



## Cięcie laserowe

K. Musiał<sup>a</sup>, K. Studnik<sup>a</sup>, M. Bonek<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie  
email: mirosław.bonek@polsl.pl

**Streszczenie:** W niniejszym artykule dokonano porównania technologii cięcia materiałów, skupiając się głównie na metodzie cięcia laserowego. Omówiono zasady działania cięcia laserowego, plazmowego oraz cięcia strumieniem wody (waterjet), a następnie w tablicy przedstawiono różnice pomiędzy nimi. Otrzymane informacje poddano analizie oraz spróbowano ustalić która z metod cięcia materiałów jest najlepsza w określonych warunkach.

**Abstract:** The main objective in this paper is the comparison of different methods of cutting materials, focused mainly on laser cutting process. There are explained the main mechanisms of laser cutting, plasma cutting and waterjet cutting, then most important differences of these processes are shown in a table. Received information was discussed and leads to conclusion which of these three methods is the best for cutting materials in specific conditions.

**Słowa kluczowe:** porównanie, cięcie laserem, cięcie plazmą, cięcie wodą

## 1. WSTĘP

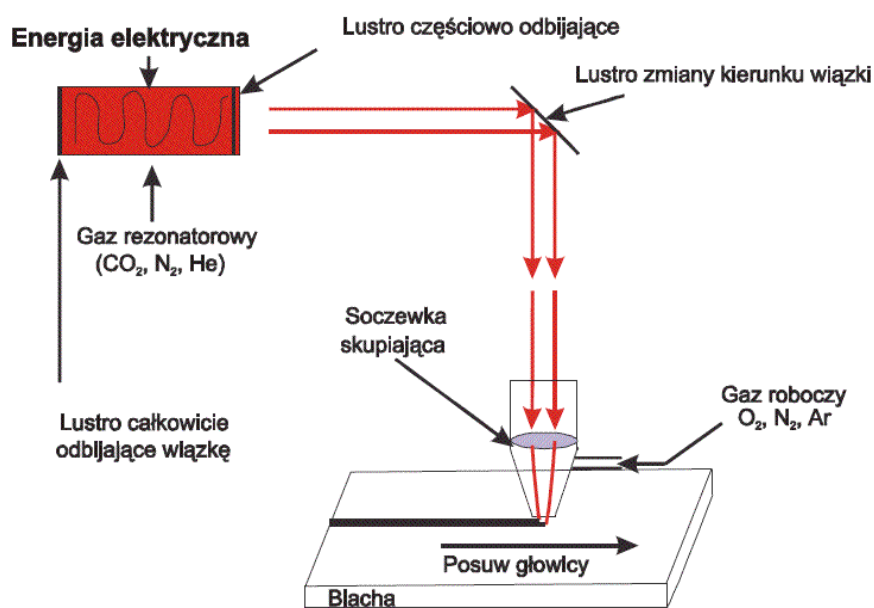
Cięcie laserowe jest termicznym procesem cięcia materiałów. Polega na topieniu i odparowywaniu lub spalaniu warstw materiału przy pomocy wysokoenergetycznej skoncentrowanej wiązki świetlnej uzyskanej w laserze. Głównymi cechami technologii cięcia laserowego jest wysoka jakość i niska chropowatość przeciętej powierzchni, wąska szczelina i mała strefa wpływu ciepła, małe odkształcenia materiału, ostre krawędzie oraz bardzo małe lub brak warstw utlenionych [1,2].

Szczególnym przypadkiem technologii cięcia laserowego jest laserowe dziurkowanie, które polega na wytopieniu i odparowaniu dziury w obrabianym materiale. Dzięki możliwości wykonania w ten sposób niezwykle małych otworów (od 0,13 do 1,3 mm) znajduje zastosowania w przypadku materiałów trudnych obrabialnie przy użyciu standardowych metod [1].

