



PRECYZYJNE CIĘCIE LASEREM TLENKU CYRKONU IV (ZrO_2)

Agata Nowak, Dominik Wyszyński

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska

Autor korespondencyjny:

Agata Nowak

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska

Al. Jana Pawła II 7, 31-864 Kraków, Polska

telefon: +48 790 877 756

e-mail: nowak.agata.an@gmail.com

SŁOWA KLUCZOWE

obróbka laserowa, LBM, laser Nd:YAG, tlenek cyrkonu IV, precyzyjna obróbka laserowa, materiały trudnoobrabialne

PRECISION LASER CUTTING OF ZIRCONIUM DIOXIDE

KEYWORDS

precision laser machining, difficult to machine materials, ZrO_2

ABSTRACT

Precision laser machining of a difficult to machine materials is a complex issue and requires the involvement of the wide knowledge and experience in the field of science materials and physical phenomena occurring in the within the interaction site of the laser beam with the material workpiece. Correct selection of the laser source and equipment system with appropriate instrumentation allows the processing of materials in an efficient and cost-effective way and also allows to fulfill the requirements for treatment of the materials on a micro scale. From the analysis of the results it can be concluded that the edges resulting from laser treatment carried grooves are sharp (samples 9, 10, 11), which predisposes the type of processing to perform the blades of the cutting tools. Depth obtained in these tests grooves (single-pass laser beam) may indicate a high performance cutting process of cutting teeth. In view of the aforementioned facts, it is expected to shorten the preparation time of the cutting blade, thereby reducing production costs. As a result, it is possible to increase the competitiveness of companies doing good quality tools made lower than the standard cost-effectively, and thus this type of solution has the potential of development for native Polish enterprises, so that they offer can become complementary to the tycoons on the Polish market aspect of the production of custom, dedicated ie. "tailor-made" tools.

Based on the study it can be concluded that the use of DPSS Nd: YAG laser ($\lambda = 532$ nm), with appropriate selection of process parameters for precise and efficient laser shaping of difficult to cut materials, such as described in the work – zirconium dioxide.

Further studies will aim to establish guidelines for the planning process precision laser cutting of other materials from the group of difficult ones, such as PCD, diamond, Al_2O_3 (sapphire) or c-BN. This is particularly important from the point of view of the precise shape of cutting tools used widely in the aerospace, automotive and carpentry.

1. Wstęp

Obecnie laser jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych urządzeń, które znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach naukowych. Światło lasera może być stosowane między innymi w chirurgii okulistycznej, geodezji i pomiarach sejsmicznych oraz spawaniu elementów w skali mikro. Światło lasera odgrywa również ważną rolę w przetwarzaniu twardych, kruchych i trudnych do obróbki materiałów [10].

Szybki rozwój w różnych dziedzinach techniki, w tym inżynierii biomedycznej, determinuje dynamiczny postęp w technologii produkcji. Umożliwia obróbkę nowoczesnych materiałów takich jak węgliki spiekane, cermetale, gęste i porowate bioceramiki czy sztuczne diamenty. Laser ma duży wpływ na rozwój już istniejących i tworzenie nowych zaawansowanych metod obróbki materiału [1].

Ze względu na wiele korzyści związanych z możliwością kształtowania twardych i kruchych materiałów

obróbka niekonwencjonalna kształtuje się jako dziedzina masowego zastosowania. Ma to ogromne znaczenie dla rozwoju produkcji z wykorzystaniem takich metod jak: ich obróbka elektrochemiczna, obróbka ultradźwiękowa lub obróbka laserowa, która jest coraz częściej stosowana ze względu na niezwykle i unikalne właściwości wiązki laserowej [8]. Właściwości te umożliwiając wykonanie precyzyjnych operacji na trudnych do cięcia materiałach przy zachowaniu niskich kosztów oraz małej czasochłonności. Realizacja tych zadań jest silnie związana z wiedzą na temat właściwości promieniowania laserowego oraz wiedzą o materiałach, dotyczącą ich charakterystyki fizycznej i chemicznej [1].

Obróbka z wykorzystaniem lasera jest jedną z alternatyw dla tradycyjnych sposobów usuwania materiału, takich jak frezowanie, cięcie lub spawanie w produkcji części maszyn i mikro części. Jest ona stosowana dla szerokiego zakresu materiałów – metali, ceramiki lub materiałów kompozytowych.

