



Organizator:  
Politechnika Warszawska  
Instytut Techniki Wytwarzania

Przewodniczący:  
Lucjan Dąbrowski  
ld@meil.pw.edu.pl  
http://snoe.meil.pw.edu.pl

Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych

**SNOE**

Artykuły naukowe z 2014 r.

Patronat naukowy: SEKCJA PODSTAW TECHNOLOGII KOMITETU BUDOWY MASZYN POLSKIEJ AKADEMII NAUK

## Precyzyjna obróbka laserowa materiałów trudnoobrabialnych

### Precise laser machining of difficult to cut materials

DOMINIK WYSZYŃSKI

W artykule opisano zastosowanie lasera do precyzyjnej obróbki laserowej materiałów trudnoobrabialnych takich jak diament czy  $ZrO_2$ . Przedstawiono przykłady elementów wykonanych z monokrystalicznego diamentu oraz wyniki badań dotyczących symulacji wycinania laserowego w  $ZrO_2$ .

**SŁOWA KLUCZOWE:** precyzyjna obróbka laserowa, materiały trudnoobrabialne.

*The paper presents application of laser for precise machining of difficult to cut materials like diamond and  $ZrO_2$ . Examples of parts made of monocrystalline diamond has been presented as well as results of laser cutting modelling of  $ZrO_2$*

**KEYWORDS:** precise laser machining, difficult to cut materials.

#### Wstęp.

Konwencjonalne kształtowanie materiałów trudnoobrabialnych jest procesem skomplikowanym, czasochłonnym i wymagającym ogromnych nakładów. Do grupy tej zalicza się metale i ich stopy, (stale nierdzewne, Ti i jego stopy, stopy Ni), ceramikę specjalną,  $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$  i inne, diament, oraz kompozyty (PCD, WC+PCD).

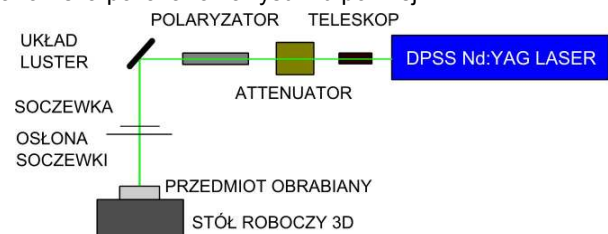
Diament jest jednym z najcenniejszych i najtwardszym spośród dostępnych materiałów, a jego tradycyjna obróbka kosztowna i ograniczona. Postęp w technologii wytwarzania syntetycznych diamentów spowodował, że jest on coraz bardziej osiągalny z ekonomicznego punktu widzenia. Przemysł jubilerski jednak wciąż posługuje się diamentem naturalnym, którego obróbka jest sztuką samą w sobie. Technologie laserowe dają ogromne korzyści wynikające z oszczędności czasu i materiału podczas jego obróbki, dzięki czemu zaczynają wyprzedzać tradycyjne ściernicze metody obróbki diamentu. Doskonałe właściwości optyczne diamentu, takie jak wysoki współczynnik załamania światła i odbicia oraz transparentność w szerokim zakresie długości fal elek-

tromagnetycznych czynią go atrakcyjnym dla przemysłu jubilerskiego ale i optycznego. Inne właściwości fizyczne diamentu, takie jak doskonała przewodność cieplna, twardość, sztywność i szeroko pojęta wytrzymałość sprawiają, że znajduje on ogromne zainteresowanie ze strony przemysłu i medycyny. Dzięki współczesnej technologii w inżynierii materiałowej, diament syntetyczny stał się idealnym i stosunkowo tanim materiałem znajdującym zastosowanie w wielu dziedzinach. Począwszy od elementów optycznych, narzędzi chirurgicznych, kowadeł do badań geofizycznych, noży do ekranów LCD, noży skrawających, na radiatorach ciepła skończywszy.