## 2. ZASADA DZIAŁANIA CIĘCIA LASEROWEGO

W urządzeniach do cięcia laserem wykorzystuje się wiązkę światła silnie skoncentrowaną w jednym punkcie za pomocą zestawu lusterek i soczewek skupiających. Pozwala to na uzyskanie

wiązki o dużej gęstości mocy. Proces cięcia laserem polega na skierowaniu wiązki lasera na powierzchnię materiału, który zostaje stopiony, odparowany lub spalony. Padanie skoncentrowanej wiązki światła na powierzchnię materiału powoduje jego intensywne nagrzewanie się. Podczas procesu doprowadza się pewną ilość gazu do strefy cięcia. Dodatkowy strumień gazu wydmuchuje stopiony materiał i jego pary powstałe podczas procesu. W przypadku cięcia poprzez spalanie materiału, strumień gazu stosowany jest w celu silniejszego nagrzewania powierzchni. Przy cięciu materiałów metalowych, głównie stali, dodatkowym gazem jest tlen, co zwiększa wydzielanie ciepła i zapewnia wyższą jakość ciętych brzegów. Podczas cięcia materiałów niemetalicznych stosuje się gaz obojętny, najczęściej azot, co zapobiega nadpaleniu ciętych brzegów. Zasadę działania procesu przedstawiono na rysunku 1 [3].



Rysunek 1. Schemat procesu cięcia laserem [4]

Figure 1. Diagram of the laser cutting process [4]

Aby możliwe było cięcie za pomocą lasera muszą być spełnione dwa warunki [3]:

- strumień światła nie może zostać odbity od powierzchni materiału, ani przeniknąć na wskroś, tylko musi wnikać w materiał,
- energia dostarczona do strefy cięcia musi być wyższa od rozpraszania ciepła wynikającego z przewodności cieplnej materiału.

Cięcie laserowe najczęściej jest stosowane dla materiałów o małej grubości (poniżej 4 mm) przy wykorzystaniu lasera CO<sub>2</sub>. Laser ten może być stosowany do wszystkich stali nisko- i wysokostopowych, niektórych metali nieżelaznych (tytan i nikiel), materiałów niemetalicznych, takich jak tworzywa sztuczne, materiały ceramiczne, drewno, szkło i materiały tekstylne [3].

### 3. METODY CIĘCIA LASEROWEGO

#### 3.1. Cięcie przez odparowanie

Laserowe cięcie przez odparowanie polega na poddaniu materiału działaniu zogniskowanej wiązki, która podgrzewa powierzchnię do temperatury wrzenia tworząc dziurę, która powoduje

wzrost absorpcji cieplnej materiału i pogłębianie otworu. Gdy otwór się pogłębia i materiał wrze, ciśnienie wytwarzane przez pary materiału stabilizuje roztopione ścianki szczeliny. Wydzielające się pary materiału mogą osadzać się na górze i dole szczeliny, tworząc zgorzel. Cięcie przez odparowanie najczęściej stosuje się do cięcia materiałów nietopliwych, takich jak: drewno oraz niektóre tworzywa polimerowe [5].

### 3.2. Cięcie przez topienie i wydmuchiwanie

W trakcie cięcia przez topienie i wydmuchiwanie wykorzystywany jest sprężony gaz ochronny, który wydmuchuje roztopiony materiał ze szczeliny zapobiegając wzrostowi temperatury do punktu wrzenia. Wykorzystanie sprężonego gazu podczas cięcia znacząco obniża zapotrzebowanie na energię [5]. Cięcie przez topienie i wydmuchiwanie najczęściej stosuje się do cięcia metali, a w szczególności stali nierdzewnych [4,5].

### 3.3. Cięcie przez wypalanie

Proces cięcia przez wypalanie polega na poddawaniu materiału zogniskowanej wiązce, która nagrzewa i topi materiał oraz dodatkowo wprowadza się gaz reaktywny – najczęściej tlen lub mieszaniny gazów zawierających tlen, który powoduje reakcję egzotermiczną. Przepływający przez szczelinę gaz wydmuchuje roztopiony materiał i jednocześnie reaguje z nim spalając się. Ilość energii dostarczanej w procesie spalania zależy od materiału: np. stal 60%, tytan ~90%. Stosując metodę cięcia przez wypalanie można nawet podwoić prędkość cięcia, co skutkuje lepszą jakością krawędzi i mniejszą strefą wpływu ciepła. Najczęściej stosuje się tę metodę do cięcia stali węglowych, stali nierdzewnych i stopów tytanu oraz stopów aluminium [5].