Obróbka laserowa (ang. LBM – *Laser Beam Machining*) jest jednym z najczęściej używanych procesów opartych na energii cieplnej. Jest to bezdotykowy rodzaj obróbki, którą można stosować do szerokiego zakresu materiałów (od kruchej ceramiki, przez miękkie materiały np. tkaniny, drewno, tworzywa sztuczne, a skończywszy na materiałach trudnoobrabialnych jak diamenty i metale twarde). Wiązka laserowa jest skoncentrowana do topienia i odparowywania niepożądanego materiału z materiału rodzimego. LBM nadaje się do cięcia profili geometrycznie skomplikowanych i umożliwia wykonywanie miniaturowych otworów [5].

Najczęściej używanymi w przemyśle laserami są CO₂ oraz Nd: YAG. W ostatnich latach, badacze wykorzystywali wiele sposobów na poprawę wydajności procesów LBM poprzez analizę różnych czynników, które wpływają na cechy jakościowe procesu.

Badania eksperymentalne i teoretyczne pokazują, że wydajność procesu może być znacznie poprawiona poprzez odpowiedni dobór parametrów lasera, jak i parametrów materiałowych oraz eksploatacyjnych.

Promieniowanie lasera ma wiele unikalnych właściwości, np. takie jak wysokie natężenie strumienia energii elektromagnetycznej, jest monochromatyczne i wykazuje wysoką spójność przestrzenną i czasową. Światło lasera może być formowane w bardzo wąskie wiązki, dzięki czemu może się koncentrować na niewielkich obszarach. Zaletą stosowania lasera będącego źródłem energii cieplnej do przetwarzania materiału jest możliwość efektywnej kontroli głębokości wykonywanych cięć oraz ilości przekazywanej energii. Obróbka laserowa jest odpowiednia dla mikroobróbki ze względu na możliwość wykonywania skomplikowanych geometrycznie otworów w skali mikro [10].

2. Precyzyjne cięcie laserowe

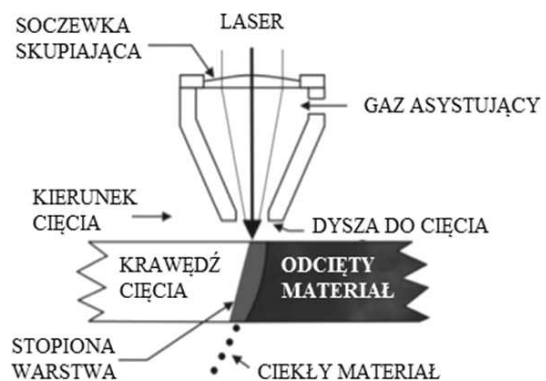
Poznanie możliwości i ograniczeń obróbki laserowej wymaga znajomości fizycznych procesów zachodzących w trakcie oddziaływania wiązki laserowej z materiałami. Podczas zderzenia wiązki lasera z powierzchnią materiału zachodzą różne zjawiska, takie jak odbicie, załamanie, rozproszenie, absorpcja i transmisja [2]. Obróbka zależy zarówno od parametrów lasera, jak i od cech i właściwości materiałów. Parametry lasera to natężenie, długość fali, kąt padania, polaryzacja, czas impulsu, natomiast przykładowe parametry materiałów to chłonność, przewodność cieplna, ciepło właściwe, gęstość, ciepło utajone.

Stopiony materiał jest usuwany ze strefy cięcia przez strumień gazu procesowego z dyszy. W ten sposób można szybko i precyzyjnie obrabiać różne materiały, natomiast zastosowanie odpowiedniego układu manipulacji głowicy laserowej skutkuje możliwością wycinania skomplikowanych kształtów [3].

Zastosowanie wysokowydajnych laserów, jak DPSS Nd: YAG ($\lambda = 532$ nm), skutkuje wysoką wydajnością i bardzo dobrą jakością krawędzi cięcia oraz powierzch-

ni w stosunku do poziomu nakładów inwestycyjnych i kosztów utrzymania.

