



Przegląd aplikacji lasera w inżynierii materiałowej

P. Busz^a, A. Podolska^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: Niniejszy artykuł stanowi literaturowy przegląd aplikacji lasera w inżynierii materiałowej. Opisuje techniki laserowe w obróbce powierzchniowej (od obróbki cieplnej i przetopieniowej, przez stopowanie i ablację laserową po wytwarzanie cienkich warstw oraz polerowanie) oraz inne, takie jak spawanie, napawanie, znakowanie, kodowanie i grawerowanie czy oczyszczanie dzieł sztuki. Pokróćce scharakteryzowano laserowe metody obróbki oraz przytoczono naukowe prace badawcze opisujące szerzej dane procesy i ich konkretne zastosowanie.

Abstract: This article is a literature review about the laser application in the material science area. The paper describes techniques for laser surface treatment (from the heat and laser-melting treatment, by alloying and laser ablation to thin layers and polishing) and others, such as welding, surfacing, marking, coding, engraving and laser cleaning of art works. The laser treatment methods and scientific researches describing their applications are presented.

Słowa kluczowe: zastosowanie laserów, laserowa obróbka powierzchniowa, spawanie laserowe, laserowe znakowanie, kodowanie, grawerowanie, laserowe oczyszczanie dzieł sztuki

1. WSTĘP

Techniki laserowe znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach, nie tylko w obszarze inżynierii materiałowej. Dzieje się tak dzięki różnicowaniu własności promieniowania laserowego, w zależności od długości generowanej fali lub energetyczności wiązki. Również rozwój nauki w elektronice i optoelektronice przyczynia się do poprawy jakości wiązki promieniowania laserowego przy jednoczesnym obniżaniu kosztów urządzeń, co wpływa na coraz powszechniejsze zastępowanie konwencjonalnych technologii laserowymi oraz opracowywanie nowych możliwości jej wykorzystania. Zastosowanie technologii laserowej w inżynierii materiałowej opiera się głównie o obróbkę powierzchniową. Aktualne zastosowanie obróbki laserowej w inżynierii powierzchni to:

- nagrzewanie powierzchni celem przeprowadzenia procesów obróbki cieplnej takich jak hartowanie, wyżarzanie, przesycanie lub rekrytalizacja;

- nadtapianie powierzchni celem ujednorodnienia i rozdrobnienia mikrostruktury oraz wytwarzania struktur metastabilnych po szybkiej krystalizacji;
- stopowanie laserowe służące zmianie składu chemicznego powierzchni;
- ablacja laserowa i osadzanie impulsowe celem wytwarzania cienkich warstw.

Wiązkę promieniowania laserowego wykorzystuje się powszechnie również w procesach spawania, deponowania (napawania) oraz cięcia. Ponadto pewne zastosowanie znalazła również w takich procesach, jak np. nanoszenie znaków barwnych na podłoża ceramiczne, kodowanie i grawerowanie czy oczyszczanie. Wszystkie omówiono pokrótce w niniejszej pracy.

2. INŻYNIERIA POWIERZCHNI

2.1. Przetopieniowa obróbka laserowa materiałów inżynierskich

Laserową obróbkę z przetopieniem warstwy powierzchniowej stosuje się celem poprawy własności trybologicznych oraz odporności na korozję elementu obrabianego. Proces ten jest również szybkim sposobem na usunięcie płytkich wad powierzchniowych [1].

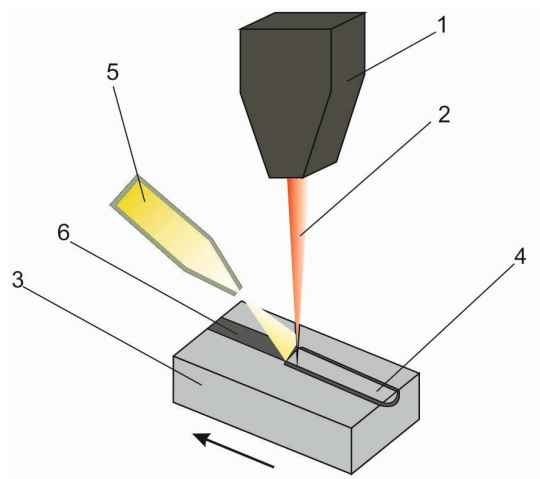
Przetopienie warstwy wierzchniej polega na bardzo szybkim nagrzewaniu powierzchni obrabianej wiązką laserową, czego efektem jest stopienie materiału na głębokość zależną od parametrów prowadzonego procesu [2]. Grubość warstwy przetopionej reguluje się bardzo precyzyjnie w zakresie od 5 μm do 5 mm. Bardzo cienkie warstwy uzyskuje się przez stosowanie wiązki impulsowej o średnicy od 5 do 20 μm , o bardzo wysokiej jakości. Przetopienie na większe grubości, rzędu milimetrowego, otrzymuje się przy wykorzystaniu laserów diodowych HPDL o mocy 4 do 6 kW lub laserów włóknowych czy tarczowych [2]. Obecnie jednak największe zastosowanie w dziedzinie przetapiania powierzchniowego wciąż znajdują lasery CO_2 o dużej mocy (nawet ponad 20 kW) i działaniu ciągłym lub impulsowym [3].

Przetapianie warstw wierzchnich stosuje się do obróbki elementów wykonanych ze stali węglowych i stopowych, stali wysokostopowych chromowych, i chromowo-niklowych, żeliwa, stopów na osnowie niklu, kobaltu, tytanu, magnezu, aluminium, miedzi oraz przedmiotów cermetalowych czy ceramicznych [2-5]. W zależności od rodzaju materiału, w czasie procesu stosuje się gazy ochronne, takie jak argon czy hel lub gazy aktywne chemicznie – $\text{Ar}+\text{CO}_2$, CO_2 , $\text{Ar}+\text{N}_2$ [2].

W efekcie działania promieniowania laserowego na materiał warstwy wierzchniej następuje jego bardzo szybkie nagrzewanie się. Ponieważ tylko niewielka część zaabsorbowanej przez powierzchnię energii cieplnej przenika w głąb materiału, na granicy przetopionego obszaru i podłoża powstaje duży gradient temperatury. Wywołuje to powstanie w ciekłym materiale ruchów konwekcyjnych, determinujących intensywne mieszanie się cieczy. Mieszanie materiału stopionego intensyfikuje również mocny nadmuch gazów stosowanych w czasie procesu. Duża różnica temperatury między powierzchnią i dnem obszaru przetopionego przyspiesza krzepnięcie cieczy. Szybkość chłodzenia równa jest ok. 10^{11} $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, co determinuje dużą prędkość krystalizacji, zazwyczaj większą od 20 m/s. Gwałtowne krzepnięcie wpływa pozytywnie na strukturę otrzymanej warstwy. Charakteryzuje się ona drobnoziarnistością i dużą jednorodnością chemiczną, a co za tym idzie, wysoką twardością, bardzo dobrą odpornością na ścieranie, erozję oraz działanie czynników zewnętrznych.

Laserowe przetapianie stopów aluminium: Al-Zn, Al-Fe, Al-Si to jeden z przedmiotów badań pracy [3]. Efektem przetopienia było powstanie struktury drobnokrystalicznej i wzrost twardości od 20 do nawet 200% w przypadku Al-Fe i Al-Si. W czasie przetapiania wydzielenia

w stopach aluminium rozpuściły się i ponownie krystalizowały w sposób charakteryzujący się znaczną dyspersją, co dodatkowo przyczyniło się do poprawy własności trybologicznych warstw. Proces przetapiania laserowego przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat laserowego przetapiania; 1 – głowica lasera, 2 – wiązka laserowa, 3 – próbka, 4 – przetapiany materiał stopujący, 5 – dysza z gazem, 6 – warstwa stopowana [30]
Figure 1. Laser-melting scheme; 1 – laser head, 2 – laser beam, 3 – probe, 4 – melting alloying material, 5 – gas nozzle, 6 – alloying layer [30]

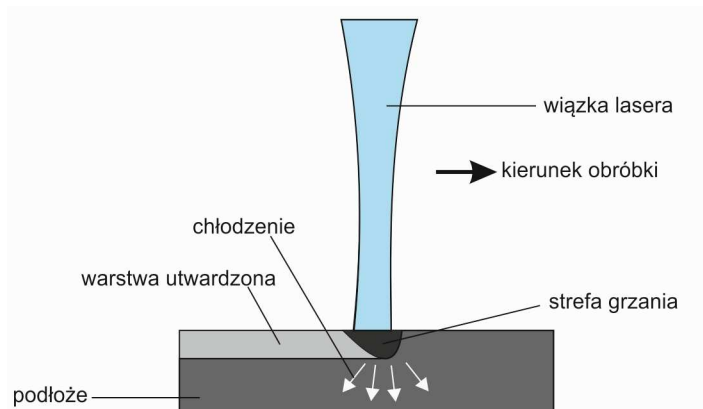
Poprawa trwałości eksploatacyjnych przez przetopienie laserowe warstwy wierzchniej stali szybko tnących była celem pracy badawczej [10]. Stale szybko tnące na narzędzia skrawające przetapiano powierzchniowo z wykorzystaniem lasera molekularnego CO₂. Wykazano ścisłą zależność grubości i struktury przypowierzchniowej strefy przetopionej, a zatem i jej własności, od parametrów nagrzewania stali (moc lasera, szybkość skanowania wiązki laserowej). Efektem przetopienia warstwy stali SW7M było powstanie struktury złożonej z drobnych kryształów kolumnowych lub dendrytów zorientowanych zgodnie z kierunkami odprowadzania ciepła, bez zmiany składu chemicznego podłoża, co znacząco podniosło jej trwałość eksploatacyjną.

Stale konstrukcyjne typu 45, 50G, 18G2, 36HNM oraz 18B28H powierzchniowo przetopione laserem poddano badaniu w pracy [3]. Efektem przeprowadzonego procesu była we wszystkich przypadkach zmiana struktury warstwy powierzchniowej stali prowadząca do poprawy własności użytkowych elementów obrabianych.

Stopy tytanu charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami użytkowymi, takimi jak korzystny stosunek wytrzymałości do gęstości czy dobra odporność korozyjna, dlatego stosuje się je na elementy maszyn, aparatury w przemyśle chemicznym oraz w lotnictwie. Ograniczeniem do szerszego zastosowania stopów Ti jest ich duży współczynnik tarcia oraz mała odporność na ścieranie. Celem poprawy własności trybologicznych stosuje się obróbkę powierzchniową stopów Ti. Jednak niektóre konwencjonalne metody obróbki cieplno-chemicznej zwiększają ich kruchość. Laserowe przetapianie powierzchni stopów tytanu jest obróbką podwyższającą ich własności trybologiczne bez pogorszenia ich własności użytkowych. Stopy tytanu przetopione powierzchniowo były tematem badań w pracy [8]. W efekcie przetopiona strefa przypowierzchniowa warstwy zmienia swoją strukturę bez zmiany składu chemicznego.

