http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

Z E S Z Y T Y N A U K O W E P O L I T E C H N I K I P O Z N A Ń S K I E J
Nr 65 Organizacja i Zarządzanie 2015

Aliaksandr LIAUSHUK*

MODYFIKACJA STANOWISKA DO OBRÓBKI LASEROWEJ POWIĘKSZAJĄCA WYDAJNOŚĆ I JAKOŚĆ OBRÓBKI

W artykule przedstawione są wybrane zagadnienia związane z obróbką laserową przy wykorzystaniu stanowiska badawczego i lasera Laser Patara (model PA-016-QTG). Celem pracy jest zaprojektowanie i wizualizacja systemów kontroli polaryzacji wiązki lasera podczas cięcia laserem, wykonanie obliczeń i opracowanie dokumentacji technicznej. Opracowanie koncepcji i wykonanie zintegrowanego oprzyrządowania do oświetlenia pola obróbki laserowej oraz zapobiegania niepożądanemu wpływowi plazmy na obróbkę.

Słowa kluczowe: obróbka, laser, polaryzacja, strumień lasera.

1. WSTĘP

W niniejszej pracy autor skupił się na układzie umożliwiającym otrzymanie optymalnej jakości powierzchni obrabianej przy obróbce laserowej. Podczas tej obróbki uzyskuje się wysoką jakość obrabianej powierzchni, ale jednak jest potrzebna czasochłonna obróbka wykańczająca. Za pomocą lasera można obrabiać przedmioty o bardzo małych wymiarach. W takim przypadku dla obróbki wykańczającej wykorzystuje się niekonwencjonalne metody obróbki (elektrochemia, elektroerozja itd.), które są kosztowne i zajmują więcej czasu niż konwencjonalne. Układ umożliwiający uzyskanie optymalnej jakości powierzchni obrabianej wiązką laserową zmniejszy wydatki na obróbkę wykańczającą jak również czas potrzebny na wykonanie jednego detalu co zwiększy wydajność całego procesu produkcji.

Za pomocą promieniowania laserowego możliwe jest cięcie praktycznie wszystkich dowolnych materiałów: tkanin, azbestu, ceramiki, gumy, metalu, szkła i in. Zaletami cięcia laserowego są: bezdotykowość, duża prędkość, możliwość obróbki

* Doktorant Wydziału Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej.

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

skomplikowanych kształtów, wysoka jakość krawędzi, niewielka strefa oddziaływania cieplnego. Najczęściej stosowane lasery(CO_2, Nd:YAG) są przeważnie o działaniu ciągłym, ale również o działaniu impulsowym z dużą częstotliwością. Typowa gęstość mocy: 10^5–10^7 W/cm^2. Czas oddziaływania: 0,1–0,001 s. W celu zwiększenia skuteczności oddziaływania promieniowania laserowego, cięcie materiałów często odbywa się w obecności gazu: aktywnego (tlen), obojętnego (azot, powietrze, argon). Gaz jest potrzebny do spełniana następnych zadań: ochrona powierzchni soczewki ogniskującej przed powstającymi podczas cięcia parami materiału, wydalanie wytworzonych par z powstającej podczas cięcia szczeliny, utlenianie materiału (szczególnie przy cięciu metali), ochrona brzegów szczeliny przed wpływem atmosfery, chłodzenie brzegów materiału, w przypadku materiałów łatwopalnych, zabezpieczanie materiału przed zapaleniem

W cięciu laserowym, wiązka laserowa jest skierowana w stronę powierzchni czołowej przedmiotu w obszarze cięcia, gdzie następuje absorpcja wiązki laserowej poprzez cienką warstwę stopionej powierzchni. Stopień odbicia promieniowania laserowego przez stopioną warstwę zależy od kąta padania wiązki laserowej, płaszczyzny polaryzacji promieniowania laserowego i właściwości odbicia stopionego materiału. W procesie cięcia właściwości odblaskowe na powierzchni stopionej pozostają praktycznie stałe, a kąt padania i płaszczyzna polaryzacji powinny być sterowane z wysoką dokładnością.

