
5. B. Major, Ablacja i osadzanie laserem impulsowym, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków 2002.
6. Bonek M., Dobrzański L., Hajduczek E., Mechanizm tworzenia laserowo modyfikowanej warstwy wierzchniej stali narzędziowej, *Inżynieria Materiałowa*, nr 3, 2006
7. A. Kopia, M. Chmielowska, S. Villain, J. Kusiński, J. Gavarri, Analiza własności katalicznych i elektrycznych cienkich warstw CeO₂ domieszkowanych nd wytworzonych techniką ablacji laserowej, *Inżynieria Materiałowa*, nr 5, 2005
8. W. Mróz, J. Kasperczyk, M. Jelinek, T. Kocourek, S. Burdyńska, A. Janus, B. Major, Powłoki polimerowe uzyskiwane z wykorzystaniem ablacji laserowej w warunkach kriogenicznych metodą MAPLE, *Inżynieria Materiałowa*, nr 5, 2006
9. W. Mróz, Wpływ temperatury podłoża z hydroksyapatytu, metodą laserowej ablacji laserem typu ArF, *Inżynieria Materiałowa*, nr 5, 2006
10. W. Mróz, S. Burdyńska, M. Jelinek, T. Kocourek, B. Major, A. Prokopiuk, Y. Sakai, J. Sobiecki, Y. Suda, M. Woźniak, T. Wierzchoń, Osadzanie cienkich warstw typu DLC metodą ablacji laserowej, *Inżynieria Materiałowa*, nr 1, 2006