### 3.4. Cięcie przez generowanie pęknięć termicznych

Cięcie poprzez generowanie pęknięć termicznych jest metodą cięcia, którą stosuje się głównie w przypadku materiałów kruchych, zwłaszcza szkielek. Najefektywniejsze jest w przypadku prostych cięć. Zogniskowana wiązka nagrzewa mały obszar na powierzchni materiału doprowadzając do jego rozszerzenia się, co wywołuje naprężenia. Moment wystąpienia pęknięcia w nagrzewanym obszarze daje możliwość sterowania kierunkiem przebiegu dalszego pęknięcia przy pomocy lasera. Gdy pęknięcie dojdzie do krawędzi arkusza pole naprężeń staje się skomplikowane co sprawia trudności w modelowaniu i przewidywaniu pęknięcia [4,5].

## 4. TYPY LASERÓW

W procesach cięcia stosuje się dwa podstawowe rodzaje laserów. Laser gazowy CO<sub>2</sub> wykorzystuje się do cięcia, wiercenia oraz grawerowania. Jest to laser, w którym ośrodkiem czynnym jest dwutlenek węgla, emituje promieniowanie o długości fali w zakresie 9,4÷10,6 μm i może osiągać moc powyżej 10 kW. Wśród laserów CO<sub>2</sub> wyróżnia się lasery o szybkim przepływie osiowym, wolnym przepływie osiowym oraz przepływie poprzecznym. Lasery CO<sub>2</sub> są najczęściej pompowane za pomocą przepływu prądu stałego przez mieszaninę gazu. Lasery tego typu wyróżniają się najwyższą wydajnością i są zazwyczaj stosowane do cięcia m.in. stali niestopowej, stali odpornych na korozję, stopów tytanu, stopów aluminium, papieru, tworzyw sztucznych, drewna oraz materiałów tekstylnych [6].

Drugim rodzajem lasera stosowanego do cięcia materiałów jest laser Nd:YAG. Jest to laser neodymowy, w którym ośrodkiem czynnym jest kryształ granatu aluminiowo-itrowego. Lasery Nd:YAG są coraz popularniejsze, ze względu na możliwość uzyskania wyższych mocy w porównaniu do innych rodzajów lasera. Laser ten emituje promieniowanie o długości fali 1064 nm. Lasery Nd:YAG stosowane są najczęściej w pracy impulsowej, ze względu na dokładną kontrolę czasu trwania i mocy impulsu. Wykorzystuje się je najczęściej do cięcia, trasowania, grawerowania, spawania i zgrzewania materiałów metalowych i ceramicznych [6,7].

## 5. BADANIE PORÓWNAWCZE

Badanie porównawcze jest najprostszym sposobem oceny metod cięcia i wybraniem najlepszej z nich. Podczas wyboru optymalnej metody cięcia ważne są aspekty takie, jak koszty stosowania danej technologii, jakość krawędzi cięcia, wszechstronność, łatwość wprowadzenia metody do linii produkcyjnej oraz wpływ na środowisko. W tabelicy 1 zestawiono porównanie cięcia materiałów za pomocą lasera, strumienia wody oraz plazmy.

Tablica 1. Porównanie metod cięcia. Kolorem niebieskim zaznaczono najlepsze rozwiązanie [8]  
*Table 1. Comparison of cutting methods. The best solutions are marked in blue [8]*

Metoda cięcia	Cięcie laserem	Cięcie wodą	Cięcie plazmą
Szybkość	Szybkie	Wolne	Szybkie
Grubość materiału	Cienkie i średnie	Grube i cienkie	Średnie i grube
Rozmiary elementów	Małe i duże	Małe i duże	Duże
Kształty	Skomplikowane	Skomplikowane	Proste
Rodzaje materiałów	Jednородne nie odbijające światła	Większość materiałów stałych	Metale i materiały przewodzące
Materiały skorodowane	Dobrze	Bardzo dobrze	Średnio
Kompozyty	Nie	Tak	Nie
Utwardzanie materiału	Tak	Nie	Tak
Odształcenia cieplne	Tak, w małym obszarze	Nie	Tak, w dużym obszarze
Szkodliwe opary	Tak	Nie	Tak
Cięcie wielowarstwowe	Nieemożliwe	Możliwe	Nieemożliwe
Precyzja cięcia	Najwyższa	Wysoka	Dobra
Powstawanie zadziorów	Tak	Minimalne	Tak
Koszty	Niskie	Najwyższe	Niskie

