

Agnieszka Twardowska, Łukasz Łętocha

Technologie laserowe w inżynierii powierzchni

Intensywnie rozwijający się przemysł stawia coraz wyższe wymagania zarówno wobec materiałów konstrukcyjnych, jak i technologii ich wytwarzania. Najszybszy wzrost zapotrzebowania obserwuje się w obszarze tworzyw, które cechuje wysoka twardość, wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na działanie wysokich temperatur, zużycie ściernie i korozję. Projektanci tworzyw konstrukcyjnych zmuszeni są zatem do opracowywania nowych materiałów lub udoskonalania już istniejących, np. poprzez odpowiednie uformowanie ich warstwy wierzchniej.

Warstwa wierzchnia, zgodnie z PN-87/M-04250, to „obszar materiału przylegający do powierzchni wraz z tą powierzchnią, którego właściwości fizyczne różnią się od pozostałej części materiału nazywanej rdzeniem” [1]. Właściwości użytkowe warstwy wierzchniej zależą od rodzaju materiału rdzenia i jego stanu wyjściowego oraz od rodzaju zastosowanej obróbki (mechanicznej, cieplnej lub cieplno-chemicznej). Warstwę wierzchnią charakteryzuje szereg cech, do których należą: chropowatość, mikrostruktura oraz właściwości fizyko-chemiczne, które są wynikiem zastosowanej technologii wytwarzania elementu.

Pojęcie „powłoka” definiowane jest przez PN/H-04609 i PN/H-01015. Określenie dotyczy warstwy materiału nałożonej trwale na powierzchnię przedmiotu obrabianego (podłoża), który pozostaje w tym samym stanie, w jakim był przed naniesieniem powłoki. Głównym celem nanoszenia powłok jest zabezpieczenie podłoża przed degradacją np. w wyniku działania wysokich temperatur bądź czynników atmosferycznych (korozja, erozja), zużyciem mechanicznym, rzadziej powłoki nakładane są w celach dekoracyjnych.

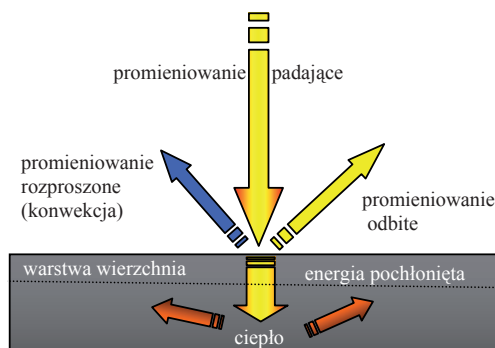
Zastosowanie wiązki laserowej w inżynierii powierzchni

Wiązka laserowa pozwala na skupienie energii na małym obszarze i w następstwie oddziaływania wiązka–materiał obrabiany na przekazywanie tej energii (w formie ciepła) w głąb materiału przez warstwę wierzchnią, stwarzając tym samym możliwość prowadzenia obróbki bez przetapiania, jak i z przetopieniem warstwy wierzchniej czy częściowym jej odparowaniem. Natomiast ze względu na zmiany objętości i masy obrabianych przedmiotów, techniki laserowe używane do formowania struktury i właściwości warstw wierzchnich klasyfikowane są jako techniki bezprzyrostowe, które nie powodują zmiany objętości i masy przedmiotu, oraz tzw. techniki przyrostowe, w efekcie których następuje zmiana wymiarów

i masy przedmiotów. Takie możliwości oraz szereg innych zalet technik laserowych decydują o ich uniwersalności i atrakcyjności w kontekście możliwości zmian właściwości obrabianych materiałów [2, 3].

Oddziaływanie wiązki laserowej z materiałem

Wynik oddziaływania wiązki promieniowania laserowego na materiał uzależniony jest przede wszystkim od gęstości mocy, metody oddziaływania promieniowania na materiał (laser o pracy ciągłej czy impulsowej), czyli czasu trwania impulsu, częstotliwości repetycji, długości fali, kąta padania wiązki i modulacji parametrów wiązki, czyli położenia ogniska wiązki względem materiału, rozkładu energii w wiązce, średnicy wiązki i jej kształtu oraz błędów w ogniskowaniu; ciśnienia i rodzaju nadmuchiwanego gazu (azot, hel, tlen, dwutlenek węgla, argon, acetylen), kształtu i położenia dyszy gazowej; rodzaju i właściwości fizycznych materiału (ciepło właściwe, przewodnictwo cieplne, temperatura topnienia, temperatury przemian fazowych); stanu powierzchni.



