



Technologie laserowej obróbki powierzchni: ablacja laserowa

G. Lempart^a, A. Góra^a, M. Bonek^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny

^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 zamieszczono ogólne informacje dotyczące procesu laserowej obróbki powierzchni poprzez ablację laserową. Przeprowadzono przegląd metody, jej zastosowanie oraz scharakteryzowano parametry procesu.

Abstract: The paper provides general information about the laser surface treatment process by laser ablation. Review of the method, its application has been made, and characterized the process parameters.

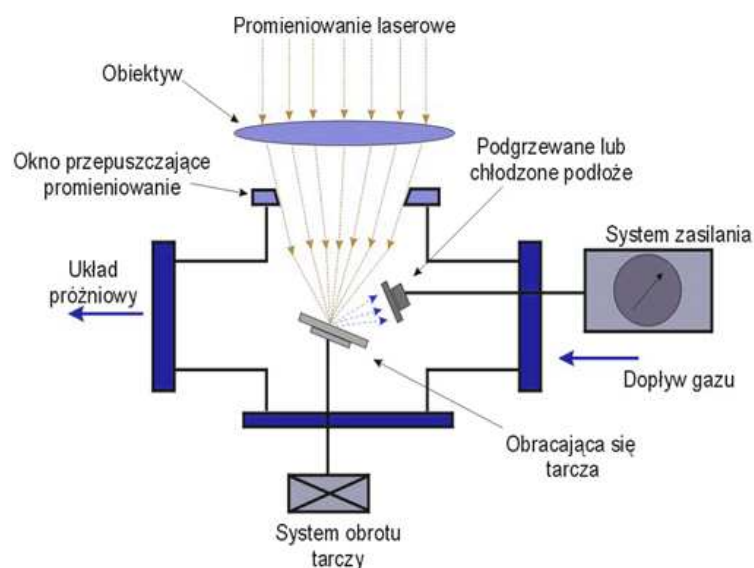
Słowa kluczowe: ablacja laserowa, czyszczenie laserowe, PLD

1. WSTĘP

Zastosowanie wiązki promieniowania laserowego w obszarze inżynierii powierzchni obecnie sprowadza się głównie do przeprowadzenia następujących operacji obróbek powierzchniowych materiałów: nagrzewania, przetapiania oraz ablacji, niekiedy utożsamianej z odparowaniem. W literaturze tematu obejmującej tematykę ablacji laserowej przyjęto bowiem, iż termin ten opisuje ogólnie proces wytwarzania par materiału poprzez oddziaływanie na jego powierzchnię wiązki promieniowania laserowego, bez precyzowania rodzaju zjawisk fizykochemicznych wywołujących ten proces [2].

2. ABLACJA LASEROWA, METODA PLD

Ablacja laserowa jest zjawiskiem wykorzystywanym do realizacji procesów rozpylania wielu materiałów w technologii wytwarzania powłok metodą PLD (*Pulsed Laser Deposition*). Zjawisko ablacyjnego odparowania materiału wywołane w tym przypadku bombardowaniem jego powierzchni przez fotony promieniowania laserowego, jest wieloetapowym złożonym procesem fizycznym, w wyniku którego z powierzchni naświetlanego materiału następuje emisja cząstek materiału tarczy [2]. Schemat ideowy urządzenia służącego do przeprowadzenia procesu ablacji laserowej przedstawiono na rysunku 1.



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

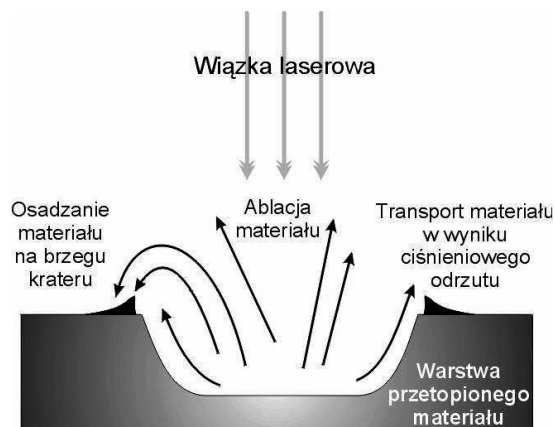
Figure 1. Schematic diagram of an apparatus for laser ablation [1]

3. MECHANIZMY ABLACJI LASEROWEJ

Generowaną w procesie laserowej ablacji wysokozjonizowaną plazmę tworzą: atomy, jony, elektrony, cząstki neutralne, kropelki roztopionego materiału.