Cięcie strumieniem wody, zwane też waterjet, jest jedną z metod cięcia materiałów. Wykorzystuje strumień wody pod wysokim ciśnieniem z dodatkiem ścierniwa. Zasada działania urządzenia do cięcia wodą jest stosunkowo prosta. Woda pompowana jest do zbiornika, w którym dodawane jest ścierniwo, najczęściej w postaci sproszkowanego granatu. Następnie mieszanka pompowana jest pod wysokim ciśnieniem do dyszy, która skierowana na powierzchnię materiału powoduje jego cięcie. Prędkość strumienia u wylotu dyszy może osiągać nawet do 300 m/s. Rodzaj stosowanego ścierniwa jest zależny od materiału, który ma zostać poddany cięciu. W przypadku miękkich materiałów, jak tworzywa sztuczne, nie ma potrzeby

stosowania ścierniwa i da się je przeciąć samą wodą, ale w przypadku twardszych materiałów ścierniwo jest konieczne. Im twardszy jest materiał poddany cięciu, tym twardsze musi być ścierniwo. Wadą stosowania twardszego ścierniwa jest szybsze zużycie dyszy [8,9].

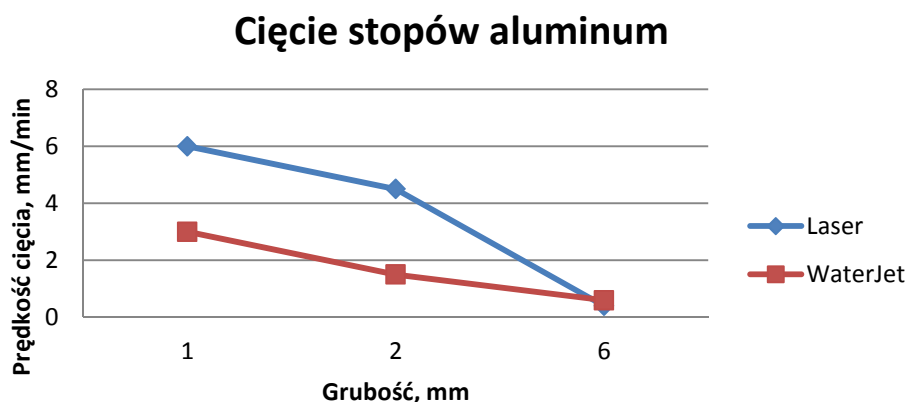
Cięcie plazmą to proces cięcia materiału za pomocą łuku plazmowego. Polega na tłoczeniu gazu ochronnego lub powietrza pod wysokim ciśnieniem przez dyszę. Pomiędzy dyszą, a powierzchnią ciętego materiału w strumieniu gazu formowany jest łuk elektryczny, powodując jego przejście w plazmę, której wysoka temperatura powoduje przetopienie materiału i jego wydmuchanie za pomocą gazu. Jako gazy plazmowe stosowane są najczęściej powietrze lub tlen podczas cięcia stali niskowęglowych, a przy cięciu stali nierdzewnych azot i mieszanka azot/argon/wodór [3,8].

Technologia laserowego cięcia materiałów jest niezwykle atrakcyjna ze względu na najwyższą precyzję cięcia w porównaniu do cięcia wodą i plazmą. Pomimo wysokiej precyzji proces cięcia tą technologią jest bardzo szybki, co pozwala na znaczne skrócenie czasu produkcji. Przekłada się to na obniżenie kosztów produkcji, które pomimo tego są znacznie niższe niż w przypadku cięcia wodą ze względu na brak potrzeby stosowania wody i ścierniwa [8].

Metodą cięcia laserem można ciąć tylko i wyłącznie materiały jednorodne nieodbijające światła co znacznie zawęża możliwości zastosowania tej technologii, w porównaniu do technologii cięcia wodą, którą można ciąć praktycznie każdy typ materiału. Rozmiary i skomplikowanie kształtu przedmiotów jakie można wyciąć przy pomocy technologii laserowej są jej bardzo atrakcyjną cechą, ponieważ laserem możliwe jest wycinanie zarówno małych jak i dużych elementów o dużym skomplikowaniu kształtu [8].

Cięcie waterjetem można przyspieszyć tnąc wielowarstwowo, co nie jest możliwe do wykonania laserem i plazmą. Niemożliwe jest także laserowe cięcie materiałów kompozytowych. Oprócz tego technologią laserową można ciąć materiały skorodowane, co przy pomocy plazmy jest znacznie trudniejsze, natomiast woda tnie je bardzo dobrze [8].