Mechanizm usuwania materiału podczas LBM obejmuje takie etapy jak: (I) stopienie, (II) odparowanie oraz (III) degradację (wiązania są uszkodzane, co powoduje rozkład materiału). Kiedy wysokoenergetyczna wiązka lasera skupia się na powierzchni roboczej, energia cieplna jest pochłaniana, ogrzewa się i materiał ulega roztopieniu, odparowaniu albo następują zmiany stanu, które mogą być łatwo usunięte przez podawany przez dyszę strumień gazu pod wysokim ciśnieniem (co przyspiesza obróbkę materiału i wyrzuca go ze strefy obróbki, unikając działania powstającej w strefie obróbki plazmy). Schemat obróbki laserowej przedstawiono poniżej (rys. 1) [5].



Rys. 1. Schemat obróbki laserowej

3. Cięcie tlenku cyrkonu IV laserem Nd:YAG o $\lambda = 532$ nm

Tlenek cyrkonu to materiał polimorficzny, ceramiczny, bez dodatku szkła. Kryształy tlenku cyrkonu tworzą drobne ziarna wielkości 0,2–0,5 μm . Tlenek cyrkonu cechuje wysoka wytrzymałość i odporność na złamanie. Wynika to ze zjawiska transformacji wzmacniającej, jakie obserwuje się w mikrostrukturze materiału. Zjawisko to polega na miejscowym wzroście objętości o 3–5%, towarzyszącym przemianie formy tetragonalnej w monokliniczną pod wpływem rozchodzącego się pęknięcia. Znacznie ogranicza to możliwość rozprzestrzeniania się mikropęknięć w strukturze cyrkonu i ze względu na to jest on często określany mianem materiału „samonaprawiającego się” [4].

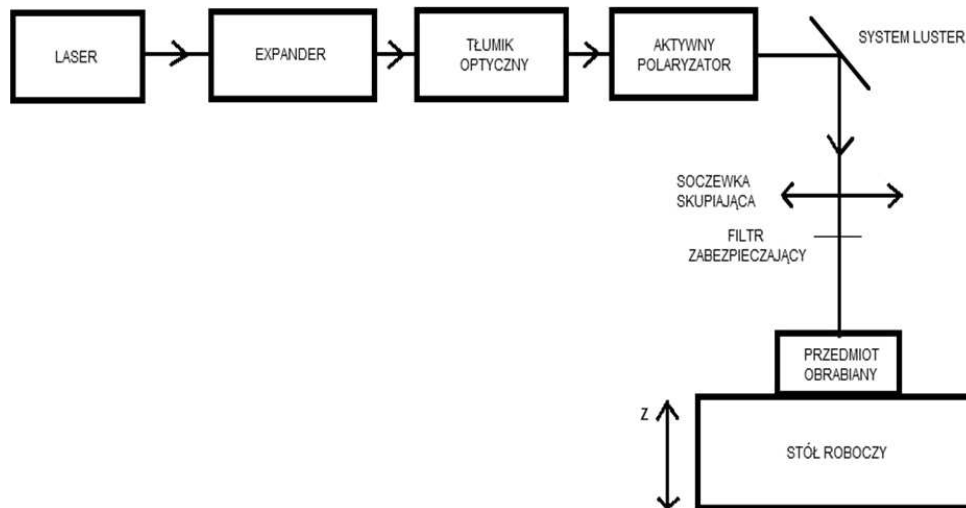
W formie podstawowej cyrkon jest nieprzezierny, w kolorze mlecznobiałym. Jest to materiał stosunkowo lekki w porównaniu do metali szlachetnych takich jak złoto czy platyna. Posiada niski współczynnik porowatości, tzn. jego mikrostruktura jest jednolita, praktycznie bez pustych przestrzeni, mikroszczelin czy rys.

W tabeli nr 1 przedstawiono dane materiału ZrO₂.

W zaprojektowanym stanowisku do obróbki laserowej umieszczono odpowiednie silniki liniowe, które pomagają w utrzymaniu odpowiednich parametrów obróbki (prędkości, przyspieszenia, dokładności posuwu). Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 2. [6].

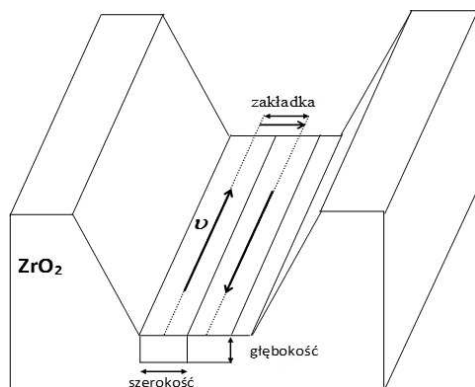
Tab. 1. Dane materiału ZrO₂

| Nr | Nazwa | Jednostka |
|----|---|------------------------|
| 1 | Ciepło właściwe w temperaturze 20°C | 400 J/(kg·K) |
| 2 | Przewodność cieplna | 2,5 W/(m·K) |
| 3 | Gęstość | 5,68 g/cm ³ |
| 4 | Temperatura topnienia | 2850°C |
| 5 | Współczynnik załamania światła dla długości fali 532 nm | $n = 1,872$ |
| 6 | Współczynnik odbicia wiązki laserowej | $R = 0,3$ |