2.2. Utwardzanie laserowe i laserowa obróbka cieplna materiałów inżynierskich

Utwardzanie laserowe materiałów inżynierskich (rysunek 2), głównie stali węglowych i narzędziowych, w tym stali szybko tnącej, polega na doprowadzeniu materiału warstwy wierzchniej elementu obrabianego do zakresu austenitacji oraz odpowiednio szybkim schłodzeniu celem zajścia przemiany martenzytycznej [2,6,7,8,28,29]. Obróbka przeprowadzona w ten sposób ma za zadanie podnieść twardość powierzchni, a tym samym poprawić odporność elementu na zużycie mechaniczne.



Rysunek 2. Zasada utwardzania laserowego [32]

Figure 2. The laser hardening principle [32]

Podgrzewanie powierzchni przy wykorzystaniu wiązki promieniowania laserowego jest coraz częściej stosowane z uwagi na cechy, dzięki którym przewyższa ono metody konwencjonalne [9]. Temperatury, do których należy podgrzać powierzchnie w procesie hartowania powierzchniowego są znacznie wyższe od temperatur w hartowaniu objętościowym. Przykładowo, niektóre stale wysokostopowe wymagają temperatur bliskich temperaturze topnienia i hartowanie ich konwencjonalnie jest niezwykle energo- i czasochłonne. W hartowaniu laserowym cała energia padającej na powierzchnię wiązki lasera zużywana jest na nagrzanie warstwy wierzchniej, dzięki czemu w porównaniu do konwencjonalnego nagrzewania indukcyjnego czy w piecu, proces ten jest wielokrotnie mniej energochłonny oraz szybszy [9]. Praca [9] wskazuje na to, że opłacalność i efektywność stosowania hartowania laserowego w porównaniu do metod konwencjonalnych rośnie wprost proporcjonalnie do masy elementu. Im cięższy element obrabiany, tym korzystniejsze staje się wykorzystanie laserowych technik obróbki cieplnej. Stosunkowo, ilość energii zużytej przy hartowaniu laserowym jest od kilku do kilkudziesięciu razy mniejsza.

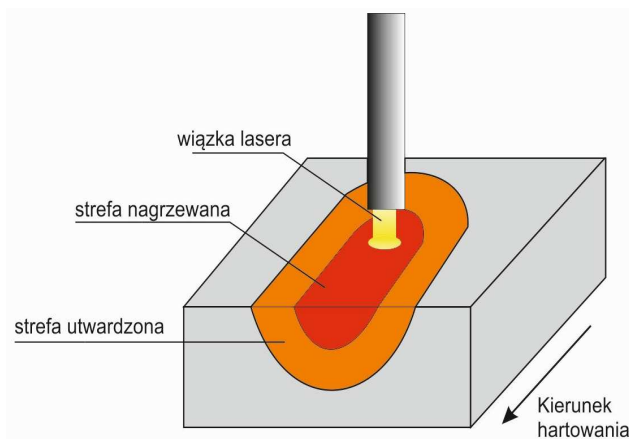
Laser wprowadza do powierzchni obrabianej określoną ilość energii niezbędną do przeprowadzenia konkretnej obróbki cieplnej. W porównaniu do obróbki indukcyjnej lub przeprowadzanej w piecach, obniżeniu ulegają naprężenia wewnętrzne struktury, a tym samym stopień odkształcenia geometrii elementu, co redukuje lub całkowicie eliminuje konieczność przeprowadzenia operacji pohartowniczych (prostowanie, odpuszczanie).

Laser zapewnia szybkie nagrzewanie powierzchni – na tyle szybkie, że nagrzewa się jedynie warstwa wierzchnia o określonej grubości (zależnej głównie od prędkości prowadzenia wiązki), a rdzeń pozostaje nienaruszony. Wpływa to na charakter schładzania powierzchni – ponieważ dno obszaru o podwyższonej temperaturze pozostaje stosunkowo

chłodne, po przejściu wiązki pochłania ono nadmiar energii cieplnej od warstw położonych wyżej. W efekcie jako pierwsze ochładzają się warstwy położone bliżej rdzenia, a warstwy zewnętrzne chłodzone są jako ostatnie dzięki czemu nie ma konieczności schładzania elementu w ośrodkach chłodzących [3]. Ma to wpływ na wartości naprężeń i odkształceń występujących w powierzchni obrabianej. W porównaniu do stanu po hartowaniu konwencjonalnym, są one niższe, a tym samym korzystniejsze.

Podsumowując, w porównaniu do hartowania powierzchniowego konwencjonalnego, hartowanie laserowe (rysunek 3) charakteryzuje się [2,9]:

- brakiem konieczności stosowania medium chłodzącego – wpływ na obniżenie kosztów obróbki i szkodliwości dla środowiska i człowieka;
- brakiem konieczności stosowania obróbki mechanicznej po hartowaniu – wpływ na obniżenie kosztów obróbki i materiału;
- możliwością szybkiego utwardzania selektywnych obszarów – wpływ na obniżenie kosztów obróbki cieplnej elementu;
- wyższą twardością otrzymanych warstw;
- łatwością zsynchronizowania w linii produkcyjnej (łatwa robotyzacja, automatyzacja);
- małą prędkością utleniania powierzchniowego – eliminacja dodatkowej wykańczającej obróbki mechanicznej po hartowaniu – wpływ na obniżenie kosztów obróbki;
- możliwością utwardzania powierzchniowego małych oraz bardzo dużych elementów (do kilku ton), o dowolnym kształcie (np. skomplikowane zęby wewnętrzne lub zewnętrzne kół zębatych);
- brakiem problemu nadmiernej kruchości i nadmiernych naprężeń cieplnych materiału obrabianego.



Rysunek 3. Hartowanie laserowe [31]

Figure 3. Laser quenching [31]

Całość wpływa na obniżenie kosztów związanych z przeprowadzaną obróbką, co wpływa na wzrost zainteresowania hartowaniem laserowym i obróbką cieplną przeprowadzaną laserowo wśród większych i średnich firm produkcyjnych. Wciąż wysokie ceny generatorów promieniowania laserowego przyczyniają się do konieczności ich stosowania tam, gdzie produkcja jest seryjna lub większa. Hartowanie laserowe stosuje się do obróbki m.in.: całych powierzchni roboczych wałków, łożysk, nurników, matryc i stempli pras do obróbki plastycznej, form wtryskarek tworzyw sztucznych lub do obróbki części powierzchni roboczych,

takich jak krawędzie tnące nożyc, wykrojników, powierzchnie trące pierścieni tłokowych, do cięcia arkuszy blach lub włókien czy powierzchnie rozdzielające form odlewniczych [6,9].

Praca [7] dowiodła, że laserowa obróbka utwardzająca powierzchni stempla do obróbki plastycznej metali podnosi jego trwałość od 1,5 do 5 razy, w zależności od gatunku stali z której jest on wykonany i charakteru pracy narzędzia. Hartowanie laserowe stali narzędziowych do pracy na gorąco o zawartości węgla ok. 0,4%, takich jak stale do produkcji matryc lub przekładni i części maszyn (np. C45 lub 42CrMo4), pozwala uzyskać powierzchnie o twardości do 58HRC [6]. Hartowanie laserowe elementów wykonanych ze staliwa lub żeliwa o strukturze perlitycznej umożliwia z kolei polepszenie twardości powierzchni do 65HRC. W ten sposób ulepsza się powierzchnie tłoczników i matryc do tłoczenia blach na zimno czy elementy urządzeń do naciągania kabli i lin [6]. Lokalne hartowanie laserowe można stosować w zastępstwie procesów nawęglania i azotowania [7]. Wiąże się to z eliminacją wielu energochłonnych procesów, takich jak wygrzewanie elementów przez wiele godzin w temperaturach bliskich 1000°C i późniejsze operacje odpuszczania czy procesów przygotowawczych, np. miedziowania w przypadku nawęglania. Sprzyja to również znacznemu skróceniu czasu całkowitej obróbki elementów. Hartowanie laserowe nie może jednak zastąpić procesu azotowania przeprowadzanego celem podniesienia odporności korozyjnej przedmiotu obrabianego. Znajduje natomiast zastosowanie w obróbce stali HSS, które swoją odporność korozyjną zawdzięczają wysokiej zawartości chromu czy molibdenu [1].

Zastosowanie w obróbce cieplnej materiałów lasera wysokiej mocy HPDL gwarantuje bardzo szybkie nagrzewanie powierzchni i umożliwia ścisłą kontrolę temperatury niewielkich objętości materiału [1]. Przekłada się to na łatwość regulacji grubości oddziaływania oraz wynikową twardość w procesie laserowego hartowania powierzchniowego. Możliwość kontroli mocy wiązki pozwala na jej zastosowanie również w procesach odpuszczania czy wyżarzania [1].

2.3. Laserowa obróbka powłok ze stopów niklu natryskiwanych płomieniowo i plazmowo

Własności trybologiczne i problematyka z nimi związana występuje we wszystkich gałęziach przemysłu. Pomimo stosowania nowoczesnych technologii polepszających własności warstwy wierzchniej, nadal modyfikuje się rozwiązania już istniejące jak i poszukuje się nowych. Jedną z technologii, która kreuje szerokie możliwości kształtowania warstwy wierzchniej jest obróbka laserowa. Zainteresowanie technologią obróbki laserowej uwarunkowane jest poprzez specyficzne własności oraz możliwości budowy źródeł promieniowania o różnych parametrach. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi laser w przypadku nagrzewania materiału są: rodzaj pracy (ciągły lub impulsowy), moc emitowanego źródła ciepła, długość fali promieniowania i rozkład gęstości energii na przekroju poprzecznym wiązki [10].

W zakresie obróbki materiałów głównie stosowanymi w przemyśle są lasery gazowe CO₂ oraz lasery na ciele stałym Nd:YAG. Szczególnie interesująca jest możliwość wykorzystania obróbki laserowej do polepszenia własności powłok natryskiwanych cieplnie. Pozwala ona na likwidację lub znaczne zmniejszenie porowatości, wzrost twardości, odporności na zużycie, korozję, utlenianie.