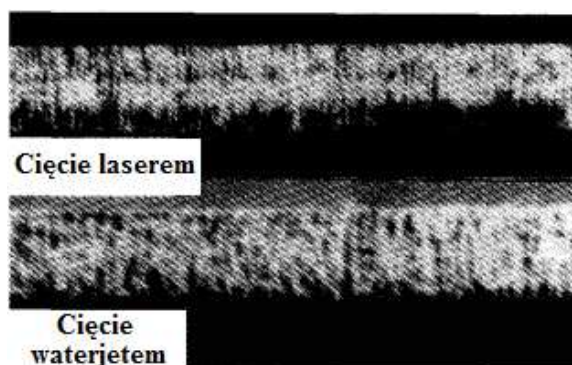
Stosując technologię laserową w cięciu należy zwrócić uwagę na występowanie niewielkich odkształceń cieplnych przy krawędzi cięcia oraz nadtopień na krawędziach co powoduje powstawanie zadziórów. Dodatkowo wydzielają się szkodliwe opary w trakcie pracy. Oba te zjawiska nie występują w przypadku cięcia wodą, natomiast w przypadku plazmy odkształcenia cieplne powstają na większym obszarze [8].



Rysunek 2. Porównanie prędkości cięcia stopów aluminium [10]

Figure 2. Speed comparison for aluminum cutting [10]

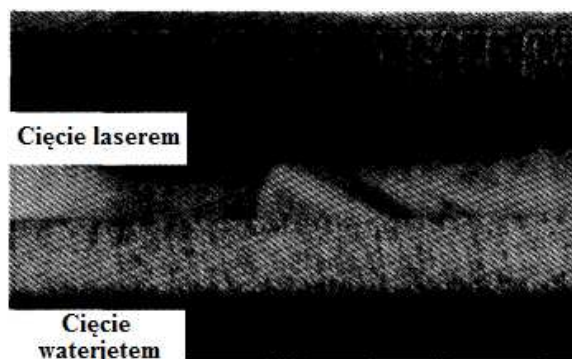
Jak można zaobserwować na rysunku 2, prędkość cięcia za pomocą lasera jest wyższa niż w przypadku metody waterjet, przy porównywalnej jakości krawędzi cięcia (rys. 3), jednak przy grubościach elementów powyżej 2 mm szybkość cięcia metodą laserową gwałtownie spada, ze względu na wyższą energię potrzebną do przecięcia materiału, a przy większej grubości (około 6 mm) jest porównywalna z szybkością cięcia wodą. Na szybkość procesu cięcia ma wpływ słaba absorpcja wiązki lasera. Szybkość cięcia laserem musi być odpowiednio dobrana, ponieważ zbyt szybkie cięcie mogłoby spowodować tylko nacięcie materiału, natomiast zbyt wolny proces mógłby spowodować lokalne nadtopienie materiału. Z kolei w przypadku cięcia wodą im mniejsza szybkość procesu, tym lepsza jakość krawędzi cięcia [10].



Rysunek 3. Tekstura powierzchni cięcia stopu aluminium o grubości 2 mm [10]

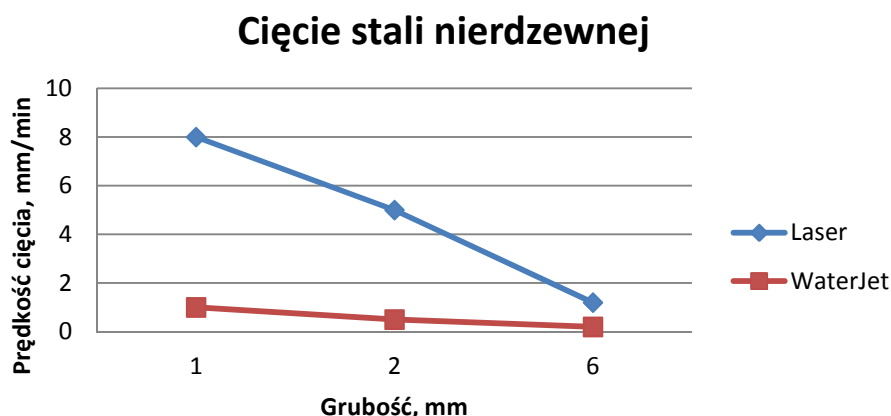
Figure 3. Cut surface textures of 2 mm thick aluminum [10]

