

**Jan BUJAK**

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

## **OCENA WPLYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW IMPULSOWEJ WIĄZKI LASEROWEJ NA WYDAJNOŚĆ PROCESU ABLACJI TYTANU**

### **Słowa kluczowe**

Parametry impulsowej wiązki laserowej, ablacja laserowa, wydajność ablacji.

### **Streszczenie**

Na podstawie przeprowadzonych badań określono wpływ podstawowych parametrów wiązki promieniowania laserowego (gęstość energii, częstość repetycji impulsów) na wydajność procesu ablacji tytanu. Wydajność procesu ablacji laserowej oceniano poprzez wyznaczenie objętości materiału odparowanego podczas jednego impulsu akcji laserowej. W ramach wykonanych badań określono optymalne wartości gęstości energii wiązki i częstości repetycji impulsów dla przeprowadzenia procesu ablacji badanego materiału.

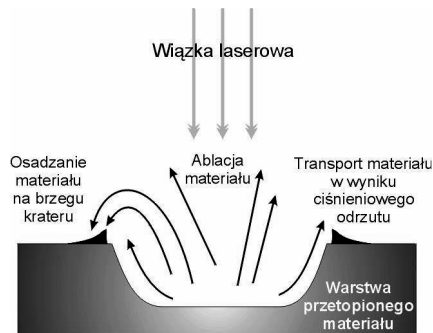
### **Wprowadzenie**

Zastosowanie wiązki promieniowania laserowego w obszarze inżynierii powierzchni obecnie sprowadza się głównie do przeprowadzenia następujących operacji obróbek powierzchniowych materiałów: nagrzewania, przetapiania oraz ablacji, niekiedy utożsamianej z odparowaniem [1, 2]. W literaturze tematu obejmującej tematykę ablacji laserowej przyjęto bowiem, iż termin ten opisuje ogólnie proces wytwarzania par materiału poprzez oddziaływanie na jego powierzchnię wiązki promieniowania laserowego, bez precyzowania rodzaju zjawisk fizykochemicznych wywołujących ten proces [3].

Ablacja laserowa jest zjawiskiem wykorzystywanym do realizacji procesów rozpylania wielu materiałów w technologii wytwarzania powłok metodą PLD (*Pulsed Laser Deposition*). Zjawisko ablacynego odparowania materiału wywołane w tym przypadku bombardowaniem jego powierzchni przez fotony promieniowania laserowego, jest wieloetapowym złożonym procesem fizycznym, w wyniku którego z powierzchni naświetlanego materiału następuje emisja cząstek materiału tarczy [1]. W przebiegu procesu odparowania materiału wiązką laserową wyróżnić można następujące etapy [1, 2]:

- absorpcję wiązki promieniowania laserowego przez materiał tarczy,
- nagrzewanie i gwałtowne odparowanie materiału tarczy (zjawisko ablacji),
- jonizację par i wytworzenie strumienia plazmy,
- gwałtowne rozprzestrzenianie się strumienia plazmowego z wektorem prędkości prostopadłym do powierzchni tarczy.

Generalnie wyróżnić można dwa podstawowe mechanizmy ablacji laserowej: ablację fotochemiczną oraz ablację fototermiczną. Przykładowo ablacja fotochemiczna zwana „zimną ablacją” odgrywa dominującą rolę w procesie rozpylania materiałów organicznych (np. PCV). W procesie tym odpowiednio wysoka energia fotonów, bombardujących powierzchnię naświetlanego materiału, umożliwia rozrywanie jego wiązań międzyatomowych, a ograniczone efekty cieplne pojawiają się jedynie w obszarach brzegowych strefy oddziaływania wiązki laserowej na tarczę [3]. Natomiast ablacja fototermiczna jest procesem, w którym odparowanie materiału zachodzi głównie wskutek szybkiego wzrostu temperatury w przypowierzchniowych warstwach tarczy, wywołanego oddziaływaniem na materiał tarczy wiązki promieniowania laserowego (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczny przebieg zjawisk zachodzących podczas procesu fototermicznej ablacji laserowej [4]