Do wykonania doświadczenia użyto próbek wykonanych ze stali niskowęglowej o wymiarach 30x30x3 mm. Jako materiał powłokowy wybrano następujące rodzaje proszków: NiAl, NiCr, NiCrAlMoFe. Ocena wpływu obróbki laserowej na własności powłok natryśniętych cieplnie została przeprowadzona na podstawie badań [10]:

- makrogeometrii powierzchni,

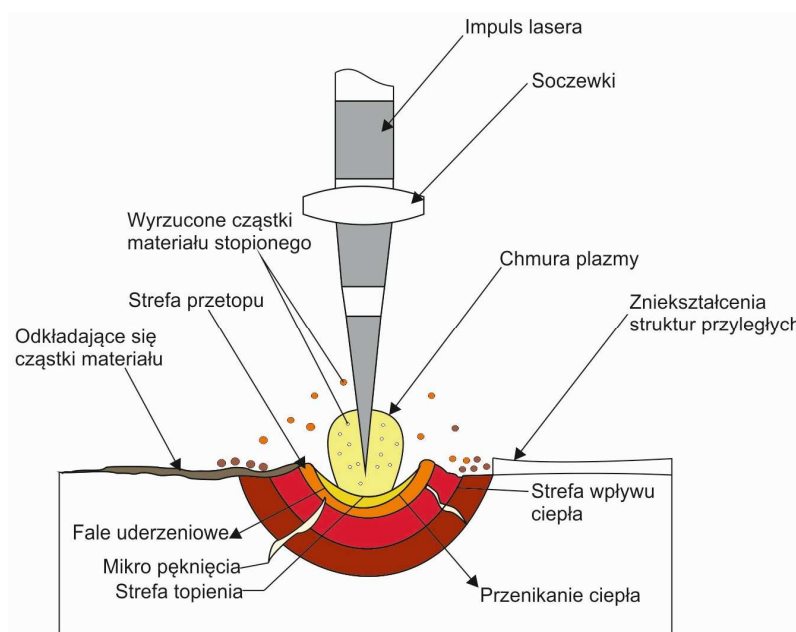
- odporności na zużycie ściernie,
- mikrostruktury,
- mikrotwardości.

W rezultacie przeprowadzonych badań przebiegu i efektów laserowej obróbki powłok natryskiwanych płomieniowo i plazmowo można sformułować następujące spostrzeżenia [10]:

- powłoki natryśnięte plazmowo posiadały bardziej spójną i zwartą budowę niż powłoki natryśnięte płomieniowo;
- pomiary makrogeometrii kształtu powierzchni powłok dowiodły, że powłoki po natryśnięciu plazmowym cechowały się mniejszą nierównością niż powłoki po natrysku płomieniowym;
- powłoki po przetopieniu laserowym charakteryzowały się większą odpornością na zużycie ściernie, w przeciwieństwie do powłok po samym natrysku cieplnym. Najwyższą odporność na zużycie ściernie wykazywała powłoka NiCrAlMoFe, najmniej odporna na zużycie ściernie była powłoka NiCr;
- w wyniku obróbki laserowej wzrosła mikrotwardość wszystkich powłok. Na mikrotwardość powłok po obróbce laserowej miały wpływ następujące parametry: moc promieniowania laserowego, rodzaj materiału powłokowego oraz metody natryskiwania;
- przetopienie laserowe mocą 800 W doprowadziło do ujednorodnienia składu chemicznego w powłokach oraz wyeliminowania ich porowatości. Przy mocach 1000, 1200 oraz 1400 W w warstwie przetopionej wystąpiły pory oraz pęknięcia.

2.4. Ablacyjna mikroobróbka laserowa

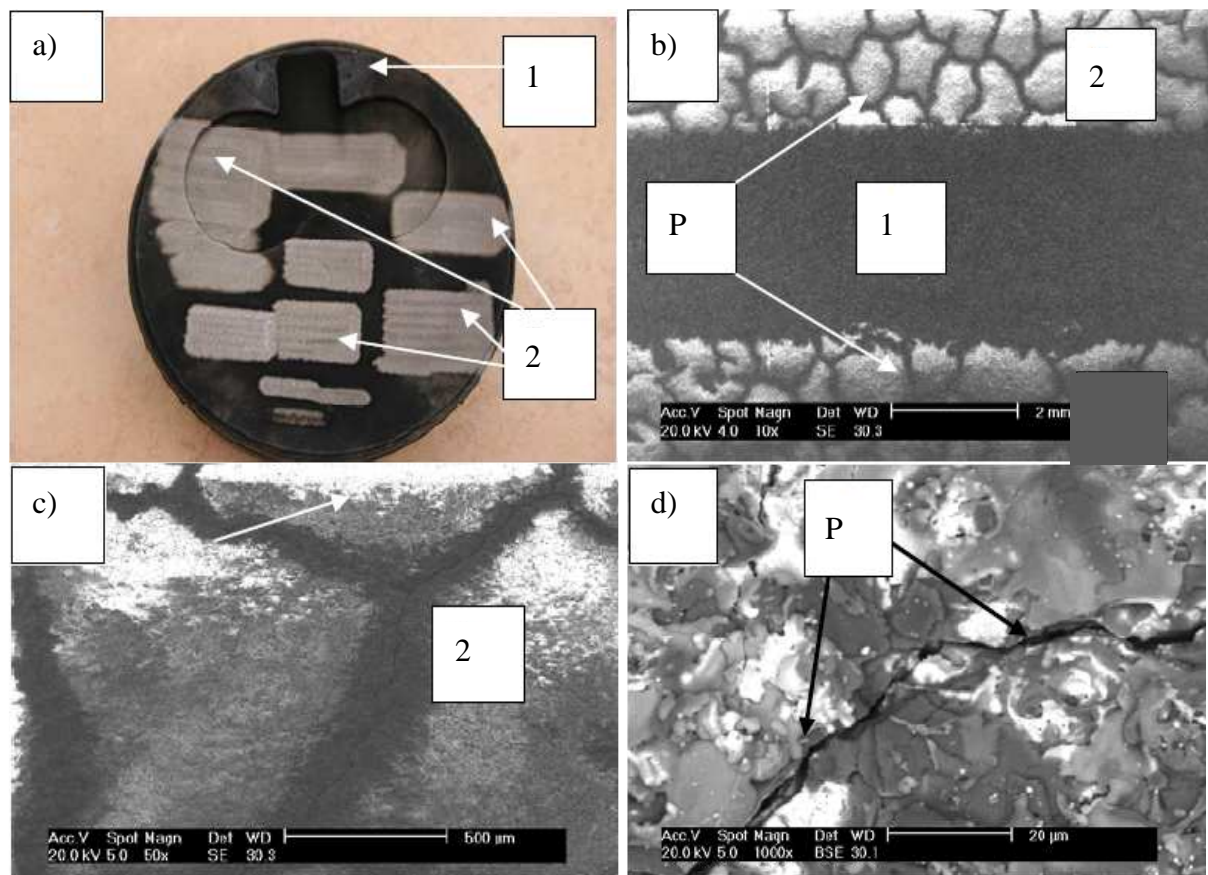
Pojęcie ablacji laserowej oznacza usuwanie warstw wierzchnich materiałów o kontrolowanej grubości, w wyniku absorpcji impulsowego promieniowania laserowego, szybkiego nagrzania i odparowania warstwy wierzchniej, gdzie materiał ze stałego stanu skupienia przechodzi w stan gazowy, pomijając fazę ciekłą. Proces ablacji przedstawiono na rysunku 4 [11].



Rysunek 4. Ablacja laserowa – laser o impulsie mikrosekundowym [33]

Figure 4. Laser ablation – laser with microsecond impulse [33]

Jednym z przykładów zastosowania technologii laserowej wykorzystującej mikroobróbkę ablacyjną może być tworzenie zmodyfikowanych mikro- i nanostruktur w warstwie wierzchniej na elementach silnika. Struktura powstaje przez oddziaływanie szybkozmiennych impulsów laserowych które wymuszają proces ablacji laserowej, a co za tym idzie rozdrobnienie mikrostruktury oraz ultraszybkie przemiany fazowe [11].



Rysunek 5. Topografia powierzchni termoizolacyjnej powłoki barierowej TBC_S (40%Al₂O₃ + ZrO₂+Y₂O₃) na denku tłoka silnika spalinowego 4CT90 po próbie na stanowisku hamowni i oczyszczeniu laserowym z warstwy nagaru: a) widok denka tłoka z obszarami oczyszczonymi laserowo przy różnych parametrach obróbki, b) fragment topografii powłoki ceramicznej z widocznymi obszarami przed (nagar) i po oczyszczeniu – widoczna regularna siatka mikro-pęknięć w strefie oczyszczonej, c-d) strefy powłoki barierowej oczyszczonej laserowo; 1 – strefy powłoki pokrytej nagarem będącym produktem spalania mieszanki paliwowo-powietrznej, 2 – strefy powłoki oczyszczonej laserowo z nagaru, P – makro- i mikro-pęknięcia jako efekt szoków termicznych i wyzwalania się naprężeń własnych [12]

Figure 5. Surface topography of the thermoinsulating layer of TBC_S (40%Al₂O₃ + ZrO₂+Y₂O₃) at the bottom of the combustion engine piston 4CT90 after dynamometer testing and laser cleaning to clean off the carbon deposition: a) picture of the bottom of the combustion engine piston with areas cleaned in differential parameters, b) the part of ceramic layer's surface topography with the view on the areas before and after cleaning – the network of the microcracks is visible in the cleaned area, c-d) laser cleaned barrier coating's areas; 1 – carbon deposited coating area, 2 – laser cleaned coating area, P – makro- and microcracks as an effect of thermal shocks and internal stresses releasing [12]

Procesy modyfikacji laserowej wpływają dwojako na mikrostrukturę: jakościowo, struktura uzyskana w procesach wykorzystujących wiązkę lasera nie jest możliwa do uzyskania innymi technologiami; a także pozwala precyzyjnie kształtować mikrozasobniki smarowe w newralgicznych strefach zużycia trybologicznego, występujących w elementach maszyn, w tym również w silnikach spalinowych. Innymi słowy zastosowanie tej technologii pozwala na gromadzenie środka smarnego (np. oleju silnikowego) w newralgicznych węzłach trybologicznych, skuteczniejsze rozdzielanie par trących, a tym samym istotne zmniejszenie sił tarcia, zwiększenie trwałości i niezawodności wielu elementów maszyn oraz zwiększenie ich sprawności technicznej. Teksturowanie wykorzystujące ablację laserową może być stosowane przed obróbką mechaniczną półwykańczającą (np. przed szlifowaniem) lub przed ostateczną obróbką wykańczającą, np. przed polerowaniem. Przykładem ablacyjnego oczyszczania laserowego warstwy wierzchniej elementów silnika jest usuwanie nagaru z powierzchni denka i płaszcza tłoka (rys. 5) [12].