#### Precyzyjna obróbka laserowa diamentu

Diament syntetyczny występuje w formie monokrystalicznej, polikrystalicznej jak również w postaci kompozytów. Każda z form występowania diamentu syntetycznego różni się właściwościami fizycznymi, niemniej jednak wciąż pozostaje jednym najbardziej opornym na obróbkę wśród materiałów [1].

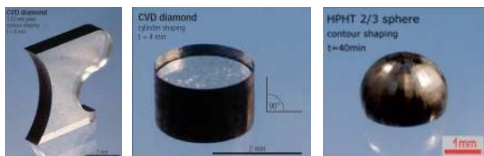
Do precyzyjnej obróbki tego typu materiałów należy zastosować system laserowy wyposażony w specjalistyczne oprzyrządowanie optyczno-mechaniczne. Schemat takiego stanowiska pokazano na rysunku poniżej.



Rys. 1. Schemat stanowiska do precyzyjnej obróbki laserowej.

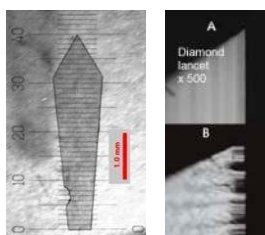
Zasilany diodami laser Nd-YAG o mocy 20W sprzężono z attenuatorem (tłumikiem mocy) umożliwiającym odpowiednie dawkowanie energii lasera w miejsce obróbki. Funkcją polaryzatora jest zapewnienie jednorodnej absorpcji promieniowania przez materiał. Zagadnienia związane z wpływem oddziaływania wiązki laserowej z diamentem zjawisk na dokładność obróbki i jakość uzyskiwanych elementów zostały opisane w [1, 2].

\* dr inż. Dominik Wyszyński ([wyszynski@mech.pk.edu.pl](mailto:wyszynski@mech.pk.edu.pl)), Politechnika Krakowska



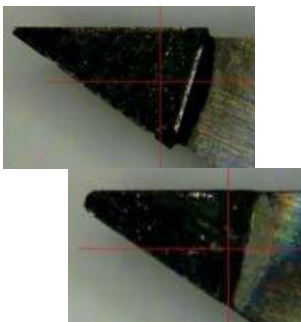
Rys. 2. Przykłady elementów wykonanych z diamentu techniką wycinania laserowego [2].

Na rysunku 2 powyżej zaprezentowano elementy wykonane z monokrystalicznego diamentu naturalnego i uzyskanego metodą CVD. Na szczególną uwagę zasługują jakość powierzchni i krawędzi oraz czas obróbki laserowej. Na rysunku 3 poniżej porównano jakość krawędzi noży używanego w chirurgii oka – a) ostrza diamentowego wykonanego technologią wycinania laserowego oraz b) tradycyjnego ostrza stalowego.



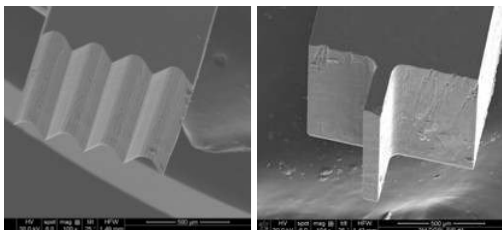
Rys. 3. Fotografia ostrza skalpela wykonanego z monokrystalicznego diamentu (czas obróbki < 5 min) oraz porównanie a) ostrza diamentowego wykonanego technologią wycinania laserowego oraz b) tradycyjnego ostrza stalowego [2].

Wiązka laserowa może również znaleźć zastosowanie w wytwarzaniu ostrzy noży skrawających wykonanych bądź z diamentu bądź kompozytu PCB (ziarna diamentowe połączone kobaltem). Przykład wykonania takiego ostrza przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Fotografia ostrza diamentowego noża skrawającego a) przed i b) po kształtowaniu laserowym [2].

Wiązka laserowa może być również z powodzeniem zastosowana do mikroobróbki, czyli obróbki elementów których jeden z wymiarów charakterystycznych jest mniejszy od 1 milimetra [3]. Przykłady takich elementów wykonanych z diamentu monokrystalicznego przy użyciu wiązki laserowej przedstawiono na rysunku 5 poniżej.



