

Bogdan ANTOSZEWSKI¹

WYBRANE ZAGADNIENIA LASEROWEGO TEKSTUROWANIA POWIERZCHNI

W opracowaniu przedstawiono wybrane aspekty związane z technologią laserowego kształtowania tekstury powierzchniowej elementów z SiC współpracujących ślizgowo. W części opisowej analizowano cechy wiązki laserowej istotne z punktu widzenia wytwarzania tekstury. W części badawczej przedstawiono wyniki eksperymentów technologicznych. Rezultatem pracy są wytyczne do technologii teksturowania przy wykorzystaniu lasera Nd:YAG.

CHOSEN ASPECTS OF THE LASER TEKSTURING OF THE SURFACE

The study presented chosen aspects connected with laser technology which forms texture of SiC sliding ring co-operating. In the descriptive part there were analyzed qualities of the laser bundle that are essential from the texture production point of view. The research part of the study showed the outcome technological experiments that were The end results were guidelines to the texture technology with the use Nd:YAG laser.

1. WSTĘP

Laserowe teksturowanie powierzchni jest jednym z elementarnych procesów mikroobróbki laserowej [1]. Polega ona na lokalnym i krótkotrwałym działaniu termicznym lub fotochemicznym zogniskowanej odpowiednio profilowanej wiązki laserowej na różne materiały w celu ich usunięcia, stopienia, nagrzania lub w celu zmiany ich właściwości. Podstawowe procesy technologiczne mikroobróbki to: mikrodrążenie, ciecienie i wycinanie w elementach małogabarytowych, usuwanie warstw oraz domieszkowanie półprzewodników. Najważniejszymi zaletami mikroobróbki laserowej są : małe pole działania, działanie zdalne (bezdotykowe), działanie krótkotrwałe, duża wydajność procesu i łatwość automatyzacji urządzeń laserowych [10].

Pole działania przy mikroobróbce jest uzależnione od możliwości ogniskowania wiązki promieniowania laserowego a więc także od długości fali promieniowania laserowego [5] .

¹Politechnika Świętokrzyska , Centrum Laserowych Technologii Metali, Al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce
tel+ 48 41 34 24 539 e-mail: ktrba@tu.kielce.pl

$$r_f = 2,44 \frac{f \cdot \lambda}{r}$$

Gdzie: f - ogniskowa soczewki skupiającej, λ - długość fali promieniowania laserowego, r - promień wiązki wejściowej.

Minimalna wielkość pola działania przy mikroobróbce laserowej wynosi od kilku μm^2 do około 1 mm^2 . Natomiast minimalna rozdzielczość sąsiednich pól działania wynosi ok. $0,3 \mu\text{m}$ do ok. 1 mm i zależy od rodzaju użytego lasera i parametrów układu optycznego ogniskującego wiązkę oraz parametrów układu pozycjonującego element obrabiany.

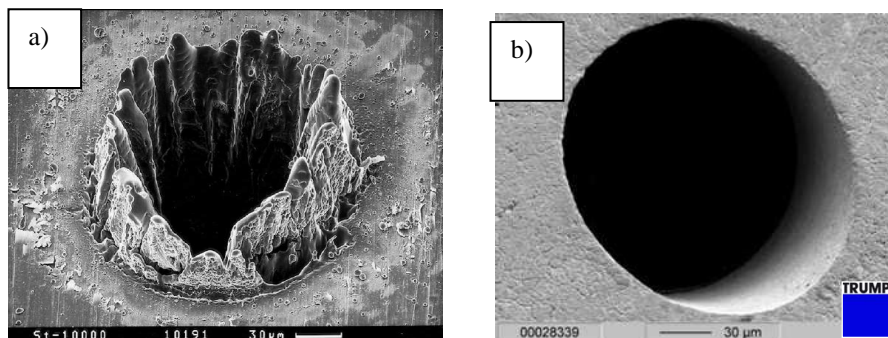
O przebiegu zjawiska w naświetlanym materiale decyduje nie tylko wartość energii zawartej w impulsie laserowym ale także czas trwania impulsu laserowego. W zależności od intensywności promieniowania i czasu ekspozycji można wykorzystywać różne mechanizmy oddziaływania na materiał. Wynika to ze skończonych czasów reakcji elektronów i sieci atomowej materiału na fotony. Impulsy o długości większej o 1 ns nazywane są impulsami długimi. W przypadku czasu od 1 ps do 1 ns impulsy nazywa się krótkimi, a przy czasie trwania mniejszym od 1 ps mówi się o impulsach ultrakrótkich [6].