Innym przykładem zastosowania ablacji jest oczyszczanie laserowe powierzchni. W tym wypadku elementy zostały prawie całkowicie oczyszczone z produktów korozji. Czysta powierzchnia charakteryzuje się dużymi nierównościami, które są efektem niszczącego działania korozji. Dzięki zastosowaniu oczyszczania laserowego w celu usunięcia powstałej warstwy tlenków, można skutecznie usunąć nawarstwienia, należy jednak wziąć pod uwagę fakt, iż trudno jest uniknąć efektu mikronadtopień warstwy wierzchniej.

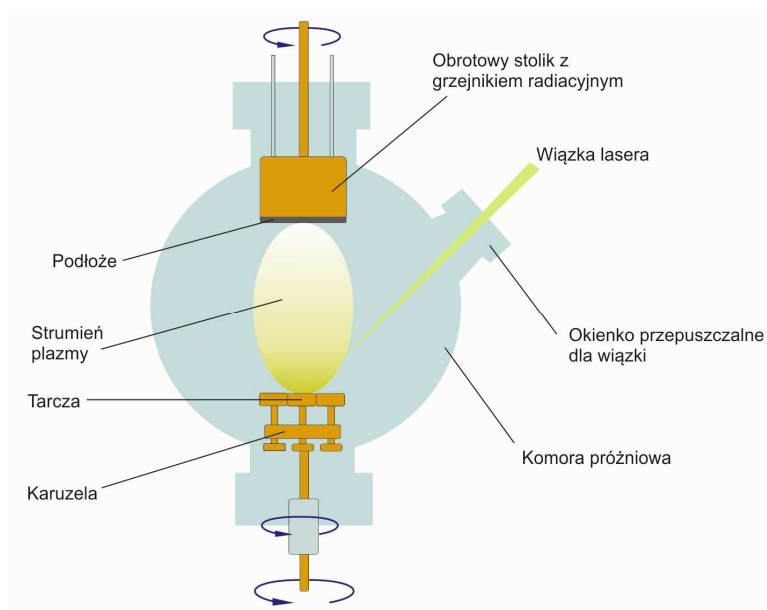
Pomimo występowania ubocznych skutków oddziaływania tej metody, po procesie uzyskuje się powierzchnie metalu o wysokiej czystości. W przypadku zastosowania obróbki mechanicznej mającej na celu usunięcie korozji, zostałaby zdjeta bardzo duża objętość materiału. Skutkiem tego typu operacji jest znaczne zmniejszenie przekroju krytycznego, a tym samym osłabienie wytrzymałości mechanicznej i zmęczeniowej materiału konstrukcji skrodowanego elementu nadwozia samonośnego lub ramy. Jest to również związane ze znacznym zwiększeniem zużytej w naprawie masy szpachlowej, co niekorzystnie wpływa na jakość naprawy. Ablacyjne oczyszczanie laserowe pozwala uzyskać bardzo wysoką czystość metaliczną materiału, zbliżoną do stanu przed naprawą oraz istotnie wpływa na zminimalizowanie ilości materiałów stosowanych do naprawy samochodów [13].

2.5. Wytwarzanie cienkich warstw – laser impulsowy (*Pulsed Laser Deposition – PLD*)

Działanie wiązką laserową na materiał powłoki i osadzenie się powstałych par gazu lub plazmy na podłożu zwane jest ablacją (sublimacją) laserową. Zjawisko ablacji wykorzystywane jest w metodzie wytwarzania cienkich warstw znaną pod nazwą PLD (*Pulsed Laser Deposition*). Odparowany z tarczy na skutek działania impulsów światła lasera fragment materiału sublimuje i w postaci plazmy porusza się w stronę podłoża [14]. Plazma następnie osadza się na podłożu elementu obrabianego i krystalizuje, najczęściej zgodnie z orientacją i w układzie krystalograficznym odpowiednim dla podłoża (rys. 6). Proces PLD przeprowadza się najczęściej w próżni, ale również w atmosferze gazów obojętnych lub w atmosferze reagującej.

PLD jest techniką stosunkowo nową i dotychczas stosowaną głównie do wytwarzania warstw dla elektroniki [3]. Obecnie naukowcy w licznych laboratoriach pracują nad szerszym zastosowaniem metody i polepszeniem jakości już wykorzystywanych technik.

W pracy [3] wykazano możliwość wykorzystania procesu PLD do otrzymywania cienkich powłok metalicznego tytanu, azotku tytanu i tlenku tytanu o wysokiej jakości. Otrzymane warstwy charakteryzuje struktura nanokrystaliczna, duża jednorodność i dobre przyleganie do podłoża, którą jest stal ferrytyczna.



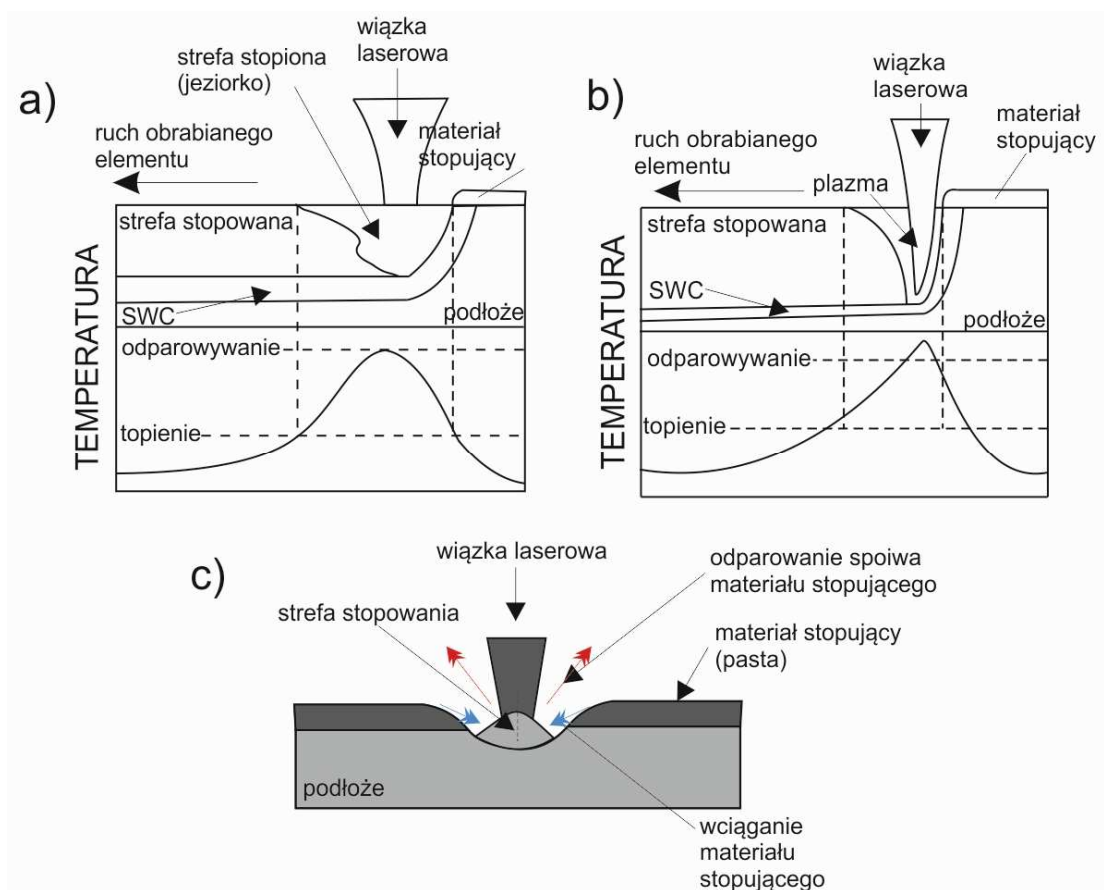
Rysunek 6. Schemat procesu PLD [34]
 Figure 6. The PLD process scheme [34]

2.6. Stopowanie laserowe

Stopowanie laserowe (*Laser Surface Alloying – LSA*) jest najnowocześniejszym procesem obróbki cieplno-chemicznej, polegającym na wzbogacaniu warstw wierzchnich materiałów w dodatki stopowe oraz zmianie ich struktury (rys. 7). Promieniowanie laserowe jest obecnie jedynym źródłem energii o gęstości mocy przekraczającej nawet 10^9 W/cm². Tak duże gęstości mocy umożliwiają precyzyjne nagrzewanie i kontrolowane chłodzenie niewielkiej objętości materiału z szybkościami ponad 10^8 K/s oraz prędkością krzepnięcia nawet ponad 20 m/s, co pozwala na wytworzenie warstw o strukturze amorficznej na grubości ok. 20 μm. Stopowanie laserowe może odbywać się w wyniku przetapiania wiązką laserową podłoża materiału podstawowego z naniesioną uprzednio warstwą materiału dodatkowego w postaci past, powłok elektrolitycznych lub natryskiwanych plazmowo oraz płomieniowo, jak również w wyniku podawania bezpośrednio do jeziora ciekłego metalu materiału dodatkowego w postaci proszku lub przetapianie powierzchni materiału w atmosferze gazów aktywnych chemicznie, np. azotu. Dodatkami stopującymi są najczęściej stopy metali, głównie Co, Cr, Mn, Nb, Ni, Mo, W, V jak również nadstopy, stellyty oraz węgliki, azotki i borki. Struktura oraz skład chemiczny warstwy wierzchniej wytworzonej w procesie stopowania laserowego, jak również jej własności fizyczne różnią się znacznie zarówno od materiału rodzimego jak i stopującego. Proces stopowania laserowego umożliwia wytworzenie warstw wierzchnich o niewielkiej grubości i szczególnych własnościach, o dużej odporności na ścieranie, erozję, korozję, działanie agresywnych środków chemicznych, o dużej twardości i jednocześnie dużej wytrzymałości zmęczeniowej oraz o dużej żaroodporności [15].

Głównym celem modyfikacji laserowej jest zmiana własności chemicznych i fizycznych warstwy wierzchniej, a przez to zwiększenie trwałości elementów maszyn. Stopowanie laserowe wykorzystywane jest głównie, jako obróbka pozwalająca na podniesienie odporności na zużycie oraz korozję. Własności uzyskanych warstw stopowych zależą w głównej mierze od rodzaju materiału podłoża i materiału stopującego oraz prawidłowego doboru parametrów

obróbki laserowej. Niewielkie zmiany warunków obróbki mogą powodować zmiany własności otrzymywanych warstw. Stopowanie laserowe poprzez zmianę składu chemicznego, struktury, twardości i naprężeń warstwy wierzchniej wpływa niewątpliwie na wszystkie podstawowe własności użytkowe. Może to być oddziaływanie pozytywne, np. z punktu widzenia odporności na korozję, erozję, lub negatywne z punktu widzenia wytrzymałości zmęczeniowej. Istotnie wpływają na te efekty warunki obróbki. Ich dobór powinien być oparty o badania doświadczalne [16].