Rys. 5. Fotografie elementów diamentowych o wymiarach poniżej 1mm wykonanych metodą obróbki laserowej [2].

#### ■ Symulacja obróbki laserowej $ZrO_2$

Inną grupę atrakcyjnych z punktu widzenia właściwości fizycznych materiałów konstrukcyjnych stanowią wszelkiego rodzaju materiały ceramiczne. Jednym z nich, zasługującym na szczególną uwagę jest tlenek cyrkonu IV, od niedawna używany w medycynie do wytwarzania implantów i uzupełnień protetycznych. Spośród wszystkich porcelan tlenek cyrkonu cechuje się najwyższą wytrzymałością mechaniczną, a odporność na złamania osiąga wartość do 2000N [5]. Prócz tego jest ogniotrwały (temperatura topnienia  $2850^{\circ}C$ ), moduł Younga podobny do stopów stali nierdzewnej, odporny na korozję w kwaśnym środowisku, posiada bardzo dobre właściwości izolacyjne [6]. Tlenek cyrkonu jest materiałem biogodnym, a jego barwa jest biała, dzięki czemu znalazł tak szerokie zastosowanie w stomatologii (uzupełnienia protetyczne) i ortopedii (implant stawu biodrowego) [5, 6].

Przy tak wielu zaletach tlenek cyrkonu posiada bardzo poważne wady, jest materiałem kruchym i twardym, a więc trudnoobrabialnym, dlatego jego obróbka tradycyjnymi metodami jest bardzo ciężka i pracochłonna. Idealnym rozwiązaniem jest zastosowanie niekonwencjonalnych metod kształtowania materiałów. Do takich metod zalicza się między innymi obróbkę laserową. Precyzyjne kształtowanie tlenku cyrkonu za pomocą lasera może skrócić czas i koszty produkcji elementów w różnych zastosowaniach przemysłowych i medycznych.

#### ■ Model matematyczny

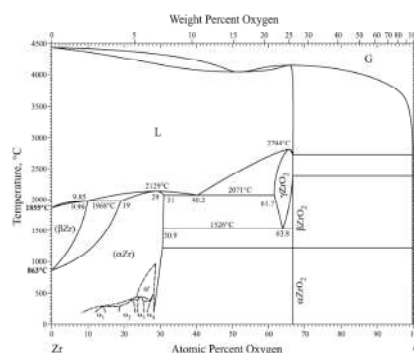
W celu poznania wstępnych parametrów obróbki laserowej tlenku cyrkonu stworzony został model matematyczny uwzględniający rozkład temperatury w przedmiocie obrabianym [4]. Model ten ma za zadanie określić rozkład temperatury w materiale podczas ogrzewania powierzchni. Podczas modelowania przyjęto następujące warunki:

- brak wymiany ciepła przez promieniowanie,
- obramiany element ma nieograniczoną wielkość i nie jest zamocowany na stole roboczym (dzięki temu ciepło nie może być przeniesione do stołu).

W tabeli 1 przedstawiono dane materiału  $ZrO_2$  używane do obliczeń:

Tabela 1. Dane materiału –  $ZrO_2$

1.	Ciepło właściwe w temperaturze $20^{\circ}C$	400 J/(kg/K)
2.	Przewodność cieplna	2,5 W/(m <sup>2</sup> K)
3.	Gęstość	5,68 g/cm <sup>3</sup>
4.	Temperatura topnienia	2850 <sup>o</sup> C
5.	Współczynnik załamania światła dla długości fali 532nm	n=1,872
6.	Współczynnik odbicia wiązki laserowej	R=0,3



Rys. 6. Diagram równowagi fazowej Zr – O [7].

Z diagramu równowagi fazowej przedstawionego powyżej wynika, że dla temperatury  $T_i=2850^\circ\text{C}$ , powinno dojść do przemiany z fazy stałej do ciekłej, w przy temperaturze powyżej  $4300^\circ\text{C}$  materiał powinien odparować.