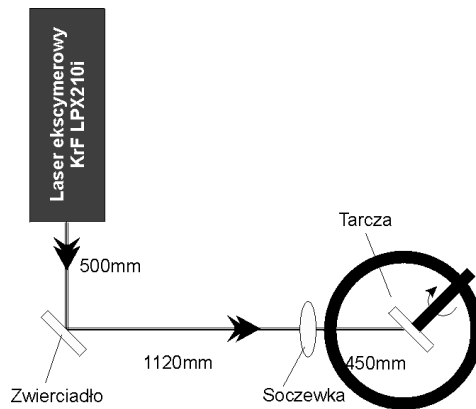
Ponieważ temperatura w naświetlanych mikroobszarach materiału tarczy chwilowo może przekraczać jego temperaturę wrzenia, procesowi odparowania tarczy towarzyszą typowe efekty hydrodynamiczne takie, jak warstwa Kundse-  
na, zjawisko zwrotnego osadzania się materiału na powierzchni tarczy, ekspans-

syjny transport materiału, jak również obecność kropeł roztopionego materiału w wytworzonych parach [1]. Generowaną w procesie laserowej ablacji wysokojonizowaną plazmę tworzą: atomy, jony, elektrony, cząstki neutralne oraz kropelki roztopionego materiału [5]. Podstawowymi parametrami wpływającymi istotnie na przebieg ablacji fototermicznej i właściwości wytworzonej w tym procesie plazmy są: energetyczne parametry impulsu laserowego (gęstość energii w impulsie, czas trwania impulsu, częstość repetycji impulsów), właściwości optyczne i termiczne odparowywanego materiału (współczynnik absorpcji, przewodność cieplna, temperatura topnienia) oraz ciśnienie komory próżniowej [6, 7].

## 1. Prace badawcze

### 1.1. Materiał badań

Niskociśnieniowe procesy ablacji laserowej przeprowadzono na stanowisku badawczym przedstawionym schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego zestawionego do realizacji procesów ablacji laserowej

Do przeprowadzenia procesów ablacji laserowej wykorzystano tarcze o średnicy 40 mm i grubości 12 mm, wykonane z metalicznego tytanu o czystości 99%. Powierzchnie tarcz przeznaczone do naświetlania wiązką promieniowania laserowego szlifowano na polerze metalograficznej  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ . Przed umieszczeniem w komorze próżniowej wszystkie powierzchnie tarcz dokładnie myto i odtłuszczano w trójkomorowej myjce ultradźwiękowej wypełnionej trójchloroetylenem (TRI), a następnie suszono w strumieniu czystego azotu. Tak przygotowane tarcze instalowano w komorze próżniowej stanowiska. W celu odgazowania przestrzeni roboczej komory próżniowej (usunięcia zaabsorbowanych zanieczyszczeń gazowych takich jak tlen oraz cząsteczki pary wodnej) ściany komory nagrzewano do temperatury  $T = 60^\circ\text{C}$ . Następnie komorę od-

pompowywano do ciśnienia  $p = 5,0 \times 10^{-5}$  mbar, przy wykorzystaniu układu olejowych pomp próżniowych (zestawionego z pompy rotacyjnej oraz pompy dyfuzyjnej). Po zakończeniu operacji pompowania komorę roboczą napełniano argonem o czystości 6.0. Po ustabilizowaniu się ciśnienia na poziomie  $p = 7,0 \times 10^{-1}$  mbar uruchamiano laser i realizowano proces ablacyjnego odparowywania materiału tarczy. Do przeprowadzenia procesów ablacji wykorzystano laser ekscymerowy Lambda Physik LPX 200i KrF (z długością fali promieniowania  $\lambda = 248$  nm), stosując następujące parametry jego pracy:

- średnią energię wiązki w impulsie  $E = 300$  mJ,
- częstość repetycji impulsów 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz,
- czas naświetlania  $t = 20$  min,

Zróznicowanie wartości gęstości energii promieniowania laserowego uzyskiwano poprzez zmianę obszaru ogniskowania wiązki laserowej na powierzchni tarczy w wyniku zmiany położenia soczewki skupiającej usytuowanej na torze optycznym stanowiska laserowego.