Rysunek 7. Schemat przebiegu stopowania laserowego: a) bez powstawania plazmy, b) z powstawaniem plazmy, c) kształtowanie ścieżki laserowej w postaci wału [27]

Figure 7. The laser alloying scheme: a) without plasma, b) with plasma, c) the path looks like roller formation [27]

Aluminium i jego stopy są obecnie bardzo ważnymi technologicznie materiałami. Powyższe stopy stosuje się w przemyśle samochodowym i lotniczym, głównie w inżynierii mechanicznej. Stopy te posiadają dobre własności wytrzymałościowe, m.in. ze względu na niską gęstość, odporność na korozję. Jednakże charakteryzują się słabymi własnościami trybologicznymi i małą zdolnością przenoszenia obciążenia, która jest wynikiem ich niskiej temperatury topnienia oraz słabych wiązań międzyatomowych [17].

W obecnych latach szczególną uwagę przyciąga laserowe stopowanie stopów aluminium. Laserowe wzbogacanie umożliwia precyzyjną zmianę i kontrolę mikrostruktury oraz własności powierzchni metalu. Główną cechą procesu jest szybkie chłodzenie i krzepnięcie cienkiej

warstwy topionego materiału, znajdującego się przy relatywnie zimnym podłożu. Laserowe stopowanie powoduje wzrost rozpuszczalności w stanie stałym, a w związku z tym wzrost wytrzymałości materiału podłoża oraz otrzymywanie rozdrobionych mikrostruktur. Powstałe w wyniku powyższego procesu koherentne i bardzo cienkie warstwy wierzchnie znacznie wydłużają żywotność narzędzi. W szczególności proces ten prowadzi do polepszenia twardości stopów aluminium. W przypadku niektórych stopów istnieje możliwość wytworzenia międzykrystalicznych kompozytów. Do wzbogacenia warstw wierzchnich (WW) stopów aluminium stosuje się wiele pierwiastków, m.in.: Si, B, Cu, Fe, Ni czy Cr [17].

2.7. Nawęglanie laserowe

Nawęglanie jest procesem dyfuzyjnego nasycania warstwy wierzchniej stali węglem mającym na celu podniesienie odporności na ścieranie przy zachowaniu odpowiedniej odporności na zmęczenie. Obróbce tej poddaje się elementy maszyn i urządzeń pracujące dynamicznie, narażone na zmienne obciążenia zginające i na ścieranie, takie jak koła zębate czy elementy silników, np. sworznie tłokowe i wałki przekładni walcowych lub kątowych. Ponieważ konwencjonalne metody nawęglania skutkują stałym spadkiem zawartości węgla od powierzchni w głąb warstwy nawęglonej, stosuje się obróbkę laserową celem zachowania stosunkowo stałej mikrotwardości na całym jej przekroju. Gwarantuje to stałą intensywność zużywania się obrobionych elementów.

Praca [18] dotyczy nawęglania sworzni silników tłokowych z wykorzystaniem promieniowania wygenerowanego w laserze molekularnym CO₂. Obróbka polegała na przetapianiu laserowym powierzchni stali 14MnCr5 z nałożoną pastą o wysokiej zawartości węgla, która ma jednocześnie właściwość silnego pochłaniania promieniowania laserowego. W efekcie operacji otrzymano utwardzoną strefę warstwy wierzchniej o strukturze dendrytycznej o znacznej grubości – do 0,43 mm. Twardość na przekroju tej strefy utrzymała się dość stabilnie na wartości około 900 HV_{0,1}. Dowiedziono również, że grubość strefy nawęglonej wzrastała wprost proporcjonalnie do ilości energii dostarczanej do jednostki powierzchni obrabianej przez wiązkę lasera.

Wylimowanie długotrwałych i energochłonnych procesów polegających na podgrzewaniu elementów do wysokich temperatur i stosowaniu chłodziw sprawia, że stopowanie laserowe wzbogacające warstwy wierzchnie stali węglowych i niskostopowych o węgiel staje się atrakcyjną alternatywą dla konwencjonalnego nawęglania.

2.8. Borowanie laserowe

Borowanie to obróbka cieplno-chemiczna stali mająca na celu wytworzenie na powierzchni twardej warstwy borków żelaza o twardości dochodzącej do 2000 HV. Wnikanie boru w głąb stali zachodzi na zasadzie dyfuzji reaktywnej w temperaturze 800÷1050°C. Konwencjonalny proces nasycania powierzchni borem trwa do kilku godzin i zachodzi w energochłonnych piecach. Struktura otrzymanej warstwy dyfuzyjnej składa się ze słupkowych kryształów borków, pod którymi znajduje się roztwór stały boru w żelazie, którego ziarna są rozrośnięte na skutek długotrwałego działania wysokiej temperatury. Ze względu na nagłe przejście ze strefy twardych borków, przez strefę rozrostu ziarna o obniżonej twardości do podłoża, profil twardości warstwy naborowanej jest niekorzystny.

Laserowe borowanie polega na przetopieniu warstwy wierzchniej pokrytej pastą o wysokiej zawartości boru wiązką laserową. Na skutek skanowania wiązką stopiony metal miesza się

z borem. W efekcie otrzymuje się warstwę wierzchnią borków o wysokiej twardości i strefę przejściową o strukturze martenzytycznej lub bainitycznej [19].

Borowanie laserowe przewyższa konwencjonalne metody nasycania dyfuzyjnego nie tylko pod względem ekonomicznym (krótszy czas obróbki, mniejsze koszty energii, oszczędność materiału), lecz także i jakościowym. Otrzymane w ten sposób warstwy można nakładać selektywnie, a łagodniejszy profil twardości decyduje o ich lepszych własnościach.

Borowanie laserowe znajduje praktyczne zastosowanie w ulepszaniu powierzchni elementów maszyn narażonych na zużycie przez tarcie, a szczególnie na działanie luźnego ścierniwa. Są to części narzędzi wiertniczych, elementy świrdrów i pomp, osi traktorów, gąsienic, ale również i powierzchnie robocze narzędzi do pracy na zimno i na gorąco pracujące niedynamicznie (ciągadła, tłoczniaki, matryce, formy do tworzyw sztucznych, wkładki matrycowe) oraz elementy maszyn odlewniczych.

2.9. Laserowa synteza materiałów

Synteza materiałów z wykorzystaniem wiązki laserowej służy wytwarzaniu cienkich warstw lub nanocząstek. Umożliwia syntezę ze składników w stanie stałym, gazowym lub ciekłym.

LAPVD – *Laser Assisted Physical Vapour Deposition* to jeden z prostszych sposobów na otrzymanie cienkich powłok poprzez osadzanie na podłożu par wytworzonych w efekcie działania wiązki lasera na podłożu. Metodą tą otrzymuje się dzisiaj warstwy półprzewodnikowe do zastosowań w elektronice, warstwy o bardzo dobrych własnościach trybologicznych (np. TiC, TiN), materiały o specjalnych własnościach magnetycznych oraz bioceramikę [20].

LACVD – *Laser Assisted Chemical Vapour Deposition* to proces osadzania chemicznego z fazy gazowej, w której pobudzenia reaktywnych gazów dokonuje się przez działanie wiązki laserowej. Cząstki gazu na skutek pochłaniania energii jonizują i w tym stanie ulegają reakcjom chemicznym prowadzącym do powstania związków faz, które następnie osadzone na podłożu stanowią jego pokrycie. Tak prowadzony proces CVD pozwala zniwelować stosowanie wysokich temperatur (dochodzących w procesie konwencjonalnym do 1000°C). Technika LCVD stosowana jest głównie w produkcji mikroelektroniki.

2.10. Laserowo-plazmowe polerowanie powierzchni

Tradycyjne metody polerowania powierzchni np. mechaniczne, chemiczne bądź elektrochemiczne nie zawsze spełniają oczekiwania pod względem wydajności, jakości obróbki, pracochołności, poziomu automatyzacji procesu czy ekologii. Należy także zauważyć, iż zmechanizowane polerowanie na obrabiarkach w przypadku części o złożonych kształtach jest nieraz niemożliwe. W tym przypadku interesującym i rokującym na przyszłość kierunkiem może być polerowanie laserowo-plazmowe. Obecnie polerowanie powierzchni o złożonych kształtach geometrycznych, np. łopatek turbin gazowych, wykonuje się metodą mechaniczną ręcznie, wykorzystując specjalne pasty korundowe. Proces mechanicznego polerowania ręcznego jest procesem długotrwałym oraz pracochołnym. W stosowanych obecnie operacjach docierania i szlifowania udział pracy ręcznej zawiera się w granicach 40÷50% pracochołności całkowitej [21].

Metody ręcznej obróbki zazwyczaj nie są w stanie zapewnić niezbędnego poziomu jakości w produkcji masowej złożonych części. Niezawodność określana jest poprzez jakość umiarkowanej i wykańczającej obróbki powierzchni odpowiedzialnych części. Obróbka laserowa

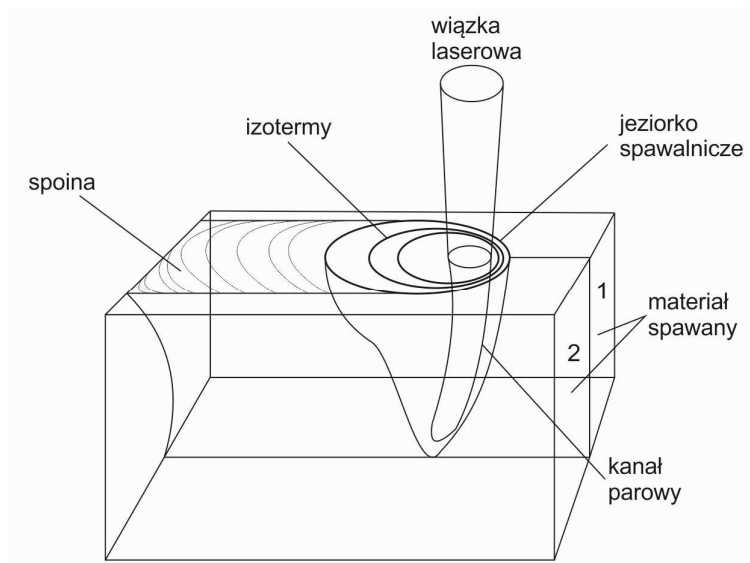
zasadniczo zwiększa powtarzalność procesu polerowania, w konsekwencji umożliwiając podniesienie standardu produkowanych elementów czy urządzeń [21].