Generalnie wyróżnić można dwa podstawowe mechanizmy ablacji laserowej [2]:

1. ablację fotochemiczną,
2. ablację fototermiczną.



Rysunek 2. Schematyczny przebieg zjawisk zachodzących podczas procesu fototermicznej ablacji laserowej [2]

Figure 2. Schematic course of the phenomena occurring during the process of photothermal laser ablation [2]

Ad. 1. Przykładowo ablacja fotochemiczna zwana „zimną ablacją” odgrywa dominującą rolę w procesie rozpylania materiałów organicznych (np. PCV). W procesie tym odpowiednio wysoka energia fotonów, bombardujących powierzchnię naświetlanego materiału, umożliwia

rozrywanie jego wiązań międzyatomowych, a ograniczone efekty cieplne pojawiają się jedynie w obszarach brzegowych strefy oddziaływania wiązki laserowej na tarczę [2].

Ad. 2. Natomiast ablacja fototermiczna jest procesem, w którym odparowanie materiału zachodzi głównie wskutek szybkiego wzrostu temperatury w przypowierzchniowych warstwach tarczy, wywołanego oddziaływaniem na materiał tarczy wiązki promieniowania laserowego, ilustracja na rysunku 2 [2].

Podstawowymi parametrami wpływającymi istotnie na przebieg ablacji fototermicznej i własności wytworzonej w tym procesie plazmy są: energetyczne parametry impulsu laserowego (gęstość energii w impulsie, czas trwania impulsu, częstość repetycji impulsów), własności optyczne i termiczne odparowywanego materiału (współczynnik absorpcji, przewodność cieplna, temperatura topnienia) oraz ciśnienie w komorze próżniowej [2].

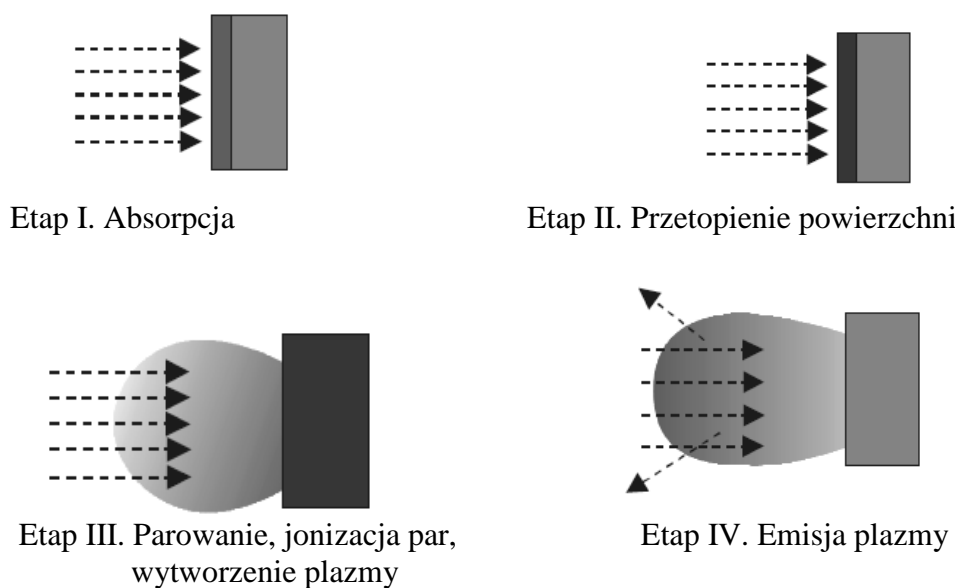
4. OSADZANIE ZA POMOCĄ LASERA IMPULSOWEGO (PLD)