W przypadku cięcia laserowego na dużych odległościach (w porównaniu do wielkości średnicy wiązki lasera) dane dotyczące rozkładu natężenia energii w wiązce nie są znaczące. W przedstawionym przypadku wykonano symulację obróbki laserowej mikroelementu, dlatego należało przyjąć, że rozkład temperatury wiązki jest zgodny z rozkładem Gaussa.

Analizę przeprowadzono dla przedmiotu o rozmiarach Rozkład temperatury obliczono według poniższego wzoru 3 [8].

$$T(x, y, z, t) - T_{-\infty} = \int_0^t \frac{2P_L}{\rho c} \times \frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa(t-t')}} \cdot \frac{1}{4\pi\kappa(t-t') + \frac{w_0^2}{2}} \times \exp\left(-\frac{(x-v(t-t'))^2 + y^2}{4\pi\kappa(t-t') + \frac{w_0^2}{2}}\right) \times \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa(t-t')}\right) dt'$$

gdzie:  $P_L=R \cdot P$  to moc lasera po uwzględnieniu współczynnika odbicia,  $w_0$  – średnica skupionej wiązki lasera,  $\rho$  – gęstość materiału obrabianego,  $c$  - ciepło właściwe materiału obrabianego,  $\kappa$  – jego przewodność temperaturowa.

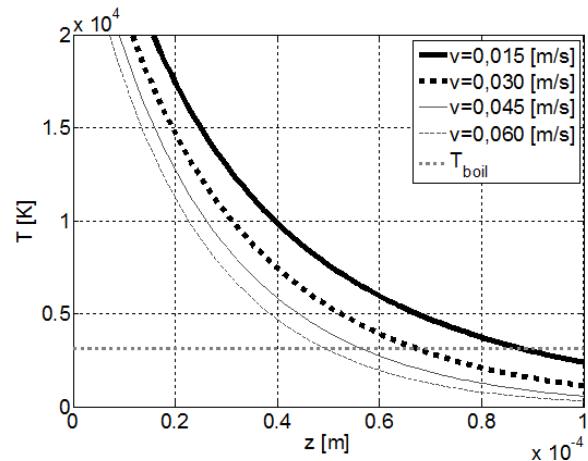
W tabeli 2 przedstawiono charakterystykę wiązki laserowej niezbędną do wykonania symulacji.

Tabela 2. Parametry lasera używane do obliczeń matematycznych

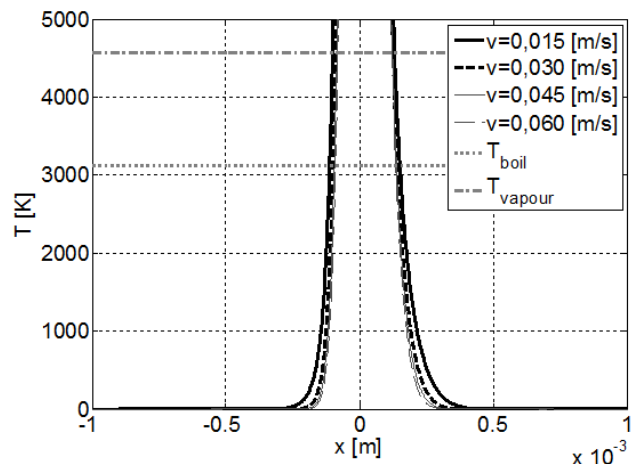
1.	Typ lasera	DPSS Nd: YAG
2.	Mod lasera	TEM00
3.	Długość fali	532 nm
4.	Średnica skupionej wiązki	8,7 $\mu\text{m}$
5.	Ogniskowa soczewki	77 mm
6.	Moc	13 W
7.	Częstotliwość impulsów	9 kHz
8.	Czas trwania impulsu	80 ns
9.	Energia impulsu	2,1 mJ
11.	M2@9kHz	<1,3
12.	Polaryzacja	liniowa

### Wyniki modelowania

Przy użyciu programu Matlab uzyskano wykresy rozkładu temperatury wewnątrz materiału (wzdłuż osi  $z$  i  $x$ ) dla procesu laserowego cięcia tlenku cyrkonu w zależności od różnych zadanych prędkości cięcia. Wykresy te przedstawiono poniżej rysunkach 7 i 8.