Rys. 2. Stanowisko do obróbki laserowej [7]

Prędkość cięcia laserem ma znaczący wpływ na tempo przekazywania energii pola elektromagnetycznego do materiału, a tym samym na jego temperaturę. Wraz ze wzrostem prędkości maleje temperatura w obszarze obróbki. W celu uzyskania optymalnego tempa procesu, należy odpowiednio dobrać prędkość obróbki, która musi być stała. Głębokość uzyskanych rowków, w zależności od prędkości posuwu stołu roboczego, zmieniała się w symulacji prowadzonych w ramach badań opisanych w [7] od 50 do 90 μm , natomiast szerokość szczeliny oscylowała w okolicach 350 μm . 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 3.



Rys. 3. Schemat cięcia laserowego

W tabeli 2 przedstawione zostały parametry lasera Nd: YAG wykorzystywanego do badań.

Tab. 2. Parametry lasera Nd:YAG

| Nr | Parametr | |
|-----|------------------------------|-------------------|
| 1. | Typ lasera | DPSS Nd: YAG |
| 2. | Mod lasera | TEM00 |
| 3. | Długość fali | 532 nm |
| 4. | Średnica skupionej wiązki | 8,7 μm |
| 5. | Ogniskowa soczewki | 77 mm |
| 6. | Moc @ 9 kHz | 18 W |
| 7. | Częstotliwość impulsów | zakres 5–15 kHz |
| 8. | Czas trwania impulsu @ 9 kHz | 80 ns |
| 9. | Energia impulsu | 2,1 mJ |
| 10. | h_{TAZ} | 150 μm |
| 11. | M^2 @ 9 kHz | < 1,3 |
| 12. | Polaryzacja | liniowa |

W oparciu o wyniki modelowania matematycznego i wykonanych symulacji, przeprowadzone zostały próby polegające na wykonaniu w próbce w próbce ZrO₂ rowków na stanowisku do obróbki laserowej [7]. Próby przeprowadzono dla zamieszczonych w tabeli 3 parametrów.

Rowki zmierzono na mikroskopie cyfrowym VHX 1000E firmy KEYENCE umożliwiającym obserwację powierzchni, pod różnymi kątami do obiektu. Umożliwia to uzyskiwanie obrazów o wysokiej głębi ostrości oraz tworzenie i przeprowadzanie analiz obrazów 2D i 3D [9].

Tab. 3. Parametry obróbki laserowej dla wykonywania rowków w tlenku cyrkonu (kolejność odwrotna w stosunku do obrazu 2D i 3D)

| Nr | v [mm/s] | f [kHz] | h |
|----|----------|---------|--------|
| 1 | 10 | 5 | 243,67 |
| 2 | 50 | 5 | 332,83 |
| 3 | 10 | 13 | 302,01 |
| 4 | 50 | 13 | 117,48 |
| 5 | 10 | 9 | 306,54 |
| 6 | 50 | 9 | 202,35 |
| 7 | 30 | 5 | 258,07 |
| 8 | 30 | 13 | 176,21 |
| 9 | 30 | 9 | 249,88 |
| 10 | 30 | 9 | 250,9 |
| 11 | 30 | 9 | 254,54 |

Pomiary powierzchni zostały przeprowadzone w Państwowym Instytucie Badawczym w Radomiu. W wyniku pomiarów uzyskano następujące dane: obrazy 2D powierzchni, obrazy 3D, wartości parametrów powierzchni i głębokości wyciętych laserem rowków. Do analizy struktury geometrycznej powierzchni służy oprogramowanie TalyMap Gold, które umożliwia uzyskanie wyników analiz parametrów 2D oraz 3D. Po zakończeniu pomiaru, dane zostają przesłane do aplikacji TalyMap Gold, umożliwiającej przetwarzanie danych pomiarowych.