Osadzanie za pomocą lasera impulsowego jest to jedna z odmian technik PVD posiadająca kilka wspólnych cech z metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) oraz z technikami rozpylania. Pozwala uzyskiwać stechiometryczne cienkie warstwy na wybranych podłożach. Wiązka lasera impulsowego pada na powierzchnię substancji w stanie stałym, zwanej dalej tarczą. Silna absorpcja wysokoenergetycznego promieniowania elektromagnetycznego prowadzi do gwałtownej sublimacji (ablacji) fragmentu powierzchni tarczy. Uzyskana w ten sposób plazma porusza się w kierunku prostopadłym do podłoża. Materiał plazmy osiada na podłożu i krystalizuje najczęściej zgodnie z układem i orientacją krystalograficzną podłoża. Proces PLD prowadzi się najczęściej w wysokiej próżni ($\sim 10^{-7}$ Pa) z możliwością dodania strumienia gazów i ich mieszanin (np. tlenu, argonu). Proces PLD można podzielić na cztery wyróżniające się kroki [5,6]:

- a) wiązka lasera poprowadzona w układzie optycznym uderza w powierzchnię tarczy,
- b) w miejscu oddziaływania wiązki laserowej następuje gwałtowna sublimacja materiału tarczy oraz w obszarze między tarczą, a podłożem pojawia się plazma,
- c) w momencie, gdy plazma dociera do powierzchni podłoża następuje jej kondensacja i wzrost cienkiej warstwy,
- d) kolejne impulsy powodują wzrost następnych warstw z ciągle powstającej plazmy.

Przez ablację laserową należy rozumieć zjawisko, w którym wiązka lasera powoduje sublimację materiału tarczy oraz prowadzi do wytworzenia strugi plazmy. Prędkość i jakość wzrostu cienkich warstw zależy przede wszystkim od gęstości, rodzaju, częstotliwości i energii lasera; stopnia jonizacji plazmy; składu chemicznego i gęstości materiału tarczy; obecności lub braku przepływu gazów; temperatury, orientacji krystalograficznej i fizyczno-chemicznych własności podłoża. Na jednorodność cienkich warstw największy wpływ ma odległość pomiędzy podłożem, a tarczą oraz istnienie lub brak przepływu gazów [5,6].

Oddziaływanie wiązki laserowej z materiałem, które prowadzi do jego odparowania (ablacji), jest procesem złożonym fizycznie. Można go podzielić na cztery etapy przedstawione na rysunku 3. W momencie, gdy wiązka laserowa napromieniowuje materiał, energia fotonów promieniowania laserowego zostaje wykorzystana do wzbudzenia elektronów i następnie zamienia się w energię cieplną (etap I), co powoduje równoczesne topienie cienkiej warstwy materiału (etap II), przy czym cała strefa stopiona ulega ablacji czyli gwałtownemu odparowaniu, nie pozostając na powierzchni obrabianego materiału (etap III), a z kolei następuje jonizacja i rozprężanie par oraz tworzenie się i eksplozyjne rozprzestrzenienie się plazmy w komorze roboczej, głównie w kierunku pokrywanego przedmiotu (etap IV) [3].



Rysunek 3. Etapy procesu odparowania laserowego [3]

Figure 3. Stages of the laser evaporation process [3]

W wyniku wykorzystania zjawiska ablacji laserowej, na obrabianej powierzchni następuje synteza materiałów i powstają warstwy złożone z czystych metali lub faz, w następujących technologiach [3]:

- laserowo wspomaganego fizycznego osadzania z fazy gazowej LAPVD (j. ang.: *Laser Assisted Physical Vapour Disposition*) zwanego też ablacyjnym osadzaniem powłok,
- laserowo wspomaganego chemicznego osadzania z fazy gazowej LACVD (j. ang.: *Laser Assisted Chemical Vapour Deposition*),
- laserowej syntezy z cieczy i gazów.