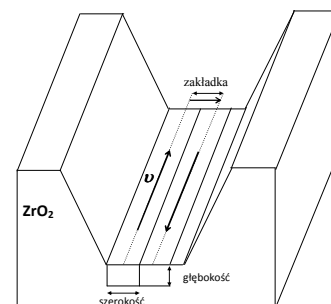
Rys. 7. Wykres zależności głębokości cięcia od prędkości stołu roboczego. Pojedyncze przejście wiązki lasera.



Rys. 8. Wykres zależności szerokości cięcia od prędkości stołu roboczego. Pojedyncze przejście wiązki lasera.

### Wnioski z modelowania

Z wykresów można odczytać, że prędkość cięcia ma znaczący wpływ na temperaturę materiału. Wraz ze wzrostem prędkości maleje temperatura w obszarze obróbki. W celu uzyskania optymalnego tempa procesu, należy odpowiednio dobrać prędkość obróbki. Głębokość uzyskanych rowków, w zależności od prędkości posuwu stołu roboczego, zmieniała się od 50 do 90  $\mu\text{m}$ , natomiast szerokość szczeliny zmieniała się oscylowała w okolicach 350  $\mu\text{m}$ . Oznacza to, że aby przeciąć materiał o grubości kilku milimetrów, należy zastosować kinematykę frezowania uwzględniającą szerokość poszczególnych rowków (wraz z zakładką) oraz głębokość. Schemat przedstawiający ideę takiej pracy przedstawiono na rysunku 9 poniżej



Rys. 9. Schemat cięcia laserowego w kinematyce frezowania.

## Wnioski

Precyzyjna obróbka laserowa materiałów trudnoskrawalnych jest zagadnieniem złożonym i wymagającym zaangażowania szerokiej wiedzy i doświadczenia z zakresu nauki o materiałach jak i zjawiskach fizycznych występujących w obrębie miejsca interakcji wiązki laserowej z materiałem obrabianym. Prawidłowy dobór źródła laserowego oraz wyposażenie systemu w odpowiednie oprzyrządowanie pozwala na obróbkę materiałów w sposób efektywny, ekonomiczny a zarazem spełniający wymagania stawiane obróbce materiałów w skali mikro.

*Autor pragnie podziękować firmie Bettonville Ltd za umożliwienie badań nad laserową obróbką precyzyjną diamentu.*

## LITERATURA

1. Wyszyński D., Uwzględnienie strefy oddziaływania wiązki laserowej w obróbce diamentu. Inżynieria Maszyn, t. 12, nr 4, s. 87-93, 2009
2. Wyszyński D., Gawlik J., Janusz M. Application of DPSS Nd:YAG (532nm) laser for precise machining of diamond, Innovations in management and production engineering, 162 – 172, 2013
3. Masuzawa T., State of art of micromachining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 49, Issue 2, Pages 473–488, 2000
4. Wyszyński D., Janusz M. Modelowanie matematyczne precyzyjnego cięcia laserem ZrO<sub>2</sub>. XLI Szkoła Inżynierii Materiałowej, s. 359-364, 2013
5. Lasek K., Okoński P., Mierzwińska-Nastalska E.: Tlenek cyrkonu – właściwości fizyczne i zastosowanie kliniczne, Protetyka Stomatologiczna, LIX,6, s. 415 – 422, 2009
6. Liu X., Huang A., Ding Ch., Chu P.: Bioactive and cytocompatibility of zirconia (ZrO<sub>2</sub>) films fabricated by cathodic arc deposition, Biomaterials, p. 3904-3911, 2006
7. H. Okamoto, O – Zr (Oxygen - Zirconium), Journal of Phase Equilibria and Diffusion, pp. 498, Vol 28 no 5 2007.
8. Poprawe R.: Tailored Light 2 - Laser Application Technology, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2011.