W przypadku cięcia stali nierdzewnej można zaobserwować również porównywalną jakość krawędzi cięcia (rys. 4), ale prędkość procesu przy zastosowaniu technik laserowych jest znacznie wyższa niż w przypadku cięcia wodą (rys. 5). Stal nierdzewna charakteryzuje się wyższą twardością niż stopy aluminium, więc znacznie trudniejsze jest przecięcie materiału za pomocą waterjeta. W przypadku lasera jest to łatwiejsze, ze względu na lepszą absorpcję wiązki lasera przez stal. Podobnie jak w przypadku stopów aluminium, szybkość cięcia za pomocą lasera gwałtownie spada wraz ze wzrostem grubości elementu (trudności ze skupieniem wiązki w jednym punkcie). Podczas cięcia stali nierdzewnej laserem szerokość cięcia jest 2÷4 mniejsza, co oznacza, że metoda laserowa charakteryzuje się znacznie wyższą precyzją cięcia [10].



Rysunek 4. Tekstura powierzchni cięcia stali nierdzewnej o grubości 2 mm [10]

Figure 4. Cut surface textures of 2 mm thick stainless steel [10]



Rysunek 5. Porównanie prędkości cięcia stali nierdzewnej [10]

Figure 5. Speed comparison for stainless steel cutting [10]

## 6. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników analizy porównawczej technologii cięcia laserowego, plazmowego oraz waterjetem, czyli wodą, stwierdzić można, że żadna z porównywanych technologii nie jest idealną. Cięcie laserowe jest technologią niezwykle atrakcyjną ze względu na szybkość procesu oraz precyzję cięcia i możliwość wycinania skomplikowanych kształtów. Szybkość cięcia spada jednak wraz ze wzrostem grubości przycinanego elementu. Ponadto proces cięcia laserem musi być prowadzony z odpowiednią szybkością, ponieważ zbyt szybkie lub zbyt wolne cięcie mogłoby spowodować otrzymanie nadtopienia materiału lub tylko nacięcie materiału. Metoda cięcia wodą w wielu aspektach okazuje się być atrakcyjniejsza, jednakże koszty eksploatacyjne zdecydowanie przemawiają na korzyść cięcia laserowego.

## LITERATURA

1. Encyklopedia Britannica, Electron beam machining, Laser Machining, strona internetowa: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/354662/machine-tool/39178/Electron-beam-machining-EBM#toc39182> [dostęp 22/04/2014].
2. K.D. Avani, Y. Vinod, Laser beam machining – A review, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 609-628.
3. M. Mazur, Podstawy spawalnictwa, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1993.
4. Strona internetowa zakładu produkcyjnego BUD-EXPERT: <http://ciecielaserem.info> [dostęp 22/04/2014].
5. R. Singh, Lecture ME 677: Laser Material Processing, Indian Institute of Technology Bombay, strona internetowa: <http://www.me.iitb.ac.in/~ramesh/ME677/lasercutting.pdf> [dostęp 22/04/2014].
6. M. Pivtoraiko, A. Rozhkov, Applied Optics, Winter 2003, strona internetowa: [http://web.pdx.edu/~larosaa/Applied\\_Optics\\_464-564/Projects\\_Presented/Mikhail\\_Types\\_of\\_Lasers.pdf](http://web.pdx.edu/~larosaa/Applied_Optics_464-564/Projects_Presented/Mikhail_Types_of_Lasers.pdf) [dostęp 23/04/2014].
7. M. Konowalski, Lasery przemysłowe - Laser Nd:YAG – budowa i zastosowanie, wykład strona internetowa: <http://lodd.p.lodz.pl/~konrad/Elektronika%20kwantowa/Studenci%20egzamin%202005/Lasery%20przemyslowe%20Nd%20YAG.ppt> [dostęp 23/04/2014].

8. D. Krajcarz, Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting, *Procedia Engineering* 69 (2014) 838-843.
9. Waterjets.org – the most complete waterjet resource on the web, Waterjet abrasives, strona internetowa: [http://waterjets.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=85&Itemid=55](http://waterjets.org/index.php?option=com_content&task=view&id=85&Itemid=55) [dostęp 11/05/2014].
10. H.Y. Zheng, Z.Z. Han, Z.D. Chen, W.L. Chen, S. Yeo, Quality and Cost Comparisons between Laser and Waterjet Cutting, *Journal of Materials Processing Technology* 62 (1996) 294-298.