Do podstawowych zastosowań zjawiska ablacji należy zaliczyć [3]:

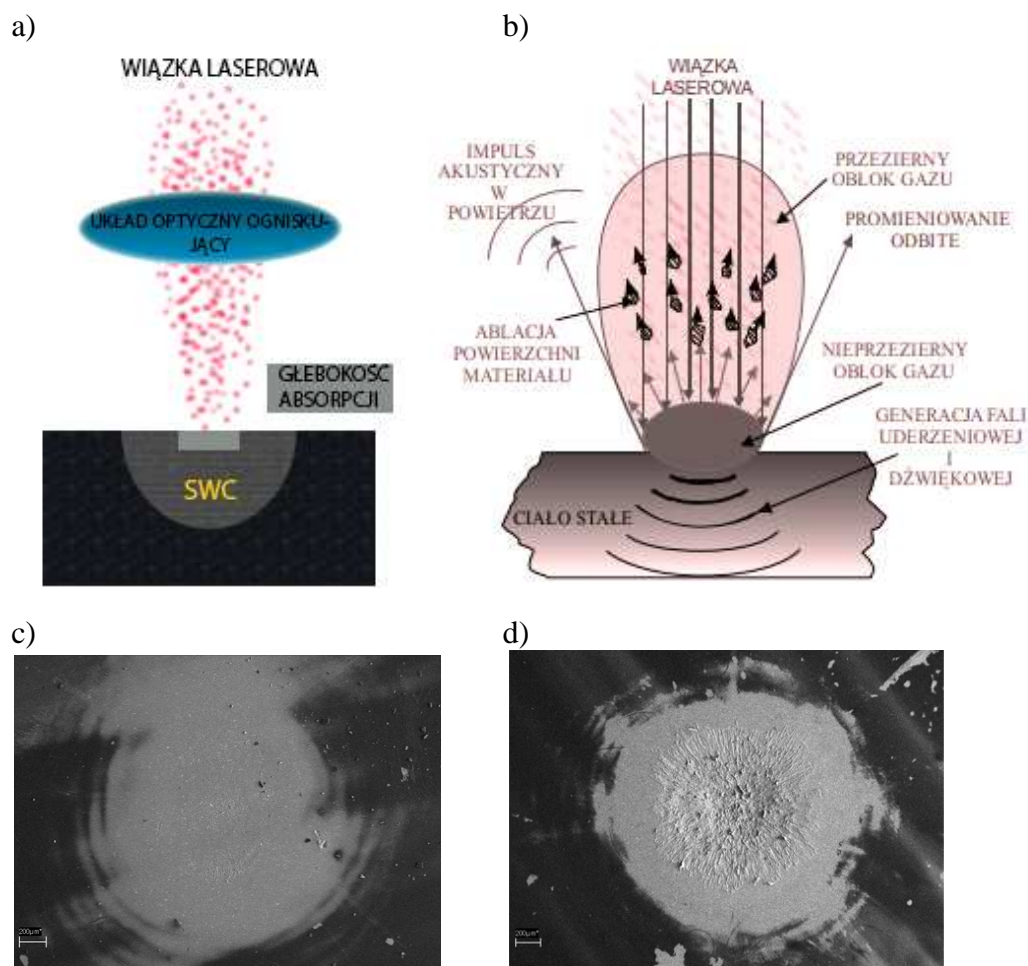
- odparowanie materiału z tarczy i nanoszenie jego par na materiał podłoża,
- usuwanie zbędnego materiału, w celu oczyszczenia zabrudzonej powierzchni (proces stosowany często przy renowacji zabytków i dzieł sztuki); proces może być prowadzony w próżni, atmosferze powietrza oraz w obecności gazów obojętnych,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

5. ISTOTA ABLACYJNEGO CZYSZCZENIA LASEROWEGO MATERIAŁÓW

W celu oczyszczenia z dużą precyzją niewielkich powierzchni zabytkowych przedmiotów, elementów elektroniki, elementów maszyn wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych, wykorzystanie promieniowania laserowego staje się niezastąpione, a w niektórych przypadkach jedynie skuteczne [4].