W celu zminimalizowania niekorzystnych efektów wywołanych przez zjawisko nadtapiania się warstw powierzchniowych pod wpływem oddziaływania promieniowania laserowego, zastosowano obrót tarcz z szybkością 30 obr/min.

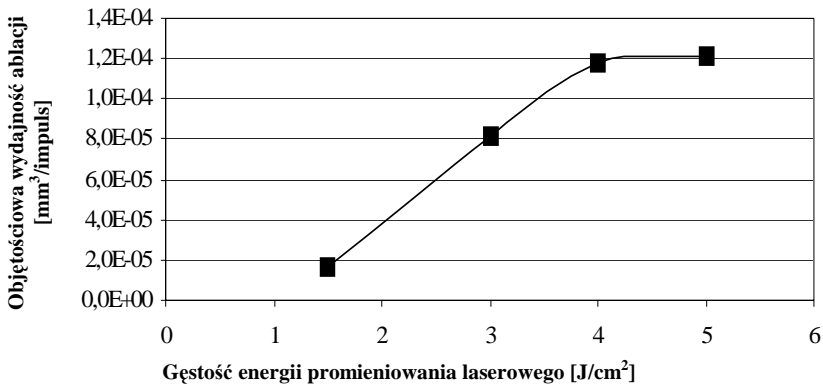
Po zakończeniu procesów ablacji tarcze chłodzono w komorze próżniowej w atmosferze argonu przez okres  $t = 30$  min.

## ***1.2. Metodyka badań procesów ablacji***

Szybkość procesów ablacji tytanu określano przez wyznaczenie objętościowej wydajności ablacji, zdefiniowanej jako objętość materiału, odparowywanego w przeliczeniu na jeden impuls promieniowania laserowego naświetlającego powierzchnię tarczy. W tym celu na każdej z tarcz po zakończeniu procesu ablacji rejestrowano na profilografii HOMMEL TESTER 2000 przekrój krateru utworzonego w wyniku odparowania materiału tarczy. Profile przekrojów kraterów wyznaczano w trzech losowo wybranych miejscach, usytuowanych względem siebie co  $120^\circ$ . Objętość odparowanego ablacyjnie materiału wyliczano mnożąc uśrednioną wielkość pola przekroju krateru przez jego obwód. Pomiary średnic kraterów wykonywano z użyciem uniwersalnego mikroskopu pomiarowego IMC 150x50,B. Zmiany morfologiczne wytworzone na powierzchni kraterów w efekcie procesów ablacji analizowano z wykorzystaniem elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM).

## **2. Wyniki badań i ich dyskusja**

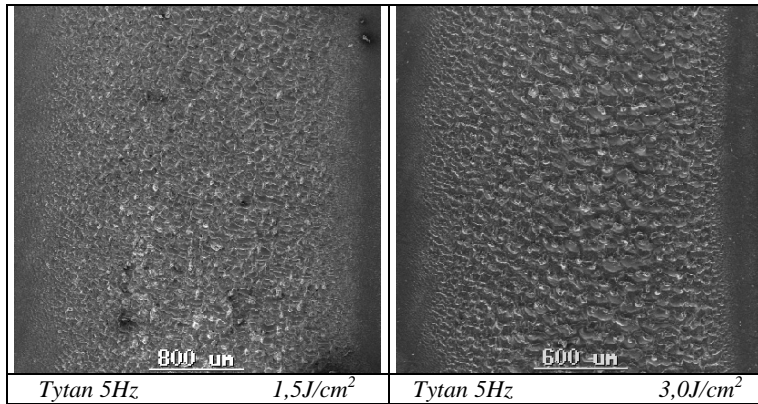
Wpływ gęstości energii impulsowej wiązki laserowej na wydajność procesu ablacji tytanu podczas naświetlania tarczy promieniowaniem o częstości repetycji impulsów 5 Hz przedstawiono na rysunku 3.