Rys. 1. Oddziaływanie promieniowania laserowego z materiałem na podst. [2]

Wydzielające się ciepło na powierzchni materiału, będące efektem pochłaniania promieniowania laserowego przez obrabiany materiał (rys. 1), zależnie od gęstości energii wiązki i rodzaju materiału obrabianego (i szeregu innych parametrów procesu – tab. 1) może doprowadzić do jego nagrzania (przy powierzchniowej gęstości energii promieniowania poniżej 10^4 W/cm^2), topienia (gęstość energii w przedziale $10^4\text{--}10^6 \text{ W/cm}^2$) czy parowania (powierzchniowa gęstość energii promieniowania laserowego powyżej 10^6 W/cm^2).

Tab. 1. Zastosowanie laserów do różnych operacji obróbki powierzchniowej [1]

Rodzaj operacji	Gęstość mocy [W/cm^2]	Orientacyjny czas ekspozycji	Rodzaj lasera
Hartowanie powierzchniowe	$3 \cdot 10^2 \div 10^4$	s	ciągły
Stopowanie	$5 \cdot 10^4 \div 10^6$	ms	ciągły, impulsowy
Natapianie (platerowanie)	$5 \cdot 10^4 \div 10^6$	ms	ciągły, impulsowy
Natapianie (szklwienie)	$10^5 \div 10^7$	μs	ciągły, impulsowy
Utwardzanie detonacyjne (udarowe)	$10^8 \div 10^{10}$	ns	impulsowy

Stosowane do obróbki powierzchniowej promieniowanie laserowe kształtuje strukturę warstwy wierzchniej poprzez:

- przemiany fazowe w stanie stałym, a następnie szybkie lub powolne chłodzenie (przesycanie, wyzarzanie, hartowanie...),
- przetopienie cienkiej warstwy powierzchniowej, a następnie jej gwałtowne krzepnięcie (przetopienie, stopowanie, platerowanie...),
- udarowe odkształcenie powierzchniowej warstwy wtedy, gdy powstająca fala uderzeniowa w wyniku działania impulsów laserowych o dużej mocy prowadzi do detonacyjnego odparowania powierzchniowej warstwy materiału.

Spośród ww. procesów w obróbce powierzchniowej najszerze zastosowanie znalazły techniki laserowej modyfikacji warstwy wierzchniej poprzez przemiany fazowe w stanie stałym oraz poprzez przetopienie cienkiej warstwy powierzchniowej. Klasyfikację procesów laserowej obróbki powierzchniowej przedstawiono na poniższym schemacie (rys. 2).



Rys. 2. Schemat klasyfikacji powierzchniowej obróbki laserowej [3]

Technologie przebiegające bez przetapiania warstwy wierzchniej obrabianego materiału

Hartowanie powierzchniowe (ang. *surface hardening*) to proces polegający na zwiększeniu twardości, wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej oraz odporności na korozję i zużycie przez tarcie materiału w warstwie podłoża, w skutek zastosowania wiązki laserowej do obróbki cieplnej materiału. Prędkość nagrzewania wynosi 10^6 K/s, natomiast prędkość chłodzenia osiąga wartość 10^4 K/s [1]. Chłodzenie następuje gwałtownie i samodzielnie, spowodowane jest zjawiskiem przewodnictwa cieplnego. Hartowanie powierzchniowe przy użyciu lasera funkcjonuje jako proces samodzielny bądź w połączeniu z innymi procesami obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej [1].