Pod tym pojęciem rozumie się odparowanie warstwy wierzchniej różnego rodzaju materiałów: metali, ceramik, tworzyw sztucznych i innych. Proces ablacji występuje w trakcie trwania impulsu laserowego, występuje oddziaływanie promieniowania laserowego (pochłanianie i rozpraszanie) z wyrzucaniem materiału (w postaci pary i cieczy). W wyniku napromienienia powierzchni materiałów za pomocą impulsu promieniowania laserowego

o odpowiedniej gęstości energii w czasie (gęstości mocy), zachodzą takie zjawiska jak: absorpcja promieniowania, zjawiska cieplne lub fotochemiczne. Pożądanym jest mały współczynnik odbicia promieniowania, a odpowiednio duże wzbudzenie powierzchni wymaga wiązek laserowych o dużych natężeniach i małej głębokości absorpcji promieniowania laserowego (rys. 4) [4].



Rysunek 4. Oddziaływanie impulsowego promieniowania laserowego z materiałem a) dla gęstości mocy $q \leq 103\div 105 \text{ W/cm}^2$; b) dla gęstości mocy $q \approx 108\div 109 \text{ W/cm}^2$; c,d) efekty końcowe umocnienia udarowego (LSP) dla stopu aluminium PA31 obciążonego jednym impulsem (c) oraz dwoma impulsami laserowymi (d) [4]

Figure 4. The impact of pulsed laser radiation with matter a) the power density $q \leq 103\text{-}105 \text{ W/cm}^2$; b) power density $q \approx 108\text{-}109 \text{ W/cm}^2$; c, d) the final results strengthen the impact (LSP) for aluminum alloy PA31 – laden one pulse (c) and two laser pulses (d) [4]

Grubość odparowanej warstwy wierzchniej (głębokość ablacji) zależy od [4]:

- parametrów materiału: optycznych – głębokości absorpcji promieniowania lasera; termicznych – współczynnika przewodzenia ciepła, współczynnika dyfuzji temperatury i ciepła parowania;
- parametrów wiązki laserowej: długości fali promieniowania lasera (występuje silna zależność współczynnika absorpcji materiału od długości fali), gęstości energii i czasu trwania impulsu laserowego.

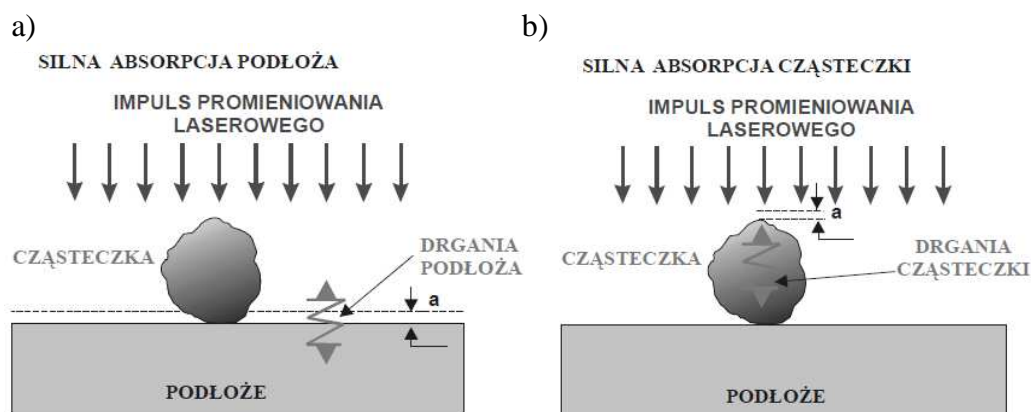
Dla odpowiednich zastosowań warstwy wierzchniej materiału powinny być znane parametry [4]:

1. materiału: współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe, moduł sprężystości, granica plastyczności, współczynnik rozszerzalności cieplnej, zależność temperatury topnienia od ciśnienia, współczynnik absorpcji (odbicia) promieniowania lasera i wiele innych;
2. lasera: długość fali promieniowania laserowego, moc (w impulsie lub średnia związana z częstotliwością repetycji impulsów), kąt rozbieżności wiązki laserowej oraz czas trwania impulsu, rozkład gęstości energii w przekroju poprzecznym wiązki laserowej;
3. geometrii oświetlenia obrabianego materiału (wymiary plamki laserowej);
4. metody obróbki, otaczającego ośrodka: atmosfera gazu obojętnego (np. hel), reaktywnego (np. azot pod zadaniem ciśnieniem) lub w próżni.

Oczyszczanie powierzchni z zalegających na niej cząsteczek, nawarstwień obcych może zachodzić w środowisku mokrym lub suchym.

5.1. Czyszczenie suche

Przy czyszczeniu suchym można wyróżnić dwa skrajne przypadki. W pierwszym dobiera się długość fali silnie absorbowaną tylko przez podłoże (rys. 5a). W drugim, promieniowanie laserowe jest silnie absorbowane jedynie przez cząsteczkę. Oba przypadki zilustrowano na rysunku 5. W pierwszym przypadku zjawisko odrywania cząsteczki wyjaśnia się gwałtownym wzrostem grubości podłoża spowodowanym jego termicznym rozszerzeniem w wyniku absorpcji padającego promieniowania (zmiana środka masy). Pomimo iż przyrost grubości podłoża może być bardzo mały, poniżej mikrometra, to zachodzi on tak szybko, że odpowiadające mu przyspieszenie może osiągnąć wartość nawet rzędu 10^7 g. Ogromne przyspieszenie prowadzące do usuwania cząsteczek z powierzchni można również uzyskać w przypadku silnej absorpcji promieniowania przez samą cząsteczkę (rys. 5b) [4].



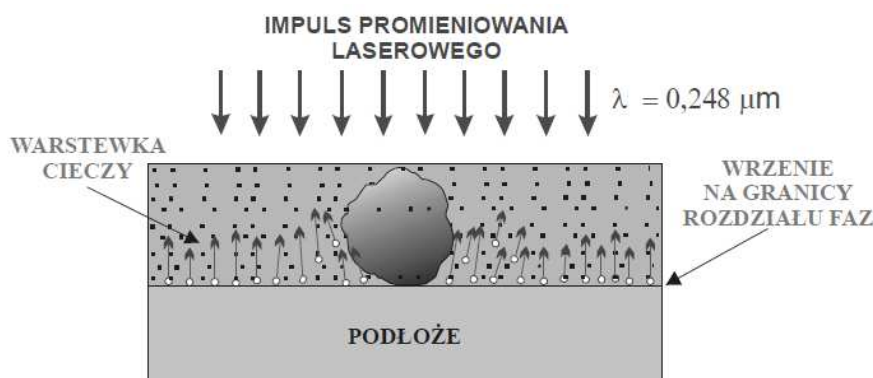
Rysunek 5. Ilustracja usuwania „na sucho” mikrocząsteczek z podłoża [4]

Figure 5. Figure of removal "dry" microparticles from substrates [4]

5.2. Czyszczenie mokre

Czyszczenie laserem może być również wydajne w wyniku wprowadzenia cieniutkiej warstewki cieczy, którą rozprowadza się na zabrudzonej powierzchni tuż przed przybyciem impulsu promieniowania laserowego. W szczególności tą ciekłą warstewką może być

warstewka wody lub roztworu wodnego z innymi cieczami organicznymi lub nieorganicznymi. Szybka ablacja warstewki cieczy powoduje wytworzenie ogromnych krótkotrwałych sił, które pokonują siły adhezji na granicy cząsteczka-podłoże, powodując odrywanie cząsteczki. Ablacja cienkiej warstewki cieczy może być spowodowana selektywnym grzaniem przez promieniowanie laserowe, np. grzanie tylko podłoża, grzanie tylko cienkiej warstewki cieczy, oraz grzanie mieszane zarówno cząsteczki jak i warstewki cieczy. Jedną z tych metod zilustrowano na rysunku 6. Metodę tę opracowano i rozwinięto ze względu na najwyższą sprawność czyszczenia laserem różnych zanieczyszczeń i podłoży [4].