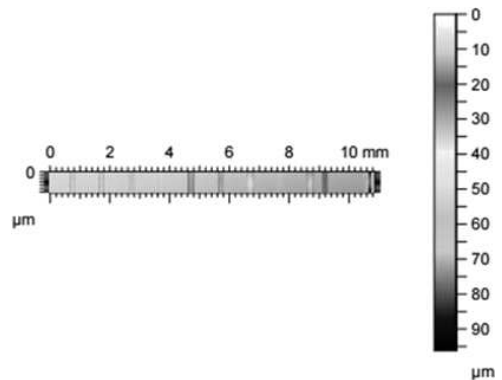
Na rysunku 4. przedstawiono wyniki 2D.

- Dla próby 1 przy prędkości 10 mm/s oraz częstotliwości 5 kHz zmierzony został głęboki rowek.

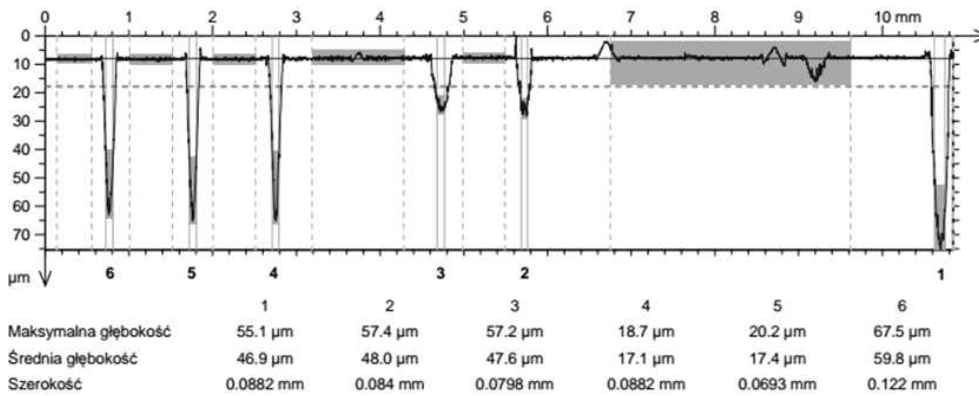
- Dla prób 6 i 7, czyli prędkości 30 mm/s i częstotliwości 5 kHz oraz prędkości 50 mm/s i częstotliwości 9 kHz powstały krótkie rowki,
- Dla prób 9, 10, 11, czyli prędkości 30 mm/s oraz częstotliwości 9 kHz zmierzone zostały bardzo głębokie rowki,
- Dla prób 2, 3, 4, 5 oraz 8 mikroskop nie wykazał głębokości wyciętych w próbce tlenku cyrkonu rowków.
- Dla różnych częstotliwości zmienia się moc, a co za tym idzie ilość zdeponowanej (zaabsorbowanej) ilości energii.

Próby wykonano dla polaryzacji prostopadłej i równoległej do kierunku cięcia. Ma to wpływ na wydajność procesu i jakość krawędzi.

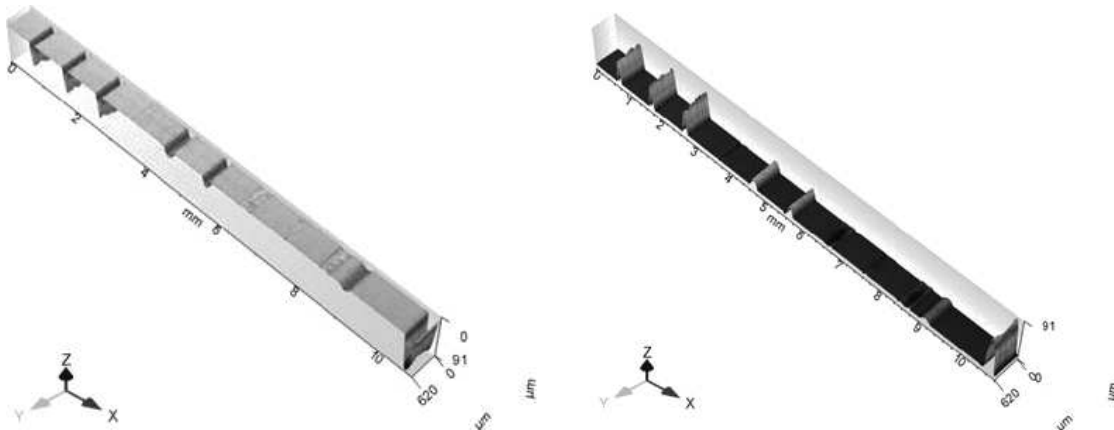
Rysunek 6. przedstawia wyniki 3D.