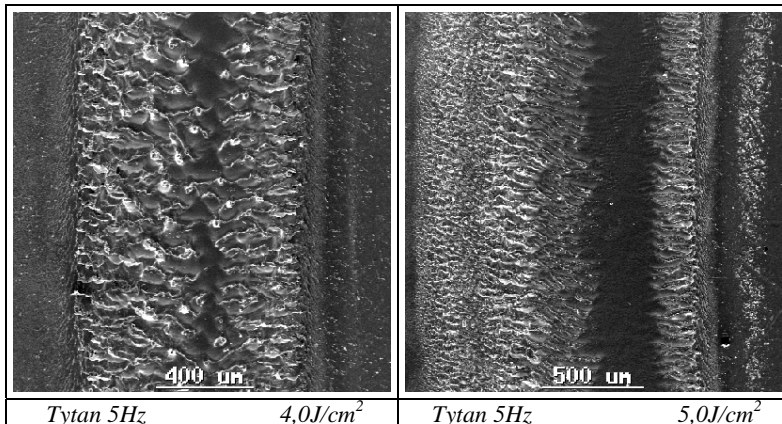
Rys. 3. Zmiana wydajności procesu ablacji tytanu w funkcji gęstości energii wiązki laserowej

Rezultaty przeprowadzonych badań wyraźnie wskazują, iż zwiększenie gęstości energii wiązki w przedziale  $1,5 \text{ J/cm}^2$ – $4,0 \text{ J/cm}^2$  objawia się szybkim, monotonicznym wzrostem wydajności procesu laserowego odparowywania tytanu. Dalszy wzrost wartości gęstości energii (pow.  $4,0 \text{ J/cm}^2$ ) nie wywołuje istotnych zmian szybkości parowania tego materiału, która stabilizuje się na poziomie ok.  $1,2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{impuls}$ . Taki przebieg zmian wydajności procesu laserowego odparowywania tytanu spowodowany jest specyfiką mechanizmu ablacji fototermicznej materiałów metalicznych, gdzie dynamika procesu odparowywania determinowana jest głównie poprzez mechanizmy termiczne, wywołane wzrostem temperatury na powierzchni tarczy. Głównym parametrem pracy lasera, który wywiera największy wpływ na przebieg procesu nagrzewania powierzchni tarczy, jest gęstość energii promieniowania laserowego docierającego do naświetlanej powierzchni. Parametr ten w korelacji z właściwościami fizycznymi odparowywanego materiału, obejmującymi między innymi jego przewodność cieplną, temperaturę topnienia i zdolności absorpcyjne decyduje o bilansie cieplnym procesu nagrzewania tarczy. W przypadku laserowej ablacji tytanu, który charakteryzuje się stosunkowo niską przewodnością cieplną ( $21,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), wzrost wartości gęstości energii promieniowania wywołuje raptowny wzrost temperatury w cienkiej strefie przypowierzchniowej tarczy. Wzrost ten spowodowany jest bardzo szybkim dopływem energii promieniowania do powierzchni naświetlanego materiału znacznie przekraczającym zdolność naświetlanego materiału do jej oprowadzenia w kierunku rdzenia tarczy [2]. W wyniku wydzielania się na powierzchni tarczy dużych ilości ciepła proces odparowania zaczyna przebiegać z częściowo przetopionych mikroobszarów na jej powierzchni, przy wyraźnie wzrastającym udziale mechanizmu hydrodynamicznego [7]. Po przekroczeniu progowej wartości  $4,0 \text{ J/cm}^2$ , pomimo wzrostu gęstości energii promieniowania, bilans cieplny procesu ablacji tytanu prawdopodobnie stabilizuje się na określonym stałym poziomie, co objawia się stabilizacją szybkości jego

