



## **Analiza porównawcza wysokoenergetycznych technologii cięcia materiałów**

T. Gwiaździński<sup>a</sup>, M. Bonek<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Studenckie Koło Naukowe Laserowej Obróbki Powierzchniowej  
email: tgwiazdzinski@o2.pl

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

**Streszczenie:** W pracy zawarte zostały informacje dotyczące systemów laserowych wykorzystywanych w przemyśle do procesów cięcia. Przedstawiono fizyczne podstawy działania laserów oraz ich podstawowe rodzaje używane w operacjach cięcia. Przedstawiono poszczególne systemy składające się na urządzenia laserowe oraz opisano podstawowe parametry procesu. Opisano również typowe zastosowanie laserów przy cięciu precyzyjnym. Przedstawiono także ekonomiczne aspekty związane z zakupem i eksploatacją systemów laserowych oraz dokonano porównania techniki cięcia przy użyciu promienia laserowego do innych technik stosowanych w przemyśle.

**Abstract:** The material includes information about laser systems used in industrial cutting process, Work presenting actual physical bases of laser works, also laser basic functions in the process of cutting. Presented individual systems are assembly of lasers, described are also basic parameters of the process. Article includes also typical uses for laser precision cutting. All economical aspects described and debated in the article are comparing use of lasers in compare to the other technologies used in the industry.

**Słowa kluczowe:** laser, systemy laserowe, cięcie laserem, koszty

### **1. WSTĘP**

Chociaż jest wiele typów laserów posiadających różne właściwości, to w przemyśle znalazły zastosowanie głównie lasery CO<sub>2</sub> i Nd:YAG. Wybór typu lasera zależy w głównej mierze od materiału i jego możliwości do absorbowania konkretnej długości fali. Innymi czynnikami, którymi należy się kierować przy wyborze odpowiedniego typu rezonatora są:

- Grubość materiału,
- Geometria materiału,
- Jakość krawędzi cięcia które chcemy otrzymać w procesie,
- Prędkość cięcia którą staramy się uzyskać.

Długość fali laserów Nd:YAG jest lepiej pochłaniana przez większość metali w porównaniu z długością fali generowaną przez lasery CO<sub>2</sub>, jednak rezonatory CO<sub>2</sub> oferują większe moce wiązki.

Zalety obu typów laserów wymieniono poniżej [2-7]:

Lasery na dwutlenku węgla:

- Większe moce;
- Lepsze możliwości skupienia wiązki - jej lepsza jakość pozwala na zmniejszenie szerokości szczeliny cięcia i wyższą jakość krawędzi;
- Wyższe prędkości cięcia materiałów nie odbijających jego długości fali;
- Możliwość cięcia materiałów większej grubości, które nie odbijają jego długości fali;
- Niższe koszty eksploatacyjne.

Lasery neodymowe:

- Możliwość użycia światłowodów do transportu wiązki;
- Możliwość cięcia materiałów odbijających długość fali laserów CO<sub>2</sub>;
- Łatwiejsze rozdzielanie wiązki na kilka stanowisk;
- Prostsze systemy dostarczające i skupiające wiązkę;
- Długość systemów dostarczania wiązki nie wpływa na proces;
- Możliwość osiągnięcia dużych mocy impulsów (przy pracy impulsowej).

### **Wiązka dostarczana ciągle i impulsowo**

Prędkość cięcia jest bezpośrednią funkcją mocy lasera, jednak jakość cięcia jest uzależniona od sposobu w jaki energia zostaje przekazana. Moc lasera może być dostarczona w postaci szybko następujących po sobie impulsów lub też w sposób ciągły. Wysoka moc przekazywana w sposób ciągły, powoduje dostarczenie bardzo dużych ilości ciepła w obszar cięcia co może powodować problemy z uzyskaniem krawędzi o wysokiej jakości, szczególnie przy cięciu materiałów większej grubości. Ponadto cięcie metali z wykorzystaniem aktywnego tlenu może skutkować wypalaniem materiału poza szczeliną cięcia, doprowadzając do niepożądanych wypaleń materiału na jego krawędziach [8,11].