Technologie z przetopieniem warstwy wierzchniej obrabianego materiału

Stopowanie (ang. *alloying*) lub wtapianie jest procesem polegającym na równoczesnym stopieniu powierzchni podłoża oraz materiału stopującego nałożonego na tą powierzchnię. Podczas przetapiania, w wyniku ruchów konwekcyjnych i grawitacyjnych oraz ciśnienia, jakie wywiera gaz osłonowy towarzyszący wiązce laserowej na powierzchnię powstałej cieczy, następuje mieszanie stopionych materiałów, a po zatrzymaniu akcji laserowej zachodzi szybkie krzepnięcie stopu, który powstał w wyniku tego procesu. Stopowanie może być realizowane jako:

- wtapianie laserowe, jeśli do podłoża wprowadzamy materiał stopujący w formie cząstek stałych, np. proszku bądź drutu oraz gazów,
- przetapianie laserowe, jeśli materiał stopujący jest nanoszony na powierzchnię w formie powłoki i przetapiany razem z cienką warstwą podłoża. Po roztopieniu obu warstw następuje wymieszanie ich materiału, w wyniku rozpuszczenia materiału stopującego w materiale podłoża powstaje warstwa różniąca się strukturą, właściwościami fizycznymi i chemicznymi od zarówno materiału stopującego jak i podłoża.

Materiał stopujący może być nanoszony na podłoże zarówno przed rozpoczęciem obróbki laserowej (poprzez malowanie, natryskiwanie zawiesinami, pokrywanie proszkami lub pastami, natryskiwanie cieplne, naporowywanie, osadzanie elektrolityczne, nakładanie cienkiej folii czy obróbkę elektroiskrową) lub w jej trakcie – przez pneumatyczny nadmuch komponentów stopowych będących pod postacią gazu lub cząstek ciała stałego do roztopionego materiału podłoża. W wyniku stopowania następuje zwiększenie odporności na ścieranie, korozję chemiczną, atmosferyczną oraz temperaturową. Stopowanie realizowane jest przy gęstościach mocy w zakresie $5 \cdot 10^4 \div 10^6$, przy czasie ekspozycji od dziesiątych do tysięcznych części sekundy [1].

Natapianie (ang. *cladding*), nazywane też platerowaniem albo napawaniem laserowym, to proces polegający na stopieniu grubej warstwy materiału natapianego wraz z cienką warstwą podłoża [1]. Celem natapiania jest stworzenie warstw odpornych na procesy korozyjne, zużycie ścierane oraz erozyjne odpornych na utlenianie i działanie temperatur dochodzących do 1000°C (warstwy żaroodporne i żarowytrzymałe). Natapianie laserowe stosowane jest do uzyskiwania zarówno warstw metalicznych, ceramicznych czy kompozytowych, charakteryzujących się wysoką gęstością i znakomitą powiązaniem z podłożem, niezależnie od jego składu chemicznego czy temperatury topnienia.

Metody nakładania materiału natapianego na podłoże materiału:

- przez rozpoczęciem obróbki laserowej – w trakcie procesu przetapiania wskutek akcji laserowej skierowanej z góry powstają defekty (pęcherze, niedotopienia) w bliskiej okolicy podłoża materiału. Spoiwo dodawane do proszków, którego zadaniem jest zapewnienie dostatecznej przyczepności warstwy do podłoża, również służy tworzeniu się defektów,
- w trakcie obróbki laserowej – proces polegający na doprowadzeniu w sposób nieprzerwalny przez dyszę gazową materiału natapianego (proszku) nad powierzchnię materiału. Następnie pod wpływem działania wiązki laserowej proszek ulega częściowemu stopieniu, pewna część energii dociera do podłoża (proszek nie absorbuje całej energii), co prowadzi do nadtopienia cienkiej warstwy materiału

podłoża. W wyniku rozgrzania się proszku następuje jego opadanie na nadtopioną warstwę podłoża, wskutek kontaktu z podłożem ulega całkowitemu stopieniu i wymieszaniu z nim.