Rys. 4. Obraz 2D próbki z tlenku cyrkonu



Rys. 5. Wynik pomiarów rowków mikroskopem cyfrowym



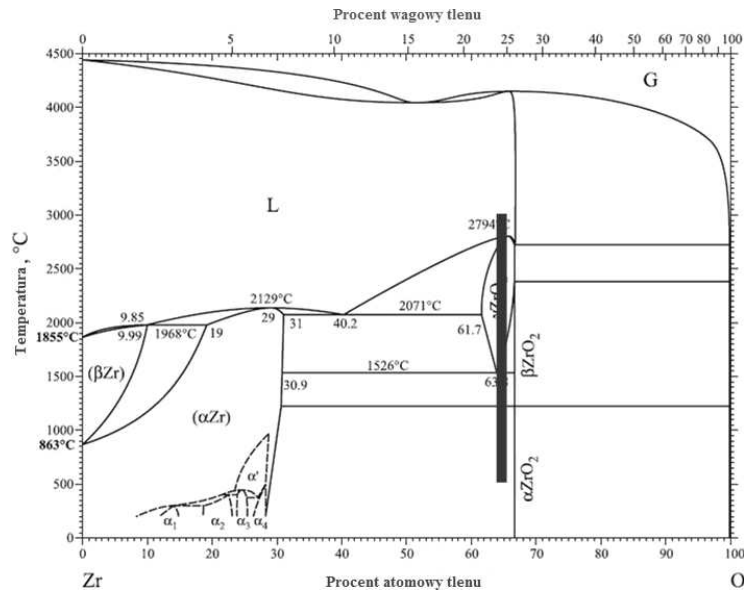
Rys. 6. Obrazy 3D rowków w próbce tlenku cyrkonu (od góry i od dołu)

Patrząc na wyniki pomiaru 3D można wnioskować, że głębokość poszczególnych rowków jest wartością statystyczną (średnią, która zależy od miejsca pomiaru). W związku z tym, wartość ta obciążona jest błędem statystycznym (odchyleniem standardowym).

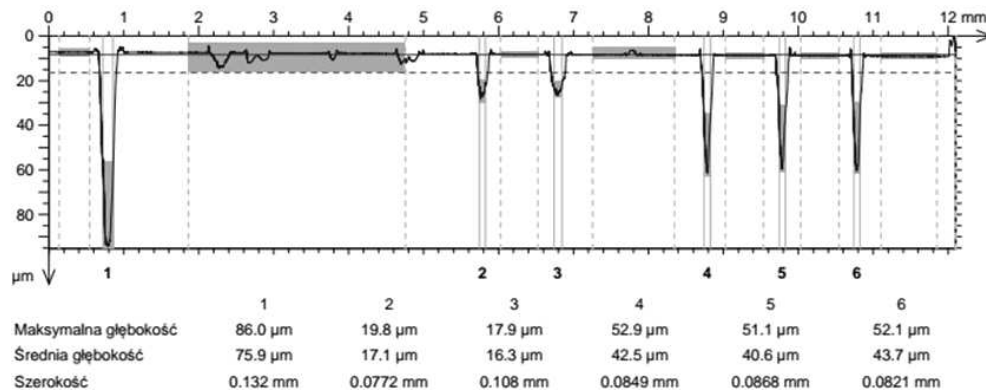
To, że w próbach nr 2, 3, 4, 5 oraz 9 mikroskop nie wykazał żadnej głębokości nie oznacza, że nie powstały tam rowki, a wskazuje na mankamenty metody pomiarowej. W tym celu zostały wykonane komplementarne badania przy wykorzystaniu profilometra styko-

wego. Te jednak także nie wykazały istotnych zmian. O interakcji wiązki laserowej w tych obszarach świadczą zmiany koloru na powierzchni próbki. Wynikać one mogą z przemian fazowych zachodzących w materiale (rys. 7).