Przekazywanie energii w sposób impulsowy może zniwelować tego typu problemy i znacznie poprawić jakość cięcia w stosunku do dostarczania wiązki w sposób ciągły. Krótkie i długie impulsy generowane są naprzemiennie, w sposób cykliczny, z występującymi przerwami w cyklu. Podczas trwania impulsu materiał jest topiony i odparowywany oraz następuje jego usunięcie ze szczeliny cięcia, natomiast w przerwach między kolejnymi seriami impulsów materiał ma czas na ostygnięcie. Częstotliwość impulsów jest parametrem od którego zależy prędkość procesu. W przypadkach, gdy przerwy pomiędzy impulsami są zbyt długie, przecięcie materiału może w ogóle nie mieć miejsca. Jeśli natomiast częstotliwość impulsów jest za wysoka, proces przebiega jak w przypadku użycia wiązki ciągłej, wraz ze wszelkimi jego problemami, prowadząc do sytuacji, które zostały wyżej wymienione.

### **Systemy laserowe**

W technologach laserowych używanych w przemyśle wiązka laserowa jest tylko jednym z komponentów całego systemu narzędzi biorących udział w procesie. Potrzebne są jeszcze systemy sterujące procesem, systemy umożliwiające odpowiednie kierowanie wiązki jak i jej dostarczanie w miejsce obróbki, oraz i inne, w zależności od tego, z jakim procesem mamy do czynienia. Ogólnie przemysłowe systemy laserowe składają się z czterech następujących grup komponentów [9]:

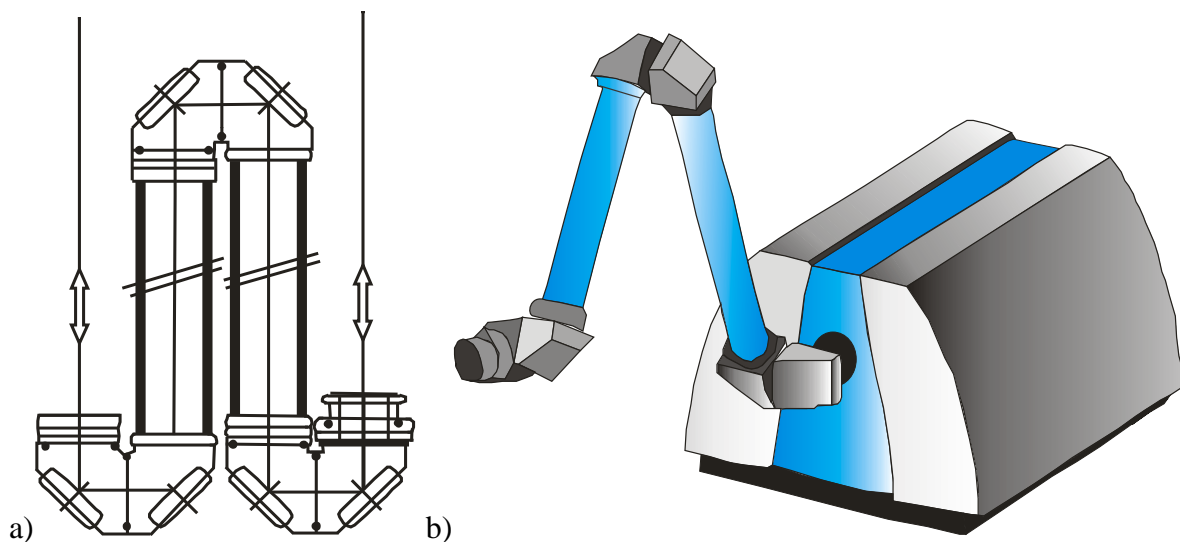
- Generator wiązki (źródło lasera) i system kontroli,
- Układ dostarczający wiązkę (elementy optyczne, lustra, światłowody),
- Skupianie wiązki (lustra, soczewki, specjalne elementy optyczne),
- Część robocza (dysze, czujniki systemu).