Nadtapianie (ang. *glazing*) to stopienie warstwy wierzchniej podłoża albo warstwy wierzchniej nałożonej na podłoże. Celem tego procesu jest otrzymanie po wystygnięciu warstwy chemicznie i strukturalnie bardziej jednorodnej niż przed przetopieniem. Przykładowe zmiany mikrostruktury dla stopu AA2091 przedstawiono na rys. 3. W wyniku zachodzącego stopienia warstwy wierzchniej możemy uzyskać np. struktury drobnoziarniste, o poszerzonym zakresie rozpuszczalności składników stopowych, dzięki czemu uzyskane struktury charakteryzują się zwiększonymi właściwościami antykorozyjnymi, wyższą odpornością na ścieranie, korozję i erozję. Drugi proces, czyli stopienie warstwy wierzchniej nałożonej na podłoże prowadzi do uszczelnienia powłok poprzez usunięcie zarysowań i pęknięć powłok galwanicznych, a także do wygładzenia powierzchni oraz zniwelowania porowatości.

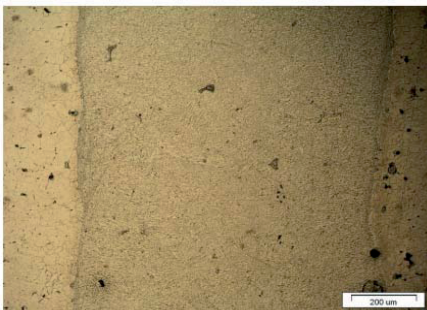
W zależności od otrzymanych właściwości warstw powierzchniowych natapianie może być realizowane jako:

- czyste natapianie, dzięki któremu otrzymujemy drobnoziarniste struktury bądź nieprzepuszczalne powłoki,
- szkliwienie (albo amorfizację), dzięki której warstwa wierzchnia ma budowę bezpostaciową.

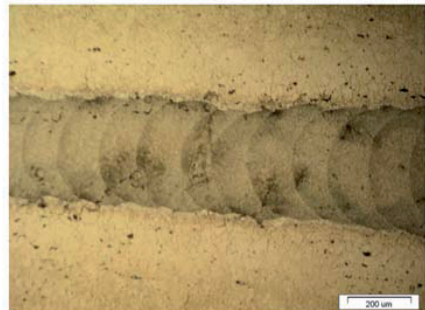
Natapianie czyste stosuje się w celu rozpuszczenia istniejących w warstwie wierzchniej podłoża zanieczyszczeń mających niepożądany wpływ na jego właściwości. Po rozpuszczeniu zanieczyszczenia nie wydzielają się ponownie lub wydzielają się w innej postaci i formie. Natapianiu czystemu poddawane są np. żeliwa szare czy stale nierdzewne w celu utwardzenia powierzchni wyrobów oraz zwiększenia ich odporności na zużycie ścierne i korozję.

Szkliwienie – proces polegający na uformowaniu powłoki ochronnej poprzez powierzchniowe przetopienie materiału wiązką laserową w celu utwardzenia, zwiększenia wytrzymałości, odporności na czynniki chemiczne i atmosferyczne (wilgoć, korozję) lub wygładzenia powierzchni.

a)



b)



Rys. 3. Zmiany mikrostruktury stopu AA 2091 po powierzchniowym przetopieniu przy użyciu wiązki lasera a) CO₂ CW, b) Nd: YAG o działaniu impulsowym [4]

Technologie laserowe przebiegające z odparowaniem warstwy wierzchniej obrabianego materiału

Utwardzenie detonacyjne lub udarowe (*shock hardening*) zachodzi w wyniku działania silnie skoncentrowanej wiązki laserowej o dużej energii na cienką warstwę materiału podłoża. W skutek tego oddziaływania następuje nagłe jej odparowanie i wytworzenie się obłoku plazmy, następstwem tych działań jest powstanie ogromnej fali uderzeniowej, która napotykając na swojej drodze nieodparowany materiał, utwardza go swoją siłą uderzeniową. Natomiast powstający obłok plazmy sprawia, że obrabiany materiał jest chroniony przed średniofalowym promieniowaniem podczerwonym. Wytwarzająca się plazma rozplywa się po powierzchni obrabianego materiału, a następnie zlewa się do powstałego krateru i umacnia swoim ciśnieniem ścianki krateru.