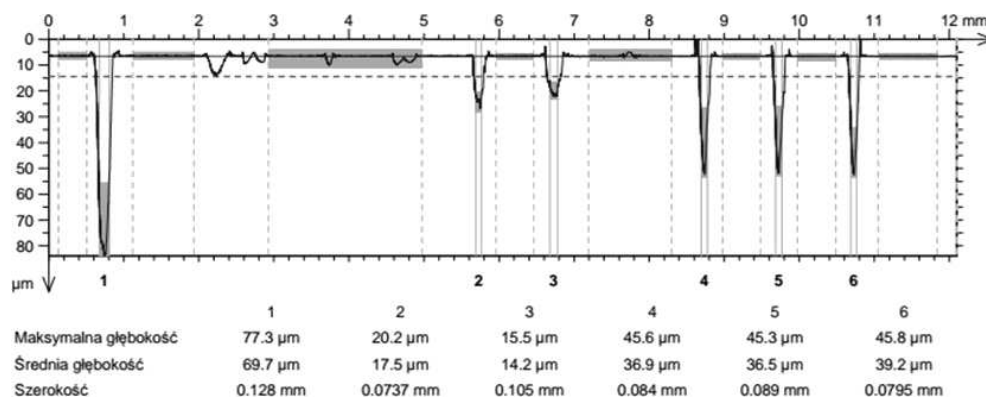
Ponieważ jak wcześniej wspomniano głębokość rowka zależy od miejsca pomiaru, pomiary na profilometrze zostały przeprowadzone trzykrotnie (w innym miejscu) dla każdego z rowków. Wyniki zostały przedstawione poniżej (rys. 8–10).



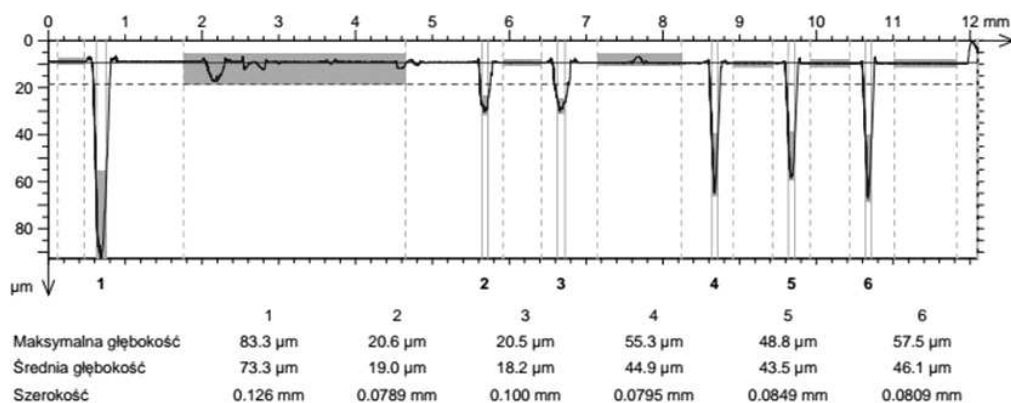
Rys. 7. Diagram równowagi fazowej O-Zr



Rys. 8. Wyniki pomiarów – profilometr stykowy I



Rys. 9. Wyniki pomiarów – profilometr stykowy II



Rys. 10. Wyniki pomiarów – profilometr stykowy III

Tab. 4. Wartości średnie oraz odchylenia standardowe dot. głębokości rowków – pomiary profilometrem

| Nr | Nr rowka z badań bezstykowych | ws – wartość średnia głębokości – pomiar stykowy [µm] | odchylenie standardowe [µm] | wb – głębokość rowka – pomiar bezstykowy [µm] | Różnica: ws-wb [µm] | Szerokość szczeliny [mm] |
|----|-------------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------|--------------------------|
| 1 | 1 | 72,97 | 2,54 | 59,80 | 13,17 | 0,1287 |
| 2 | 6 | 17,87 | 0,82 | 17,40 | 0,47 | 0,0768 |
| 3 | 7 | 16,23 | 1,63 | 17,10 | 0,87 | 0,1037 |
| 4 | 9 | 41,43 | 3,35 | 47,60 | 6,17 | 0,0828 |
| 5 | 10 | 40,20 | 2,87 | 48,00 | 7,80 | 0,0869 |
| 6 | 11 | 43,00 | 2,86 | 46,90 | 3,90 | 0,0808 |
| | | | | | | 0,0933 |

Metoda stykowa również nie umożliwiła przeprowadzenia pomiaru głębokości rowków 2, 3, 4, 5 oraz 8.