Rysunek 6. Ilustracja laserowego czyszczenia powierzchni „na mokro” [4]

Figure 6. Illustration of “wet” laser surface cleaning [4]

6. PODSUMOWANIE

Istnieje wiele technologii usuwania i czyszczenia powierzchni, ale niewiele z nich spełnia wymogi ekonomiczne i ochrony środowiska. Laserowa obróbka powierzchni spełnia lub przewyższa wymagania stawiane przez elektronikę, przemysł nuklearny, kosmiczny i inżynierię lądową. Trzy typy najczęściej używanych laserów oferują charakterystyczne dla siebie zalety w postaci średnich mocy, pracy impulsowej, długości fali, zdolności do sprzężenia z materiałem obiektu i dostarczania światłowodem. Elementy elektroniczne mogą być bardzo skutecznie oczyszczane przy wykorzystaniu systemów usuwania cząstek za pomocą laserów. Systemy takie mogą pracować w otoczeniu mokrym i suchym i pracują optymalnie gdy na powierzchni przepływa ciecz usuwająca zanieczyszczenia. Cząstki zanieczyszczeń są najczęściej związane z powierzchnią siłami kowalencyjnymi, elektrostatycznymi, jonowymi lub Van der Waalsa. Do usunięcia ściśle przylegających warstw wymagana jest ablacja laserowa. Ablację osiąga się poprzez szok termiczny, topnienie i odparowanie. Usunąć można warstwy farby, tlenków, cienkie warstwy podkładu i inne warstwy organiczne/nieorganiczne. Najważniejsze jest pełne rozpoznanie oddziaływań lasera z materiałem w opracowaniu prawidłowych parametrów procesu. Pomocą w określeniu jakie zjawisko przeważa (obróbka cieplna, topnienie, odparowanie) jest znajomość absorpcji energii, transferu ciepła i współczynnika odbicia.

Efekt ablacji materiału promieniowaniem elektromagnetycznym o długości fali w przedziale od kilku do kilkudziesięciu nanometrów wykorzystuje się w technologii mikro- i nanoobróbki polimerów organicznych promieniowaniem EUV (j. ang.: *extreme ultraviolet*) wytwarzanym z zastosowaniem źródeł laserowo-plazmowych. Wytworzenie odpowiedniej struktury na powierzchni materiałów polimerowych powoduje duży wpływ na ich hydrofobowość, zwilżalność, adsorpcję, przyczepność oraz własności optyczne.

LITERATURA

1. M. Bonek, Technologie laserowe w inżynierii powierzchni, Politechnika Śląska.
2. J. Bujak, Ocena wpływu wybranych parametrów impulsowej wiązki laserowej na wydajność procesu ablacji tytanu, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom.
3. L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich: Technologie kształtowania struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich z wykorzystaniem promieniowania laserowego i innych technologii spawalniczych, Open Access Library 5 (2011) 181-225.
4. T. Burakowski, J. Marczak, W. Napadłek, Istota ablacyjnego czyszczenia laserowego materiałów, Prace Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, Zeszyt 228, Warszawa, 2006.
5. P.J. Morais, H. Gouveia, Laser beam in the service of paintings restoration, Romanian Reports in Physics 62/ 3 (2010) 678-686.
6. T. Tsuji, K. Iryo, Preparation of metal colloids by a laser ablation technique in solution: influence of laser wavelength on the ablation efficiency, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 145 (2001) 201-207.