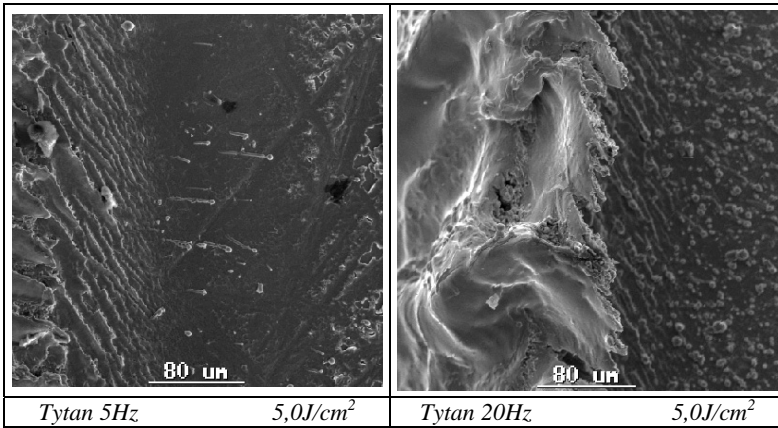
odparowania. Taki przebieg procesu ablacji laserowej tytanu, generowany wzrastającym udziałem mechanizmu hydrodynamicznego, potwierdzają zarejestrowane zmiany morfologiczne na powierzchni tarcz po zakończeniu naświetlania ich promieniowaniem laserowym (rys. 4–6). Na przedstawionych mikrofotografiach widoczny jest poszerzający się ze wzrostem gęstości energii wiązki laserowej obszar przetopionego materiału tarczy, a w strefie brzegowej kraterów obserwowana jest charakterystyczna struktura falista i skryształizowane krople przetopionego tytanu.



Rys. 4. Mikrofotografie zmian topografii powierzchni tarczy tytanowej wywołane wzrostem gęstości energii promieniowania laserowego w zakresie  $1,5\div 3,0\text{ J/cm}^2$

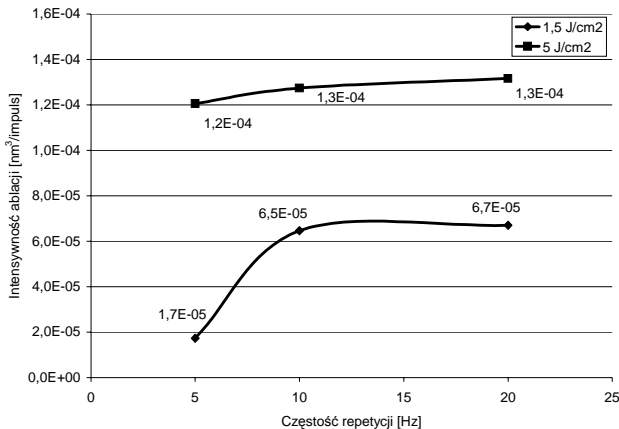


Rys. 5. Mikrofotografie zmian topografii powierzchni tarczy tytanowej wywołane wzrostem gęstości energii promieniowania laserowego w zakresie  $4,0\div 5,0\text{ J/cm}^2$



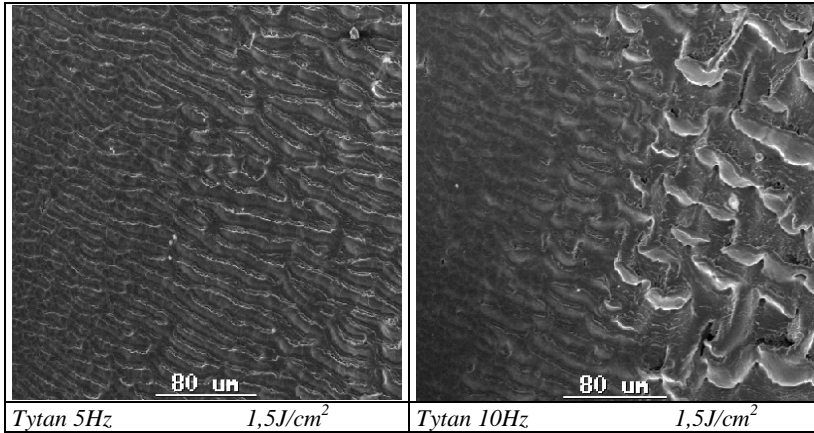
Rys. 6. Mikrofotografie obszarów brzegowych kraterów wytworzonych na powierzchni tarczy tytanowej w wyniku naświetlania wiązką laserową o gęstości energii  $5,0 \text{ J/cm}^2$  i częstotliwości repetycji 5 lub 20 Hz