### Systemy zwierciadeł

Systemy dostarczania wiązki służą do kierowania wiązki od źródła lasera do miejsca obróbki w taki sposób, aby zachować jej parametry jak i jej jakość (rys. 1). W laserach CO<sub>2</sub> typowo odbywa się to przy użyciu odpowiednich systemów zwierciadeł. Lasery których źródła wykorzystują do propagacji wiązki ciała stałe, jak również lasery diodowe, ze względu na długości fali mogą wykorzystywać w tym celu światłowody. Przy występowaniu wiązki laserowej o dużej gęstości mocy, systemy dostarczające muszą być zaopatrzone w odpowiednio wydajne systemy chłodzące, zapobiegające przegrzaniu i uszkodzeniu wszystkich elementów.

W połączeniu z laserami CO<sub>2</sub>, lustra odbijające są używane jako podstawowy system dostarczania wiązki do miejsca obróbki. Zwierciadła, które posiadają bardzo wysoką skuteczność odbicia, oraz powierzchnie o bardzo wysokiej jakości, w połączeniu z precyzyjnymi systemami mechanicznymi, zapewniają dostarczenie do miejsca obróbki wiązki o niezmiennych w czasie pracy parametrach. Ze względu na swoje możliwości rozpraszania ciepła często używane są zwierciadła z czystej miedzi, posiadające 99% skuteczność odbicia promieni, jednakże coraz bardziej na znaczeniu zaczynają zyskiwać zwierciadła tylko pokrywane warstwami tego metalu.

Przystosowując lasery do coraz szerszej gamy zastosowań w przemyśle stworzono systemy dostarczania wiązki umożliwiające ich działanie w trzech wymiarach. Rozwiązania takie pozwalają na obróbkę przedmiotów o skomplikowanych przestrzennych kształtach, z wykorzystaniem niewątpliwych zalet jakie daje obróbka laserem [1,9-11].