Metoda laserowo-plazmowego polerowania powierzchni metalu jest połączeniem oddziaływania promieniowania laserowego z jednoczesnym wykorzystaniem go do zapłonu par metalu nad polerowaną powierzchnią i podtrzymywaniem w nieprzerwanym procesie optycznego żarzenia, przypowierzchniowej plazmy laserowej, przy zachowaniu możliwości przemieszczania centrum energetycznego względem polerowanej powierzchni. Metoda ta może być realizowana w dwóch trybach w zależności od szybkości jego przemieszczania oraz mocy promieniowania laserowego. Wyróżnia się tryb polerowania zgrubnego, przy którym uzyskuje się chropowatość powierzchni $R_a \leq 0,37 \mu\text{m}$ oraz tryb dokładnego polerowania, przy którym chropowatość może wynosić $R_a \leq 0,1 \mu\text{m}$. Oczekuje się, że wprowadzenie metody polerowania laserowo-plazmowego znacznie przyczyni się do podniesienia wydajności procesu. Przy pracy w trybie polerowania zgrubnego wydajność procesu osiąga nie mniej niż $20 \text{ cm}^2/\text{min}$., przy trybie polerowania dokładnego wynosi $10 \text{ cm}^2/\text{min}$. Polerowanie laserowo-plazmowe, oprócz możliwości zapewnienia wysokiej jakości obrabianej powierzchni, umożliwia także naprawienie warstwy wierzchniej materiału podłoża poprzez usunięcie np.: porów, nadpaleń, wyrw i naderwań powierzchniowych powstałych w wyniku polerowania mechanicznego, usunięcie mikropęknięć, a także wykonanie „rafinowania” warstwy powierzchniowej z wtrąceń niemetalicznych [21].

W ten sposób wyżej opisany rodzaj polerowania powierzchni należy rozpatrywać jako proces uniwersalny, który umożliwi radykalne polepszenie fizyko-mechanicznych właściwości warstwy powierzchniowej odpowiedzialnych części [21].

3. SPAWANIE LASEROWE

Spawanie laserowe polega na stopieniu obszaru łączenia ciepłem wytworzonym na skutek działania na ten obszar skoncentrowanej wiązki laserowej o gęstości energii $10^2 \div 10^{11} \text{ W/mm}^2$ [9,20]. Schemat spawania laserowego przedstawiono na rysunku 8.



Rysunek 8. Schemat spawania laserowego [35]

Figure 8. Laser welding scheme [35]

Z uwagi na wysoką jakość otrzymywanych spoin, łatwość prowadzenia procesu, szerokie pole potencjalnego zastosowania i wzrastającą opłacalność użytkowania laserowe technologie spawalnicze cieszą się wciąż wzrastającą popularnością w przemyśle [2,9,20].

Wyróżnia się następujące techniki spawania laserowego [9]:

- z oczkiem spoiny bez materiału dodatkowego (grubość złącza 20÷30 mm),
- z jeziorkiem spoiny (grubość złącza 3÷5 mm), jednostronnie lub dwustronnie,
- z oczkiem spoiny z materiałem dodatkowym,
- hybrydowe – LHW (*Laser Hybride Welding*) to połączenie spawania laserowego z oczkiem bez materiału dodatkowego ze spawaniem łukowym.

Najpopularniejsze techniki spawania hybrydowego to połączenie laser+GMA. Dzięki zastosowaniu dwóch technik uzyskuje się spoinę o wyższej jakości, a w porównaniu do spawania GMA LHW trwa krócej i charakteryzuje się mniejszym zużyciem materiału elektrodowego.

Opracowane dotychczas techniki spawania laserowego umożliwiają wykonanie szerokiej gamy połączeń, która obejmuje praktycznie wszystkie typowe złącza konstrukcji spawanych [2]. Możliwe jest spawanie konstrukcji wykonanych ze stali węglowych, stali stopowych, metali trudno- i niskotopliwych, wysokowytrzymałych stali niskostopowych HSLA, kompozytów czy metali aktywnych chemicznie w podwyższonych temperaturach, takich jak magnez, aluminium czy tytan oraz tworzyw sztucznych, o grubości od 0,0025 mm (cienkie folie i druty) do nawet 50 mm [2]. Obecnie spawanie laserowe znajduje największe zastosowanie w produkcji wielkoseryjnej, m.in. w przemyśle motoryzacyjnym czy lotniczym [2].

W przypadku metali o niskiej absorpcji promieniowania laserowego, takich jak aluminium, magnez czy miedź, opracowano technikę spawania z podwójną wiązką laserową. Pierwsza z nich nadtapia powierzchnię złącza, a druga tworzy oczko lub jeziorko spawalnicze. Współczynnik absorpcji wiązki laserowej poza rodzajem materiału obrabianego, zależy również od temperatury tego materiału. Po przekroczeniu temperatury topnienia współczynnik absorpcji wzrasta, przykładowo dla stali absorpcja światła lasera HPDL wzrasta z 20÷40% do 90%, dzięki czemu proces przeprowadza się łatwiej [1].

Spawanie tworzyw sztucznych jest utrudnione ze względu na ich bardzo małe przewodnictwo cieplne, zależność współczynnika absorpcji promieniowania od ilości barwnika zawartego w materiale oraz niską temperaturę ich degradacji. Techniki laserowe są odpowiedzią inżynierii materiałowej na wymagania rynku związane z potrzebą szybkiego, trwałego i skutecznego łączenia materiałów konstrukcyjnych, jakim są tworzywa termoplastyczne. Lasery stałe Nd:YAG, włóknowe, tarczowe, lasery gazowe CO₂ i diodowe wysokiej mocy HPDL, ograniczają do minimum oddziaływanie cieplne na elementy łączone, a tym samym minimalizują naprężenia i odkształcenia spawalnicze.

Podsumowując, wykorzystanie laserowych technik spawalniczych wiąże się z ułatwieniem prowadzenia procesu spawania i polepszeniem jego efektów z uwagi na:

- małą ilość ciepła wprowadzonego podczas spawania, co minimalizuje naprężenia struktury i odkształcenia spawalnicze oraz wpływa na niewielkie rozmiary strefy wpływu ciepła;
- bardzo dobre własności mechaniczne otrzymywanych spoin;
- brak konieczności stosowania obróbki mechanicznej po spawaniu;
- dużą gęstość mocy i krótki czas trwania procesu;
- możliwość prowadzenia procesu spawalniczego bez materiału dodatkowego;
- wysoką precyzję działania;
- wysoką czystość procesu;
- możliwość łączenia praktycznie wszystkich spawalnych materiałów inżynierskich, w tym trudno spawalnych;

- możliwość łączenia materiałów różnoimiennych, o różnych grubościach;
- możliwość łatwej robotyzacji i automatyzacji;
- obniżenie szkodliwości oddziaływania na środowisko i pracowników.

Obecnie produkowane lasery CO₂ do zastosowań spawalniczych w przemyśle mają moc nawet do 25 kW. Najczęściej stosowane są jednak te o mocy z zakresu 1÷6 kW. Lasery CO₂ z szybkim przepływem podłużnym gazów o mocy 3 do 6 kW generują wiązkę w modzie zbliżonym do TEM₀₁, co wykorzystuje się w procesach spawania techniką z oczkiem. Stosuje się również lasery CO₂ z szybkim przepływem poprzecznym gazów charakteryzujące się wielodomenową wiązką o ograniczonej możliwości zogniskowania. Znajdują one zastosowanie w przypadku spawania techniką z jeziorkiem oraz w procesach spawania hybrydowego grubszych elementów stalowych [2].

Poza laserami typu CO₂ w technikach spawalniczych stosuje się również lasery na ciele stałym, prętowe, włóknowe i dyskowe. Lasery Nd:YAG emitujące fale o długości 1,06 μm znajdują szczególne zastosowanie przy spawaniu ciągłym i punktowym elementów mechaniki precyzyjnej [2]. Najczęściej stosowane są lasery o mocy 20 do 100 W, pracujące w trybie impulsowym (częstotliwość od 1 do 4000 Hz) [2]. W porównaniu do laserów typu CO₂ promień lasera Nd:YAG może być przenoszony światłowodami, co znacznie ułatwia montaż urządzenia w halach produkcyjnych.

Wykorzystanie nowoczesnych generatorów wiązki laserowej zapewnia wysoką precyzję prowadzenia procesu przez możliwość dokładnej regulacji parametrów wiązki, takich jak rodzaj promieniowania (ciągłe/impulsowe/udarowe), kształt i wymiar ogniska, gęstość energii wiązki, długość ogniskowej oraz śledzenie i łatwe sterowanie torem przesuwu wiązki laserowej [10]. Umożliwiają one również całkowite zautomatyzowanie i zrobotyzowanie procesów spawalniczych. Do takich generatorów należą w szczególności nowoczesne lasery diodowe wysokiej mocy HPDL (*High Power Diode Laser*). Ich rozwój umożliwia uzyskiwanie coraz wyższych mocy wiązki laserowej przy jednoczesnym obniżaniu cen samych urządzeń, co ma znaczny wpływ na wzrost ich popularności [9].

Polecane przy spawaniu są np. lasery diodowe o mocy do 2,5 kW, o prostokątnym kształcie plamki laserowej do pracy w trybie ciągłym. Emitują one promieniowanie o małej długości fali (0,808 lub 0,94 μm), co korzystnie wpływa na wzrost absorpcji promieniowania przez materiał. Determinuje to intensyfikację przekazywania energii, a tym samym poprawia efektywność procesu spawalniczego [22]. Prostokątny kształt plamki wpływa na stosunkowo małe gęstości mocy – 0,8÷32,1 kW/cm² [1]. Lasery diodowe wysokiej mocy HPDL sprawdzają się w szczególności w procesach precyzyjnego spawania złączy doczołowych, zakładkowych, nakładkowych, teowych i narożnych, łączenia termoplastów oraz metali przy wykorzystaniu techniki z jeziorkiem spoiny [1,2].

4. NAPAWANIE LASEROWE

Napawanie polega na nałożeniu powłoki metodą spawalniczą przez dokładne stopienie materiału dodatkowego – spoiwa, z nadtopionym materiałem podłoża, którego udział w nałożonej napoinie wynosi do kilkudziesięciu procent, w zależności od stosowanej metody [23]. Napawanie stosuje się zazwyczaj celem regeneracji zużytych części maszyn i urządzeń oraz wytworzenia użytkowej warstwy wierzchniej na nowych elementach. Odnowienie części prowadzone technikami spawalniczymi jest najszybszą i stosunkowo najtańszą metodą regeneracji charakteryzującą się wysoką precyzją i wysoką jakością naprawy. Nowe warstwy o wyraźnie poprawionych własnościach użytkowych powstają w procesie stopienia warstwy

(przetopienie warstwy wierzchniej, omówione w pkt. 2.1) lub stopnienia cienkiej warstwy wierzchniej elementu z materiałem dodatkowym, w postaci proszku i/lub drutu.