Gdy czas trwania impulsów laserowych jest bliski czasów relaksacji w skali mikroskopowej pomiędzy różnymi nośnikami energii, wówczas konwencjonalne, paraboliczne równanie przewodnictwa cieplnego nie opisuje rozkładu temperatury w sposób zgodny z wynikami doświadczalnymi. Zamiast niego stosowane jest hiperboliczne równanie przewodnictwa, oparte na założeniu skończonej wartości prędkości rozchodzenia się fali ciepła [7].

Podczas realizacji obróbek długimi impulsami laserowymi wykorzystywane są zjawiska związane z nagrzewaniem laserowym w których wiązkę promieniowania laserowego można traktować jako zewnętrzne źródło ciepła. Taki przebieg procesów ma miejsce wówczas gdy długość trwania impulsu laserowego jest rzędu nanosekund lub więcej. W określonych warunkach może mieć tu miejsce tak zwana „ablacja gorąca” której towarzyszą nadtopienia na brzegach strefy obrabianej oraz obecność niewielkiej strefy wpływu ciepła (Rys. 1a). Przy impulsach laserowych krótkich to jest piko sekundowych lub femtosekundowych przy usuwaniu materiału ma miejsce ablacja zwana zimną (Rys1b). Obecnie te procesy nabierają coraz to większego znaczenia. W literaturze w odniesieniu do tych zjawisk używa się terminów „ablacja laserowa” lub „fotodekompozycja ablacyjna”. Ablacja jest procesem, w którym wysokoenergetyczne kwanty promieniowania lasera wywołują obniżenie energii wiązań pomiędzy cząstkami, co umożliwia zdejmowanie warstw atomowych jedna po drugiej [9].

Usuwanie materiału z powierzchni ciała stałego w wyniku ablacji wywołanej laserem, możliwe jest wówczas gdy energia promieniowania lasera osiągnie wartość progową właściwą dla danego rodzaju ciała stałego. Wartość progowa oznaczana w literaturze jako F_0 lub F_{th} , wyrażana w ilości energii przypadającej na jednostkę powierzchni zależy nie tylko od rodzaju materiału na który pada promieniowanie ale także od długości fali użytej wiązki promieniowania laserowego. Wartość progowa zawiera się w przedziale od kilkudziesięciu mJ/cm^2 do poziomu znacznie przekraczającego 1 J/cm^2 . Aktualnie w literaturze rozpatruje się równolegle kilka modeli opisujących zjawisko ablacji laserowej. Wymienić tu można modele termiczny, fotomechaniczny, fototermiczny lub fotochemiczny

[2], [3], [4]. Współczesne lasery pikosekundowe podczas pojedynczego impulsu wykonują krater o średnicy 10, 20 i więcej μm o głębokości kilku μm .



Rys 1. Widok otworów drążonych a) laserem nanosekundowym, b) pikosekundowym [9]

W przypadku ablacji gorącej występuje obłok parowy absorbujący promieniowanie elektromagnetyczne i który może ulec jonizacji. Silnie zjonizowany gaz zawierający swobodne elektrony, czyli plazmę, przesłania powierzchnię obrabianego materiału i sam absorbuje energię wiązki laserowej, przez co utrudnia obróbkę. Obłok plazmowy ogrzewa powierzchnię materiału. Plazma utrzymuje się w powietrzu przez okres rzędu mikrosekund, stąd jej niekorzystny wpływ można minimalizować stosując częstotliwość impulsów rzędu 1 MHz, pozwalającą na wygaśnięcie obłoku plazmowego pomiędzy kolejnymi impulsami.

Przy dostatecznej intensywności promieniowania występuje gwałtowne odparowanie materiału. Impulsy o długości 10-30 ns są stosowane do drążenia otworów o małej dokładności oraz do umacniania powierzchniowego metali pod wpływem fali uderzeniowej wywoływanej przez ciśnienie odrzutu odparowanego materiału.

2. TEKSTUROWANIE POWIERZCHNI PIERSCIENI Z WĘGLIKA KRZEMU

Tekstrowanie powierzchni pierścieni wykonano wykorzystując laser Nd:YAG, typ *ESI Model 5200 $\mu\text{VIA DRILL}$* . Jest to laser pracujący w trybie impulsowym, pompowany diodowo, specjalizowany do obróbki obwodów drukowanych. Laser emituje promieniowanie nadfioletowe o długości fali 355 nm. Długość fali dobrana została do najbardziej efektywnej obróbki *Cu*. Maksymalna moc wiązki 2W. Omawiany laser przeznaczony jest do wykonywania mikrootworów w laminatach, płytach foliowanych miedzią wykorzystywanych do produkcji obwodów drukowanych. Może być również wykorzystywany do wykonywania otworów w innego typu materiałach i cięcia, przy czym maksymalna moc wiązki ogranicza pole wykorzystania urządzenia. Możliwe cięcie folii metalowych (stal, nikiel) do 100 μm grubości (miedzianych do 200 μm). Maksymalna ilość mikrootworów wykonywanych przez tego typu laser przekracza 20000 otworów/h. Średnica wiązki laserowej w ognisku wynosi do 25 μm .