Zmierzone zostały rowki 1, 5, 6, 7, 9, 10, 11. Obliczone wartości średnie, odchylenia standardowe oraz różnice pomiędzy pomiarem bezstykowym a stykowym prezentuje tabela 4.

Głębokość uzyskanych rowków, w zależności od prędkości posuwu stołu roboczego, zmieniała się od 16 do 73 µm, natomiast szerokość szczeliny oscylowała w okolicach 0,0933 mm. Aby przeciąć materiał o grubości kilku milimetrów, należy zastosować kinematykę frezowania uwzględniającą szerokość poszczególnych rowków oraz głębokość.

4. Podsumowanie i wnioski

Badania zaplanowano i wykonano w Laboratorium Mikro i Nanotechnologii na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.

Pomiary przeprowadzono dzięki uprzejmości Instytutu Technologii Eksploatacji w Zakładzie Inżynierii Powierzchni w Radomiu.

Z analizy uzyskanych wyników można wywnioskować, że krawędzie uzyskanych w wyniku przeprowadzonej obróbki laserowej rowków są ostre (próby 9, 10, 11), co predysponuje ten rodzaj obróbki do wykonywania ostrzy narzędzi skrawających. Głębokość uzyskanych w tych próbach rowków (po pojedynczym przejściu wiązki laserowej) może wskazywać na wysoką wy-

dajność procesu wycinania ostrzy skrawających. Z uwagi na wymienione powyżej fakty, można się spodziewać znaczącego skrócenia czasu przygotowania ostrza skrawającego, a tym samym zmniejszenia kosztów produkcji. Dzięki temu możliwy jest wzrost konkurencyjności firm, wykonujących dobrej jakości narzędzia wytworzone niższym niż standardowo nakładem kosztów. Ponadto tego typu rozwiązanie ma potencjał rozwojowy dla rodzimych, polskich przedsiębiorstw, tak aby ich oferta mogła stać się komplementarna względem potentatów na polskim rynku w aspekcie wytwarzania niestandardowych, dedykowanych tj. „szytych na miarę” narzędzi.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że użycie lasera DPSS Nd: YAG ($\lambda = 532 \text{ nm}$), przy odpowiednim doborze parametrów obróbki nadaje się do precyzyjnego i wydajnego kształtowania laserowego materiałów trudnoobrabialnych, takich jak opisany w pracy – tlenek cyrkonu.

Dalsze badania będą zmierzały do określenia wytycznych do planowania procesu precyzyjnego wycinania laserowego innych materiałów z grupy trudnoobrabialnych, takich jak PCD, diament, Al_2O_3 (szafir) czy borazon. Ma to szczególne znaczenie z punktu widzenia precyzyjnego kształtowania narzędzi skrawających wykorzystywanych na szeroką skalę w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym czy stolarskim.

Badania przeprowadzone zostały dla potrzeb projektu realizowanego w ramach programu INNOLOT finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- [1] Blicharski M., *Wstęp do inżynierii materiałowej*. WNT, Warszawa 2003.
- [2] Dubik A., *1000 słów o laserach i promieniowaniu laserowym*. Wydawnictwo MON, Warszawa 1989.
- [3] Józwicki R., *Technika laserowa i jej zastosowania*. WPW, Warszawa 2009.
- [4] Lasek K., Okoński P., Mierzwińska-Nastalska E., *Tlenek cyrkonu – właściwości fizyczne i zastosowanie kliniczne*. „Protet. Stomatol.”, 2009, LIX, 6, s. 415–422.
- [5] Kannatey-Asibu E., *Principles of Laser Materials Processing*. John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2009.
- [6] Wyszynski D., *Precyzyjna obróbka laserowa materiałów trudnoobrabialnych*. „Mechanik”, nr 01/2015.
- [7] Wyszynski D., Janusz M., *Modelowanie matematyczne precyzyjnego cięcia laserem ZrO₂*. Kraków – Krynica 2013.
- [8] Wyszynski D., Lipiec P., Skoczypiec S., *DPSS Nd:YAG Laser Precision Machining of Monocrystalline Sapphire*. “Key Engineering Materials”, Vols. 554–557 (2013), pp. 1922–1929.
- [9] www.itee.radom.pl – dane dot. Państwowego Instytutu Badawczego w Radomiu.
- [10] Yadava V., Dubey A., *Laser beam machining – A review*. “International Journal of Machine Tools & Manufacture”, 48 (2008), pp. 609–628.