Technologie laserowe przebiegające z odparowaniem – materiału tarczy – osadzanie powłok przy użyciu wiązki lasera o działaniu impulsowym metoda PLD (ang. *Pulsed Laser Deposition*)

Energia wiązki lasera o działaniu impulsowym wykorzystywana jest do formowania powłok poprzez odparowanie materiału tarczy, przeniesienie go w próżni, a następnie osadzenie na podłożu. Metoda ta po raz pierwszy na świecie zastosowana została w 1965 roku przez Smitha Turnera do otrzymania cienkich warstw półprzewodnikowych i dielektrycznych, a rozszerzona przez Dijkampa i współpracowników, którzy w roku 1987 roku rozpoczęli otrzymywanie z jej zastosowaniem warstw i nadprzewodników wysokotemperaturowych [2].

Formowanie cienkich powłok metodą ablacji laserowej zalicza się do procesów fizycznego osadzania par w próżni PVD. W tym celu są stosowane lasery emitujące promieniowanie w zakresie nadfioletu, ponieważ materiały metaliczne, jak i niemetaliczne mają największą absorpcję tego zakresu promieniowania: są to głównie lasery ekscimerowe lub Nd-YAG wyposażone w szybki przełącznik Q-switch. Za pomocą tego rodzaju laserów otrzymywane są gęstości energii w impulsie w zakresie 1–30 J/s, przy czasach trwania impulsu rzędu nano-, a coraz częściej femtosekundy, przy powtarzalności impulsów w zakresie od kilku do ponad 100 Hz.

Charakterystyka metody PLD [1]:

- szybkość osadzania, która może dochodzić do 0,03 nm/impuls,
- rozkład kątowy w strudze, występuje silna zależność pomiędzy grubością osadzonej powłoki a rozkładem kątowym,
- przenoszenie składu stechiometrycznego, skład stechiometryczny osadzonej powłoki jest zbliżony do składu odparowywanej tarczy,
- kropelki w osadzonej powłoce, które pojawiają się w otrzymywanej powłoce,
- powłoki uzyskiwane metodą PLD charakteryzują się dobrą adhezją do podłoża,
- uzyskuje się wyższy stopień przesycenia w stosunku do powłok otrzymywanych innymi metodami,
- jednorodność powłok jest większa od identycznych powłok tworzonych techniką rozpylania magnetycznego,
- naprężenie własne w powłoce na poziomie 1–8 GPa,
- powłoki posiadają strukturę nanokrystaliczną,
- powłoki otrzymywane metodą PLD wyróżniają się dobrze wykształconą teksturą krystalograficzną.

Techniki laserowe stanowią ważną grupę metod stosowanych w inżynierii powierzchni, stwarzając szerokie możliwości zastosowań. Wynik oddziaływania wiązki promieniowania laserowego na materiał uzależniony jest przede wszystkim od rodzaju materiału i pozostałych parametrów prowadzonego procesu. Obserwowany dynamiczny rozwój technik laserowych jest konsekwencją badań nad efektywnością technik laserowych w zakresie poprawy trwałości i wytrzymałości obrabianych elementów, tak na drodze modyfikowania ich powierzchni, jak i wytwarzania warstw i powłok o żądanych właściwościach: np. wysokiej odporności na korozję, erozję, działanie wysokich temperatur, czy też zużycie ściernie.

Praca finansowana w ramach projektu badawczego własnego MNiSW numer N N507 451434

Bibliografia

- [1] Burakowski T., Wierzchoń T., *Inżynieria powierzchni metali*, WPW, Warszawa 1992
- [2] Twardowska A., „Tworzenie struktury stopów na bazie Al-Li-Zr podczas krystalizacji w procesie laserowego spawania”, praca doktorska, AGH, Kraków 2000
- [3] Kusiński J., *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii powierzchni*, Akapit, Kraków 2000
- [4] Twardowska A., *Zmiany mikrostruktury stopu Al-Li-Cu-Zr pod wpływem działania lasera Nd-YAG*, *Problemy współczesnej techniki w aspekcie inżynierii i edukacji*, Kraków 2005, s. 159

Laser beam in surface engineering application

Abstract

Laser beam as a source of energy with its specific characteristics give opportunity to be widely used in material processing. In this work, the basis of techniques used for material properties enhancement by means of wear, hardness, friction coefficient, high temperature, corrosion and erosion resistances are presented, realized by surface modification (glazing, surface hardening, amorphysation, shock hardening, alloying, cladding) or coating (pulsed laser ablation).