Pod wpływem działania wiązki lasera dochodzi do ablacji laserowej obrabianego materiału. Energia fotonów zamieniana jest na powierzchni materiału na energię

elektronową, termiczną i mechaniczną. Rezultatem takiego działania jest odparowanie i usunięcie materiału w postaci neutralnych atomów i molekuł, dodatnich i ujemnych jonów z wystawionej na promieniowanie wiązki laserowej powierzchni ciała stałego.

Tab.1 Parametry pracy lasera ESI Model 5200 μ VIA DRILL

Producent	<i>Electro Scientific Industries</i>
Typ urządzenia:	<i>Model 5200</i>
Rodzaj lasera:	<i>Nd:YAG, laser UV [355nm] pompowany diodowo</i>
Moc szczytowa	<i>>15 kW dla 3 kHz</i>
Szerokość impulsu	<i>30 ns dla 3 kHz</i>
Częstotliwość	<i>100 Hz ÷ 20 kHz</i>
Pole robocze	<i>533 mm x 635 mm</i>

Przedmiotem badań były pierścienie z SiC o wymiarach: średnica zewnętrzna - $d_o = 35,3$ mm, średnica wewnętrzna - $d_i = 25,1$ mm, wysokość - $h = 7$ mm. Parametry tekstury, to jest odległości zagłębień, średnice i głębokość zagłębień jak i stopień zaczernienia dobrano na podstawie studiów literaturowych oraz potrzeb eksperymentu planowanego (Tabela 2).

Na podstawie badań doświadczalnych przyjęto następujące parametry erozji laserowej: zakres średnic plamki laserowej $d = 0,78 \div 150$ μ m; zakres mocy lasera $P = 0,37 \div 0,4$ W; zakres prędkości przemieszczania wiązki $V = 15,7 \div 23,56$ mm/s; odległość od ogniska $\Delta f = 0$ mm; częstotliwość powtarzania $f = 6400$ Hz.

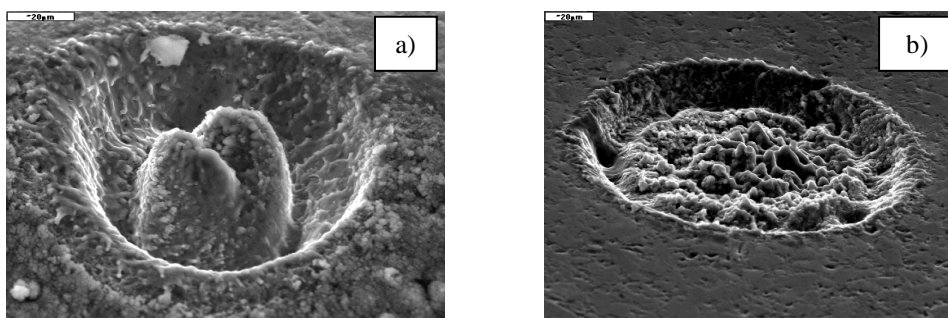
Wgłębienia zostały wykonane w dwóch etapach (dwa kroki). W pierwszym etapie (pierwszy krok) laser pracował po torze spirali drążąc wgłębienie o odpowiedniej średnicy. W drugim kroku za pomocą pojedynczych impulsów laserowych (uderzeń) z zadaną częstotliwością oraz zadaną ich ilością następowało czyszczenia dna otworu z pozostałych produktów obróbki.

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie czasu procesu oraz podstawowe parametry charakteryzujące wykonaną teksturę.

Tab. 2 Parametry tekstury powierzchni pierścieni

Nr pierścienia	Średnica wgłębienia [μ m]	Odległość między środkami osi symetrii wgłębień [μ m]	Czas procesu [s]
1	78	162	1097
2	134	279	844
3	78	106	2466
4	134	183	1947
5	150	256	1380
6	70	119	2328
7	102	128	2533
8	102	233	760
9	102	174	1838
10	102	174	1833

Pierwszy krok był krokiem głównym, w którym następowało wycięcie całego otworu (kształt, średnica i głębokość) (Rys. 2a). Drugi krok to krok czyszczący w czasie którego dochodziło do wygładzenia zarysu dna otworu (Rys. 2b). Materiał poddawany obróbce był podatny na działanie wiązki laserowej a kształtowanie wgłębień następowało bez odkształceń i nadmiernych nadtopień na krawędziach. Ablacja zachodziła przy niskiej energii wiązki.