Wyniki badania oddziaływania częstotliwości repetycji impulsów laserowych na wydajność procesu ablacji tytanu zaprezentowano na rysunku 7. Procesy ablacji przeprowadzono przy zastosowaniu dwóch zróżnicowanych wartości gęstości energii wiązki laserowej:  $1,5 \text{ J/cm}^2$  oraz  $5,0 \text{ J/cm}^2$ . Na podstawie analizy wyników wykonanych badań stwierdzono, że częstość repetycji impulsów w badanym zakresie zmienności  $5 \div 20 \text{ Hz}$  praktycznie nie wpływa na wydajność procesu ablacji tytanu. Wyjątek stanowi jedynie czterokrotny wzrost wydajności ablacji, zarejestrowany przy wzroście częstości repetycji impulsów od 5 Hz do 10 Hz, dla procesów ablacji laserowej wykonanych z użyciem wiązki laserowej o niskiej gęstości energii  $1,5 \text{ J/cm}^2$ .



Rys. 7. Wpływ gęstości energii promieniowania laserowego i częstości repetycji impulsów na wydajność laserowej ablacji tytanu

Mikroskopowa analiza topografii powierzchni kraterów wytworzonych na tarczach oddziaływaniem wiązki laserowej przeprowadzona po zakończeniu procesu ablacji (rys. 8) wskazuje jednak, iż i w tym przypadku przyczyną tak znacznego wzrostu wydajności może być nieoczekiwany i trudny do wyjaśnienia na tym etapie badań, wyraźny wzrost temperatury na powierzchni tarczy.



Rys. 8. Mikrofotografie zmiany morfologii powierzchni tytanu wywołane wzrostem częstości repetycji impulsów promieniowania laserowego

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania niskociśnieniowego procesu laserowej ablacji tytanu wykazały, że gęstość energii promieniowania w impulsie jest dominującym parametrem pracy lasera, który wyraźnie wpływa na wydajność procesu odparowywania tego materiału. Parametr ten, poprzez silne oddziaływanie na temperaturę powierzchni odparowywanej tarczy, determinuje mechanizm oraz dynamikę procesu laserowej ablacji.

Rezultaty wykonanych badań wskazują również, iż wzrost wartości częstości repetycji impulsów promieniowania laserowego w badanym zakresie zmienności (5–20 Hz) praktycznie nie oddziałuje na szybkość procesu ablacji tego materiału.

Na podstawie analizy wyników wykonanych badań stwierdzono również, że dla uzyskania optymalnej sprawności dla procesu laserowej ablacji tytanu, korzystne jest zastosowanie impulsowej wiązki promieniowania laserowego o gęstości energii w impulsie przekraczającej  $4,0 \text{ J/cm}^2$  oraz częstości repetycji impulsów  $\geq 10 \text{ Hz}$ .



## **Bibliografia**

1. Major B.: Ablacja i osadzanie laserem impulsowym Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2002.
2. Kusiński J.: Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2000.
3. Excimer Laser Technology: laser sources, optics, systems and application, edited by D. Basting published by Lambda Physik AG Göttingen (2000).
4. Illgner C., Schaaf P., Lieb K.P., Queitsch R., Barnikel J.: Material transport during excimer-laser nitriding of iron, Journal of Applied Physics, Vol. 83 (6) (1998) 2913.
5. Boyd I.W.: Thin Film Growth by pulsed Laser Deposition, Ceramics International 22 (1996) 432.
6. Anisimow S.I., Lukyanchuk B.S.: Selected problems of laser ablation theory, Physic Uspekhi. 45 (30) (2002) 307.
7. Zhang X., Chu S.S., Ho J.R., Grigoropoulos C.P.: Excimer laser, ablation of thin gold films on a quartz crystal microbalance at various argon background pressures, Appl. Phys. A 64 (1997) 548.

Recenzent:  
**Jan KUSIŃSKI**

## **Evaluation of the impact of selected parameters of pulsed laser beam on the efficiency of titanium ablation processes**

### **Summary**

On the basis of the studies carried out an influence of basic parameters of laser radiation (energy density, pulse repetition rate) on the efficiency of the ablation process of titanium target was determined. The process efficiency was evaluated by estimation of the evaporated material volume during a single laser radiation pulse. In the course of research most favourable values of the laser fluence and pulse repetition rate for the ablation process of the investigated material were determined.