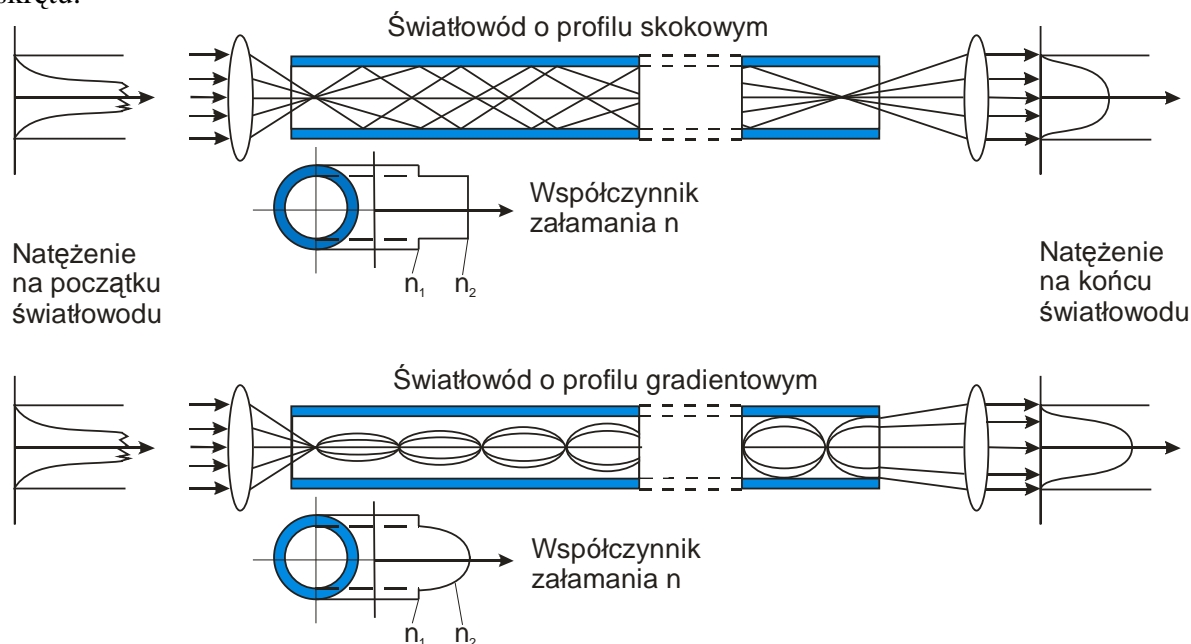


Rysunek 1. Schemat a) i rysunek b) przegubowego ramienia dostarczającego wiązkę laserową.

### Systemy światłowodowe

Długość fali promieniowania laserowego, generowanego przez lasery wykorzystujące ciała stałe jak i lasery diodowe, pozwala na użycie do ich transportu światłowodów. Niezwykle elastyczne, optyczne włókna pozwalają na przesłanie wiązki w miejsca obróbki niedostępne dla innych systemów dostarczających promieniowanie laserowe.

Światłowody układane są podobnie jak przewody elektryczne od źródła lasera do miejsca pracy (rys. 2). W regularnych odstępach na całej długości przewodów instaluje się urządzenia korygujące odkształcenie promienia, mające zapobiegać degradacji wiązki. Odkształcenia mogą być spowodowane przez zbyt duże napięcie światłowodu lub dynamiczne ruchy ramienia robota. Układając światłowody ważnym jest zachowanie jak najłagodniejszych promieni skreśłu.



Rysunek 2. Transport wiązki przez światłowody o profilu skokowym i gradientowym.

Najnowsze generacje światłowodów wykorzystywanych w przemyśle laserowym posiadają do sześciu rdzeni - od 0,15mm do 1,5mm średnicy, pozwalających zaopatrywać kilka stanowisk roboczych jednocześnie. Mogą obsługiwać oddzielne urządzenia, bądź też moc dostarczana do jednego stanowiska może być rozdzielona na kilka światłowodów. [1,2,11]

### Skupianie wiązki

W przemysłowych systemach laserowych, wiązka wygenerowana przez laser przechodzi przez różne systemy zanim dotrze do miejsca, w którym jej energia zostanie użyta. Poprzez systemy rozdzielania, teleskopy, systemy zwierciadeł lub światłowody trafia do miejsca w którym może zostać wykorzystana, lecz na jej drodze jest jeszcze jeden, chyba najważniejszy z opisanych systemów - system skupiający. Jego zadaniem jest korekta wszystkich rozbieżności promienia laserowego, oraz skupienie całej energii w odpowiednim punkcie. Ma to zasadnicze znaczenie w każdym rodzaju obróbki - od tego zależy zarówno jakość obrabianych powierzchni jak również szybkość procesu i ilość energii potrzebnej do jego właściwego przeprowadzenia. Przeważnie elementy tego systemu integrowane są z głowicą

roboczą, i projektowane są ściśle w oparciu o parametry procesu, takie jak: początkowa średnica wiązki, wymagana średnica promienia na materiale obrabianym, rodzaj i sposób realizacji obróbki.