Rys 2 Widok wgłębień po a) pierwszym kroku operacji, b) po drugim kroku

Dla zastosowań tribologicznych powierzchnie po teksturuowaniu zwykle poddaje się procesowi docierania i dogładzania. Uzyskuje się wówczas twarde płaskie obszary przenoszące obciążenia normalne i obszary wgłębień, w których podczas smarowania cieczowego gromadzi się środek smarny jak i mogą być generowane siły hydrodynamiczne zwiększające nośność pary ślizgowej. Powierzchnie o takim ukształtowaniu stosowane są nie tylko w tribologii ale również z innych względów np. zwiększona intensywność odprowadzania ciepła, zwiększona reaktywność powierzchni itp.

Zagłębienia wykonywane dla zastosowania w ślizgowych węzłach tarcia [1] charakteryzują się pewną regularnością. W przedstawionym przykładzie mamy do czynienia z symetrią dwukierunkową (kwadratowa siatka tekstury). Przy modelowaniu można przyjąć założenie, że pojedyncze elementy tekstury tworzą zagłębienia o kształcie walca lub dokładniej ściętego stożka.

Do badań efektów erozji laserowej wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel JSM-5400. Obserwowane efekty erozji laserowej układają się w regularnych odstępach tworząc zaplanowaną strukturę powierzchni. Na dnie krateru widoczne są wzniesienia i zagłębienia, które powstają w wyniku zmian fazowych, strukturalnych i towarzyszących im zmianom objętości właściwej w strefach oddziaływania wiązki laserowej. Pod wpływem działania sił termokapilarnych i ruchów konwekcyjnych powstały niewielkie wzniesienia (wzgórki), których struktura składa się z przetopionego, a następnie skryształizowanego SiC. Prawdopodobną przyczyną wystąpienia tego efektu były zbyt długie czasy trwania impulsów laserowych.

Z obserwacji mikroskopowych wynika ponad to, że w wyniku lokalnego oddziaływania promieniowania laserowego na krawędziach wgłębień i we wnętrzu otworu pozostały nieusunięte produkty erozji.

3. PODSUMOWANIE

- Stosując technologię laserową przy użyciu lasera Nd:YAG *ESI Model 5200 µvia drill* można wytwarzać w sposób powtarzalny na powierzchni ślizgowej zaplanowaną strukturę wgłębień tworzących geometryczną teksturę powierzchniową. Pojedyncze wgłębienia są powtarzalne w zakresie kształtu, a ich głębokość dla materiałów metalowych oraz SiC może osiągać wartość rzędu kilkudziesięciu µm.
- Oprogramowanie lasera umożliwia wykonywanie tekstury na powierzchniach płaskich. Dla powierzchni cylindrycznych i innych krzywoliniowych konieczne jest odpowiednie oprzyrządowanie i oprogramowanie lasera.
- Kształt osiągalnych wgłębień jest ograniczony oprogramowaniem lasera. Standardowo przygotowane są procedury do drażenia otworów okrągłych. Stosując własne programy można drażyć wgłębienia o dowolnym kształcie.
- Impulsy nanosekundowe pozostawiły w drażonych wgłębieniach materiał przetopiony. Poprawę efektów obróbki prawdopodobnie dałaby tak zwana ablacja zimna, to jest zastosowanie impulsów o krótszym czasie trwania (pikosekundowych) i wyższej energii.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Etsion I.: *State of the Art in Laser Surface Texturing*. Transaction of the ASME. January 2005. Vol. 127.
- [2] Volchok A., Halperin G., Etsion I.: *The effect of surface regular microtopography on fretting fatigue life*. Wear 235 (2002) 509-515.
- [3] Powel P. M., *Laser-Based Micromachining Gets Practical*. Photonics Spectra, July 2003, 70.
- [4] Steen 2003. Steen W. M., *Laser Material Processing*. Springer 2003.
- [5] Stacewicz, Witowski i in. 2002. Stacewicz T., Witowski A., Ginter J., *Wstęp do optyki i fizyki ciała stałego*. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, 2002.
- [6] Chan C. L., *Review of Ultrashort Pulse Laser Materials Interaction*. Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), Laser Institute of America, 2001.
- [7] Qiu T. Q., Tien C. L., *Short-pulse laser heating on metals*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 3, pp. 719-726.
- [8] Domański R. *Promieniowanie laserowe – oddziaływanie na ciała stałe*. WNT, Warszawa, 1990.
- [9] Major B. : *Ablacja i osadzanie laserem impulsowym*, WNT AKAPIT Kraków 2002
- [10] Materiały firmowe *Laser Community* The Laser Magazine from TRUMPF 02.08