Wykorzystanie wiązki lasera w procesie napawania jako źródła energii stapiającej to technologia wytwarzania warstw wierzchnich przewyższająca konwencjonalne – napawanie gazowe i elektryczne, czy natryskiwanie cieplne [1]. W porównaniu do nich charakteryzuje się wieloma korzystnymi cechami [1,9]:

- możliwość całkowitego zautomatyzowania i zrobotyzowania procesu;
- łatwość wykonania napoiny z materiałów znacznie różniących się składem chemicznym od podłoża, charakteryzującej się strukturą drobnokrystaliczną, np. ceramiczne na podłożu metalicznym;
- niewielki udział materiału podłoża w napoinie, zwykle 5÷10 %;
- możliwość wytworzenia cienkich powłok o grubości od 0,1 mm do kilkunastu mm oraz grubszych przez napawanie wielowarstwowe;
- ograniczone oddziaływanie ciepła (SWC 0,1÷0,5 mm), oraz związane z tym minimalne odkształcenia spawalnicze i naprężenia.

Bardzo szybkie stapianie podawanego materiału dodatkowego przyczynia się do powstania cienkiej warstwy o bardzo dobrym połączeniu z podłożem. Szybkie krzepnięcie wymieszanych cieczy – podłoża i spoiwa, oraz stosowanie gazów ochronnych zapewnia wysoką czystość metalurgiczną i drobne ziarno powstałej warstwy [1]. Przy tym samym składzie chemicznym materiału dodatkowego zastosowanie wiązki laserowej do utworzenia napoiny gwarantuje wyższą twardość powłoki w porównaniu do metod konwencjonalnych.

Napawanie warstw wierzchnich może być prowadzone z wykorzystaniem materiałów metalowych i cermetalowych. Warstwy te mają grubość od 0,1 mm do powyżej 10 mm w przypadku zastosowania napawania wielowarstwowego [9]. Ponieważ nowoczesne generatory wiązki promieniowania laserowego umożliwiają precyzyjną kontrolę jej energii liniowej, rzeczywiste staje się regulowanie udziału materiału podłoża w napoinie od 3 do 90%. Jednocześnie regulowany jest kształt ściegów.

Napawanie laserowe stosuje się szeroko w laserowym nanoszeniu warstw uszczelniających np. z brązu na prowadnice łopatek sprężarek ze stopów Ti i Ni, napawanie proszków brązu na zużyte fragmenty łopatek roboczych celem ich odbudowy i przywrócenia skuteczności eksploatacyjnej oraz napawanie materiału konstrukcyjnego w miejscu defektów odlewniczych łopatek [9]. Podobnie jak w przypadku spawania laserowego, zastosowanie znajdują tu lasery CO₂, na ciele stałym, prętowe, włóknowe, dyskowe oraz wysokiej mocy HPDL.

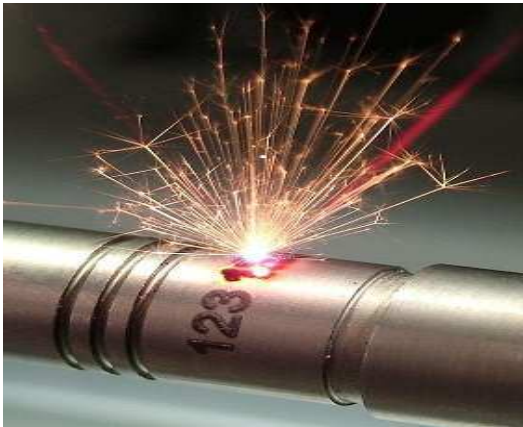
5. LASEROWE ZNAKOWANIE, KODOWANIE I GRAWEROWANIE

Laserowe znakowanie i grawerowanie w różnych gałęziach przemysłu wykorzystywane jest od wielu lat. Najważniejszym czynnikiem tego typu znakowania elementów jest trwałość i estetyka wykonanych oznaczeń a także elastyczność metody. Podstawowym zjawiskiem występującym w procesie, zarówno dla tworzyw sztucznych jak i metali, jest absorpcja energii w warstwie wierzchniej a następnie lokalny wzrost temperatury w wyniku czego następuje topienie i odparowanie materiału. Przykład laserowego grawerowania przedstawiono na rysunku 9 [24].

Istnieją także przypadki, w których wykorzystywane jest zjawisko zmian struktury warstwy wierzchniej. Jest ono wynikiem szybkiego nagrzania, a następnie chłodzenia obszaru, który poddano działaniu wiązki laserowej. Przemiany fizyko-chemiczne występujące lokalnie w materiale wywołują zmiany zabarwienia na powierzchni obrabianego elementu. Efekt

obróbki bez ubytku materiału z powierzchni stosowany jest przy znakowaniu elementów, których geometria powierzchni z powodów estetycznych lub użytkowych nie może ulec zmianie. Przykład takiego znakowania przedstawiono na rysunku 10 [24].

W dzisiejszych czasach coraz większe znaczenie ma zastosowanie laserowych urządzeń kodujących w przemyśle opakowaniowym. Wykorzystanie znakowania umożliwia umieszczenie w sposób trwały i estetyczny danych o produkcie, co zapewnia jego pełną identyfikację pochodzenia a także śledzenie w drodze do konsumenta. Tego typu technologia wykorzystywana jest w przemyśle rozlewniczym, tytoniowym, spożywczym i kosmetycznym do nanoszenia numerów seryjnych i kodów, dat produkcji oraz przydatności do użycia. W przypadku przemysłu farmaceutycznego zawartość znakowanego kodu wynika z regulacji prawnych (rys. 11). Znakowanie może odbywać się stacjonarnie, gdzie produkt pozostaje nieruchomy podczas znakowania laserem, jak również możliwe jest znakowanie bez zatrzymywania linii produkcyjnej, co przedstawiono na rysunku 12 [24].



Rysunek 9. Grawerowanie laserowe elementu ze stali [24]

Figure 9. Steel element laser engraving [24]



Rysunek 10. Znakowanie laserowe trzpienia frezerskiego [24]

Figure 10. Milling pin laser marking [24]



Rysunek 11. Laserowe kodowanie opakowania farmaceutycznego [24]

Figure 11. Pharmaceutical packaging laser coding [24]



Rysunek 12. Laserowe kodowanie kapsli od butelek [24]

Figure 12. Bottles caps laser coding [24]

Od kilku lat obserwuje się zainteresowanie przemysłu ceramicznego zastosowaniem techniki laserowej do znakowania i zdobienia wyrobów ceramicznych. Podjęto odpowiednie prace badawcze w tej dziedzinie, co zaowocowało pojawieniem się wielu doniesień i patentów [25].

Wykorzystanie technologii naświetlania wiązką lasera w zamian za wypalanie w piecu stwarza możliwość ograniczenia kosztów – zmniejszenie zużycia energii, skrócenie czasu obróbki i minimalizacja ilości odpadów. Oszczędności czasu i kosztów mogą dochodzić nawet do 60% [25].

Obiekty dekoracyjne wypalane laserem muszą składać się z punktów lub linii. Punktowe wypalanie laserowe stosuje się przy odtwarzaniu obrazów na ceramice, na przykład fotografii. Metoda wektorowa wykorzystywana jest do tworzenia napisów, etykiet, a także rysunków. Przydatność znakowania w praktyce przemysłowej jest uwarunkowana poprzez cechy takie jak [25]:

- wysoka gładkość i połysk powierzchni znakowanego obszaru;
- trwałe wiązanie farby z podłożem na skutek podgrzania przez promieniowanie laserowe;
- znakowanie powinno nadać określony kolor podgrzanej i stopionej farbie.

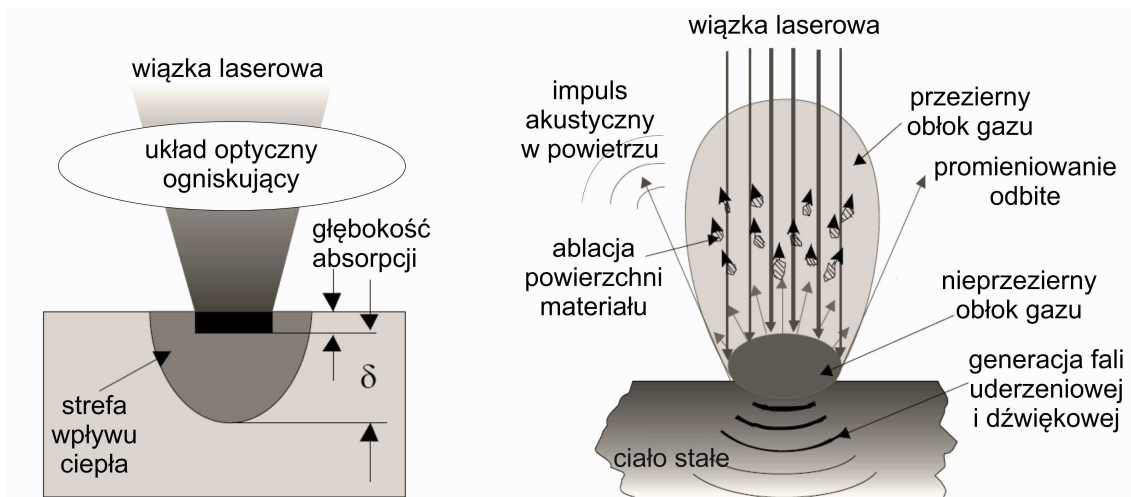
Materiałem barwnym wykorzystywanym w laserowym spiekaniu z podłożem ceramicznym jest zwykle mieszanina drobno mielonego topnika i barwnego dodatku mineralnego [24].

6. LASEROWE OCZYSZCZANIE DZIEŁ SZTUKI

Rozwój technik laserowych odbił się szerokim echem nie tylko w przemyśle ale również w sztuce. W ciągu ostatnich kilkunastu lat nastąpił rozwój technologii laserowych wykorzystywanych w renowacji dzieł sztuki. Technika usuwania warstw wierzchnich, będących zanieczyszczeniem bądź zniekształceniem powierzchni obiektu, za pomocą promieniowania laserowego oferuje szereg następujących zalet. Usuwanie warstw jest bezkontaktowe, co oznacza, że narzędzie nie ma bezpośredniego kontaktu z obiektem, gdyż energia dostarczana jest w postaci wiązki światła; selektywne – technika ta może być dopasowana do różnych materiałów o odmiennych własnościach fizykochemicznych. Oczyszczanie jest także lokalne, oddziaływanie na miejsca na które skierowana jest wiązka laserowa. Metoda ta jest samoograniczająca się, co oznacza, że wykorzystuje różnicę współczynników pochłaniania nawarstwienia podłoża, dla danej gęstości mocy promieniowania laserowego, proces zostaje automatycznie przerwany; następuje natychmiastowe sprzężenie zwrotne, czyli automatyczna kontrola grubości usuwanej warstwy. Ważną zaletą jest to, iż metoda ta jest kontrolowana pod względem usuwania nawarstwienia z zachowaniem najdelikatniejszego reliefu – kontrola grubości usuwanego nawarstwienia oznacza zachowanie najdelikatniejszych i finezyjnych szczegółów (ślady pędzla czy dłuta) [11, 26].