W wielu przypadkach głowica robocza musi dostosować przekrój wiązki do średnicy wymaganej przy danym procesie, w stosunku do powierzchni obrabianego przedmiotu. Realizuje się to przez odpowiednie zmiany odległości między elementami optycznymi skupiającymi wiązkę. Dla zapewnienia w całym procesie stałej średnicy wiązki na obrabianym przedmiocie, średnica promienia trafiającego na optykę skupiającą musi być tak stała jak to tylko możliwe. Uzyskuje się to przez użycie wyżej wspomnianych teleskopów, powodujących, że promień padający na optykę skupiającą ma możliwie małe rozbieżności. Laserowe techniki są metodami termicznej obróbki materiałów, w których mogą następować zmiany stanu skupienia obrabianych materiałów, co może wywoływać powstawanie żrących oparów oraz osadzanie się par metali na częściach roboczych, a wszystko to odbywa się w wysokiej temperaturze, w jakiej zachodzi proces. Do ochrony optyki przed wpływem szkodliwych czynników używa się kwarcowych szkieł ochronnych, umieszczanych pomiędzy miejscem obróbki a układami optycznymi skupiającymi promienie laserów diodowych i laserów na ciele stałym. Stopień zużycia tych szkieł monitorowany jest odpowiednimi czujnikami, co pozwala na dokonywanie niezbędnych napraw i konserwacji dokładnie wtedy, gdy zachodzi taka potrzeba [1, 4-8].

### **Dysze**

Obróbka materiału poprzez odpowiednio uformowany i skupiony promień lasera wiąże się z wykorzystaniem gazów. W zależności od procesu, gazy służą ochronie przed wpływem czynników atmosferycznych, bądź stanowią integralną część mechanizmu procesu. W większości procesów, gazy te podawane są przy pomocy odpowiednio wyprofilowanych dysz, pozwalających na doprowadzenie gazu bezpośrednio w miejsce styku promieni lasera z obrabianym materiałem. Przy cięciu metali i niemetali, dysze dostarczają gazy, które pomagają w usuwaniu produktów spalania ze szczeliny cięcia, bądź też same są czynnikiem tnącym, jak w cięciu przez wypalenie, gdzie materiał poddany działaniu zogniskowanej wiązki jest wypalany przez strumień tlenu lub mieszaniny gazów zawierającej tlen. Przy cięciu sublimacyjnym gaz wykorzystywany jest do rozpraszania powstających podczas procesu substancji lotnych oraz do ochrony optycznych mechanizmów głowicy.

### **Głowice robocze**

Systemy optyczne skupiające wiązkę, wraz z dyszami podającymi gaz w miejsce obróbki zintegrowane są w jeden system – głowice robocze. Głowica oprócz tych systemów zawiera jeszcze: systemy chłodzące optykę, czujniki kontrolujące odległość od materiału, mechanizmy pozwalające na wycentrowanie wszystkich jej elementów względem wiązki. Ich budowa uzależniona jest od przeznaczenia, systemu ruchu, rodzaju źródła wiązki, precyzji pracy.

### **Aspekty ekonomiczne cięcia laserowego**

Na początku rozwoju technik laserowych ich wykorzystanie ograniczało się wyłącznie do procesów, które bezwzględnie wymagały olbrzymiej precyzji, bądź dla szczególnych rozwiązań technologicznych wykluczających użycie innych technik cięcia. Wiązało się to z kosztami i ryzykiem inwestowania w nowe, nie sprawdzone rozwiązania. Dzisiaj laserowe techniki obróbki materiału stają się metodami „konwencjonalnymi” w wielu sektorach

przemysłu. Ich rozwój doprowadził do zwiększenia prędkości i dokładności procesu, co ma swoje odbicie w korzyściach finansowych dla stosujących je przedsiębiorstw.

Pytanie, czy wykorzystanie lasera będzie miało większe ekonomiczne korzyści niż techniki tradycyjne nie jest jednoznaczne, podobnie jak to, czy bardziej opłacalne jest użycie laserów Nd:YAG czy CO<sub>2</sub>. Tego typu rozważania poprzedzane są zwykle szczegółową analizą różnych aspektów produkcji, kosztów eksploatacyjnych, kosztów inwestycji, czasu zwrotu inwestycji przy założonej wielkości produkcji. Kalkulacje sporządza się biorąc pod uwagę ewentualne zmiany i zapotrzebowanie na rynku, konieczności rozbudowy systemów, i wiele innych aspektów. Przy sporządzaniu planów inwestycyjnych potrzebna jest jednak wiedza na temat kosztu różnych urządzeń oraz kosztów ich eksploatacji. Kolejne tablice 1,2 i 3 przedstawiają koszty głównych systemów laserowych oraz koszty eksploatacyjne [1, 4-11].

Tablica 1.

Zakresy kosztów inwestycyjnych w laser CO<sub>2</sub>

Moc	Typowy koszt inwestycyjny lasera CO <sub>2</sub> (z systemem chłodzenia) w tysiącach Euro
1000W	100 - 150
2000W	150 - 200
3000W	200 - 250
4000W	250 - 300
6000W	300 - 350
8000W	350 - 400
	50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 600 700 800 900 1000

Tablica 2.

Zakresy kosztów inwestycyjnych w laser Nd:YAG.

Moc	Typowy koszt inwestycyjny lasera Nd:YAG pompowanego diodowo (z systemem chłodzenia) w tysiącach Euro
1100W	200 - 250
2200W	300 - 350
3300W	400 - 450
4400W	500 - 550
6000W	700 - 800
	50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 600 700 800 900 1000

Koszty źródeł laserowych rosną wraz z ich mocą, która wymaga bardziej skomplikowanych rozwiązań technicznych. Zwiększenie mocy lasera wiąże się z zastosowaniem odpowiednio wydajnego systemu chłodzenia oraz optyki dostosowanej do mocy systemu, w taki sposób, aby otrzymywana wiązka była w dalszym ciągu wysokiej jakości. Zwiększona jest też wielkość układu, tak jak w przypadku laserów Nd:YAG pompowanych diodowo zwiększa się liczba laserów diodowych potrzebnych do inicjacji wiązki.

Tablica 3.  
Zakresy kosztów inwestycyjnych w system ruchu.

Układ	Typowy koszt inwestycyjny systemów ruchu (bez źródła lasera) w tysiącach Euro														
3 osiowy system CNC															
5 osiowy system CNC															
System bramowy															
Robot przemysłowy															
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000

## 2. PODSUMOWANIE

Od kiedy moc wiązki lasera została skoncentrowana w sposób umożliwiający przecinanie materiałów, laser stał się narzędziem oferującym wiele korzyści i pokazującym swoją przewagę nad innymi technikami cięcia.

Skupiona moc wiązki lasera jest najnowszym narzędziem wykorzystywanym w przemyśle do cięcia materiałów. Pozwala nie tylko na cięcie większości materiałów, lecz umożliwia cięcie ich w taki sposób, jaki nie da się osiągnąć metodami konwencjonalnymi. Odpowiednio sterowany i skupiony promień lasera jest w stanie ciąć z dokładnością do mikrometrów. Nawet wysoce zaawansowane metody termicznego i mechanicznego cięcia nie są w stanie zbliżyć się do tak wysokiej precyzji. Termiczne metody cięcia pomimo, że z zasady działania podobne są do cięcia laserowego, nie mają możliwości tak precyzyjnego skupienia w małym punkcie operowanej energii. Płomień gazowy bądź strumień plazmy w celu dostarczenia odpowiedniej ilości energii do przecięcia materiału muszą mieć odpowiednio dużą powierzchnię działania. Wiąże się to z dużymi szerokościami szczelin cięcia i niezbyt wysoką precyzją tych procesów. W przypadku użycia lasera efekt jest odwrotny - im mniejszy punkt działania wiązki, tym wyższa koncentracja energii na materiale, węższa szczelina cięcia i większa prędkość procesu. Kolejnym ważnym czynnikiem procesów cięcia jest ich materiałochłonność. Niewielkie szerokości szczelin cięcia, oferowane przez systemy laserowe oraz wyeliminowanie konieczności stosowania dodatkowej obróbki ciętych krawędzi takiej jak szlifowanie, istotnie wpływa na zmniejszenie strat materiału podczas procesu, co zmniejsza jego koszty i podobnie jak duże szybkości osiągnięte przez cięcie laserowe zwiększa opłacalność jego stosowania.