Do technik laserowych umożliwiających dokumentowanie dzieł sztuki zalicza się fotografię dwuwymiarową w obszarze ultrafioletu (UV), światła widzialnego (VIS) oraz bliskiej podczerwieni (IF), tomografię laserową i fotografię trójwymiarową. Podstawowe metody analityczne wykorzystywane wspólnie to laserowo indukowana spektroskopia przebicia (LIBS) i laserowa spektroskopia Ramana. Metody badawcze, takie jak: analiza wielospektralna (2D i 3D), laserowa interferometria (klasyczna i holograficzna) i laserowa wibrometria, tomografia laserowa wykorzystując efekt Dopplera, dostarczają bezpośredniej informacji o strukturze makroskopowej i mechanicznym stanie dzieła sztuki. Obrazowanie obiektów zabytkowych wykonuje się poprzez tomografię laserową. Tomografia ta, podobnie do rentgenowskiej umożliwia otrzymywanie obrazu przekroju obiektu, jeśli obserwujemy go od przodu. Umożliwia odróżnienie światła pochodzącego (odbitego) od różnych warstw i ocenie

kolejności odbicia oraz grubości warstwy, od której uległo odbiciu. W procesie usuwania warstw wierzchnich w celu oczyszczenia dzieła sztuki wykorzystuje się impulsową ablację laserową. Proces oczyszczania dzieł sztuki przedstawiono na rysunku 13 [26].



Rysunek 13. Oddziaływanie impulsowego promieniowania laserowego z materiałem w pewnym momencie czasu „t” oraz po zakończeniu impulsu: a) dla gęstości mocy $q \leq 10^3 \div 10^5 \text{ W/cm}^2$; b) dla gęstości mocy $q \approx 10^8 \div 10^9 \text{ W/cm}^2$ [36]

Figure 13. The impact of pulsed laser radiation with matter in some moment of time „t” and after that pulse: a) for the power density $q \leq 10^3 \div 10^5 \text{ W/cm}^2$; b) for the power density $q \approx 10^8 \div 10^9 \text{ W/cm}^2$ [36]

PODSUMOWANIE

Promieniowanie laserowe charakteryzuje się bardzo szerokim wachlarzem własności, które zależne są od parametrów wiązki, takich jak: długość fali, emitowana moc, energia impulsu i jego czas trwania. Jednocześnie naukowcy w laboratoriach na całym świecie wciąż opracowują nowe źródła promieniowania, czego efektem są unikalne jego własności o specyficznej charakterystyce. Efektem tego jest obecność lasera w bardzo wielu dziedzinach nie tylko inżynierii materiałowej, lecz także i w elektronice, energetyce, medycynie, geodezji, w technologiach wojskowych i wielu gałęziach przemysłu.

Stosowanie promieniowania laserowego w dziedzinach obszaru ograniczonego inżynierią materiałową jest zawsze korzystniejsze od metod konwencjonalnych pod względem otrzymywanych efektów jego działania, pod warunkiem doboru odpowiednich parametrów. Jego aplikacja przyczynia się do podwyższenia jakości obróbki przy jednoczesnym obniżeniu jej kosztów, zwiększeniu wydajności, ograniczeniu ilości koniecznych operacji w procesach technologicznych (np. hartowanie bez odpuszczania, nawęglanie bez dodatkowej obróbki cieplnej), co przyczynia się też do czasowego ograniczenia trwania tych procesów. Coraz powszechniejsze stosowanie i nowe technologie wytwarzania wiązki laserowej przyczyniają się do obniżenia kosztów stosunkowo drogich generatorów promieniowania, co napędza ogólnie pojęty przemysł laserowy.

Z pewnością można stwierdzić, że technologie, techniki i metody obróbki wykorzystujące promieniowanie laserowe stanowiąc będą w najbliższych latach jeden z głównych obszarów rozwoju o bardzo dużym potencjale zastosowania.

LITERATURA

1. A. Klimpel, D. Janicki, A. Lisiecki, Z. Wilk, Spawalnicze technologie laserowe. Przykłady zastosowania lasera diodowego dużej mocy, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach* 52/5 (2008) 35-45.
2. M. Bonek M., L.A. Dobrzański, A. Klimpel, Laserowa modyfikacja struktury i własności stali stopowej do pracy na gorąco, *Symposium Katedr i Zakładów Spawalnictwa, Gliwice, 2003*, 209-216.
3. B. Major, Zastosowanie laserów w inżynierii powierzchniowej oraz technologii, *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej*, zeszyt 72 (2000) 65-75.
4. J. Kusiński, A. Siwek, T. Didenko, S. Kąc, A. Woldan, Przetopieniowa obróbka laserowa, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 69/4 (2002) 166-175.
5. R. Filip, K. Raga, Kształtowanie mikrostruktury warstwy wierzchniej stopów tytanu w procesie przetapiania laserowego, *Inżynieria Materiałowa* 33/4 (2012) 252-255.
6. S. Nemecek, Obróbka laserowa powierzchni narzędzi i części maszyn, *Inżynieria Powierzchni* 4 (2011) 27-33.
7. O.S. Sirotkin, V.V. Blinkov, J. Michalski, A. Nakonieczny, P. Wach, Technologie laserowe obróbki powierzchniowej części stosowanych w przemyśle lotniczym, *Inżynieria Powierzchni* 2 (2010) 3-6.
8. T. Burakowski, T. Wierzchoń, *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa, 1995.
9. A. Borek, R. Grzelka, A. Klimpel, S. Mucha, B. Ścibisz, Technologie laserowe spawania, wytwarzania i obróbki cieplnej warstw wierzchnich, *Przegląd Spawalnictwa* 85/10 (2013) 10-18.
10. N. Radek, W. Żórawski, Laserowa obróbka powłok ze stopów niklu natryskiwanych płomieniowo i plazmowo, *Przegląd Mechaniczny* 2 (2003) 36-39.
11. J. Marczak, Metoda akustyczna i kolorymetryczna do określania stopnia oczyszczenia obiektów kamiennych czyszczonych ablacją laserową, *Prace Instytutu Elektrotechniki* 234 (2008) 39-49.
12. T. Burakowski, W. Napadłek, A. Woźniak, Ablacyjne teksturowanie laserowe czopów wałka rozrządu silnika spalinowego, *Inżynieria Maszyn* 16/4 (2011) 92-100.
13. T. Burakowski, W. Napadłek, Mikroobróbka laserowa – możliwości zastosowań w przemyśle, *Prace Instytutu Elektrotechniki* 245 (2010) 233-246.
14. Strona internetowa: <http://home.agh.edu.pl/~gjs/wp-content/uploads/PVD-i-PLD.pdf> (dostęp: 05.2014).
15. A. Lisiecki, Stopowanie laserowe proszkowe stali WCL, *Przegląd Spawalnictwa* 74/8-10 (2002) 131-133.
16. J. Radziejewska, Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem, *Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2011*.
17. A. Radziszewska, S. Kąc, J. Kusiński, Laserowa powierzchniowa obróbka stopu Al-Si, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 73/4 (2006) 183-188.
18. D. Buczma, Nawęglanie laserowe stali niskowęglowych, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 50/2 (2005) 49-53.
19. M. Paczkowska, Borowanie laserowe i możliwości jego zastosowania, *Przegląd Spawalnictwa* 81/1 (2009) 26-30.
20. J. Kusiński, Technologie laserowe. *Problemy Eksploatacji* 3 (2004) 33-47.

21. O.S. Sirotkin, V.V. Blinkov, J. Michalski, A. Nakonieczny, P. Wach, Technologie laserowe obróbki powierzchniowej części stosowanych w przemyśle lotniczym, *Inżynieria Powierzchni* 2 (2010) 3-6.
22. M. Bonek, Stopowanie warstwy wierzchniej stali PMHSS6-5-3 przy użyciu lasera diodowego dużej mocy, *Międzynarodowe odczyty naukowe "Aplikacje komputerowe i modelowanie matematyczne w dziele budowy, inżynierii, zarządzania i edukacji"*, Penza, Russian Federation, 2013, 221-227.
23. M. Głowacka, *Inżynieria powierzchni. Powłoki i warstwy wierzchnie – wybrane zagadnienia*, Skrypt Politechniki Gdańskiej.
24. L. Boruc, Laserowe znakowanie, kodowanie i grawerowanie – kierunki rozwoju technologii i nowe obszary aplikacji, *Inżynieria Maszyn* 16/4 (2011) 124-128.
25. A. Sarzyński, D. Chmielewska, J. Gebel, J. Marczak, A. Olszyna, M. Strzelec, S. Traczyk, Laserowe nanoszenie mineralnych warstw barwnych na podłoża ceramiczne, *Prace Instytutu Elektrotechniki* 256 (2012) 319-338.
26. J. Marczak, Laserowe oczyszczanie dzieł sztuki, *Inżynieria Materiałowa* 29/6 (2008) 885-890.
27. L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, *Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich*, Open Access Library vol. 5, 2011.
28. F. Hlawka, T. Marchione, O. Jacura, A. Cornet, Characterisation of M24 type high speed steel after laser melting treatment, *Surface Engineering* 9/4 (1993) 300-304.
29. A. Klimpel, *Technologie laserowe*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
30. Strona internetowa: <http://www.openaccesslibrary.com/vol11/6.pdf>
31. Strona internetowa: <http://www.eagle-group.eu/pl/hartowanie-laserowe>
32. Strona internetowa: <http://www.pl.trumpf.com/pl/produkty/technika-laserowa/aplikacje/obszary-zastosowan/obrobka-powierzchni/utwardzanie-laserowe.html>
33. Strona internetowa: <http://www.obrabiarka.pl/artykuly/czytaj/54>
34. Strona internetowa: <http://home.agh.edu.pl/~gjs/wp-content/uploads/PVD-i-PLD.pdf>
35. Strona internetowa: http://technologia.laserowa.cba.pl/T_Spawanie.html
36. Strona internetowa: <http://iel.waw.pl/strony/wydawnictwo/zal/228/11.pdf>