Wadą systemów laserowych, która ogranicza w dużym stopniu ich stosowanie, jest ich wysoki koszt. Nie dotyczy to kosztów eksploatacyjnych, lecz kosztów inwestycyjnych, związanych z zakupem urządzeń laserowych i systemów sterowania - mało konkurencyjnych w porównaniu z metodami konwencjonalnymi, co stanowi poważną przeszkodę w ich szerszym zastosowaniu w przemyśle. Jednak dalszy rozwój tej technologii daje szansę na jej znaczne rozpowszechnienie w najbliższych latach.

Reasumując, w procesach cięcia różnych materiałów systemy laserowe oferują ogromne możliwości dzięki niektórym cechom niedostępnym w metodach konwencjonalnych.

Ogromna energia, którą promień koncentruje w niezwykle małym obszarze umożliwia:

- Uzyskanie bardzo małych szerokości szczelin cięcia, posiadających równe krawędzie,
- Zminimalizowanie strefy wpływu ciepła,
- Zminimalizowanie odkształceń termicznych materiału powstających podczas procesu. Brak mechanicznego kontaktu wiązki z powierzchnią przecinanego materiału pozwala na:
- Wyeliminowanie odkształceń mechanicznych powstających podczas procesu,
- Cięcie materiałów wykazujących się dużą twardością bez obawy o ich pękanie.
- Brak konieczności wymiany elementów roboczych stykających się z materiałem, jak w przypadku cięcia mechanicznego,
- Zmniejszenie hałasu powstającego podczas procesu w porównaniu z cięciem strumieniem wody, plazmą lub technikami mechanicznymi.

Ponadto, cięcie wiązką laserową daje wysoki stopień kontroli nad procesem oraz pozwala na jego elastyczność, co ma związek z:

- Możliwością adaptacji urządzeń do cięcia różnych rodzajów materiałów,
- Łatwym przestawianiem urządzeń do cięcia przedmiotów o innej geometrii,
- Dużą automatyzacją i kontrolą nad przebiegiem procesu,
- Możliwością wycinania skomplikowanych kształtów, nie ograniczonych przez geometrię narzędzia tnącego,
- Optymalnym wykorzystaniem obrabianego materiału,
- Możliwością cięcia elementów posiadających skomplikowaną geometrię, eliminujące wykorzystanie innych technik cięcia.

## LITERATURA

1. Wirth P.: Introduction to industrial laser materials processing. ROFIN Group, Hamburg, 2004
2. Havrilla D. Anthony P.: Laser cutting process fundamentals and troubleshooting guideline. Rofin-Sinar, Plymouth Michigan, 1999
3. Koebner H.: Industrial applications of laser. Chichester, New York 1984
4. Schaeffer R.: Laser cutting of large sheet materials. Welding and metal fabrication 7, 2001
5. Faerber M.: Laser cutting – current state of the technology development. Przegląd spawalnictwa 06, 2007
6. Buława J.: Wpływ składników kosztów eksploatacji lasera na koszt cięcia. Przegląd spawalnictwa 06, 2007
7. Migliore L.R.: Interaction between light and matter during laser processing. The Fabricator, 05, 1993
8. Szczeciński Z.: Laserowe cięcie materiałów. Przegląd spawalnictwa 08, 1986
9. MacLellan D.: Fine cutting with lasers. Medical device technology, 01/02, 2003
10. Mirski Z.: Możliwości zastąpienia azotu powietrzem przy cięciu laserowym. Przegląd spawalnictwa 01, 2004
11. Pond J.B.: Rough cut. Cutting tool engineering, 03, 1990