2. CEL PRACY

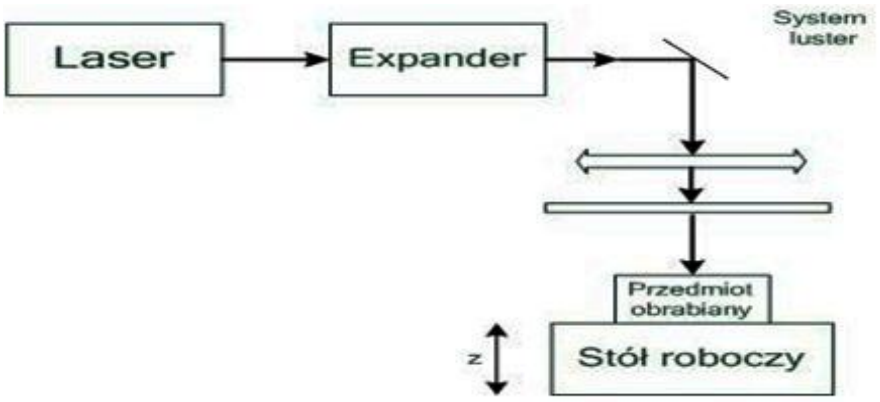
Celem pracy jest zaprojektowanie, oraz opracowanie wytycznych do montażu tłumika mocy lasera i oprzyrządowania do sterowania stanem polaryzacji wiązki laserowej. Opracowanie koncepcji i wykonanie zintegrowanego oprzyrządowania do oświetlenia pola obróbki laserowej oraz zapobieganie niepożądanemu wpływowi plazmy na obróbkę.

3. OPIS STANOWISKA

Stanowisko badawcze jest zaprezentowane na rys. 1. Laser emituje wiązkę laserową, która przechodzi poprzez ekspander. Ekspander służy do zwiększenia średnicy wiązki laserowej. System luster służy do nakierowania wiązki do pola obróbki. Filtr zabezpiecza soczewkę przed produktami spalania oraz uniemożliwia powrót odbitej wiązki laserowej z powrotem do rezonatora. Poniżej są opisane główne elementy wchodzące w skład stanowiska.

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

1. Laser- Laser Patara (model PA-016-QTG) firmy Northop Grumman Cutting Edge Optronics. Jest to zupełnie nowy półprzewodnikowy (DPSS) laser, który jest oferowany z maksymalną 20 watową mocą wyjściową. Jest wytrzymały, solidny i łatwo integruje się z oryginalnym wyposażeniem. Laser Patara idealnie nadaje się do zastosowania w produkcji przemysłowej. Kształt wiązki jest okrągły > 90% – dzięki czemu idealnie nadaje się do zastosowań w mikroobróbce precyzyjnej.
2. Ekspander posiada dwie soczewki, które mają ogniskową na odległości od 2 metrów. W tego typu ekspanderach aberrację wiązki może być całkowicie zrekompensowana w jednym punkcie. Ekspander może być dostosowany do dowolnej długości fali z zakresu 450–2000 nm.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego do obróbki laserowej (opracowanie własne)

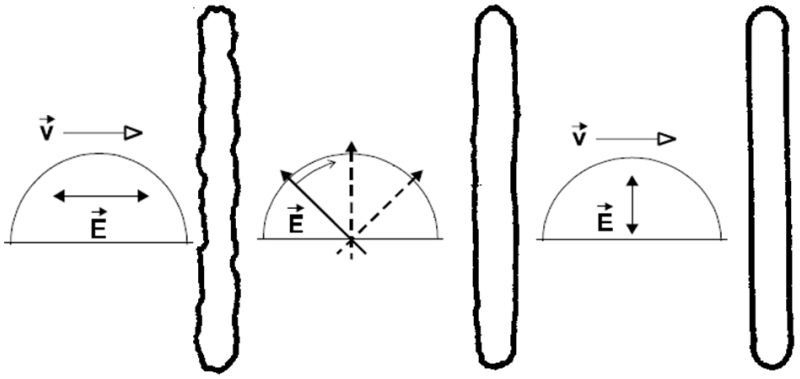
4. POLARYZATOR I TŁUMIK OPTYCZNY

4.1. Polaryzator

Żeby uzyskać przy wycinaniu laserowym wysoką dokładność obrabianego materiału o skomplikowanym kształcie musi wystąpić dostosowanie wektora pola elektrycznego i magnetycznego oddziaływających w strumieniu światła, do kierunku ruchu tego strumienia. Światło składa się z dwóch pól: elektrycznego i magnetycznego. W procesie oddziaływania na pola elektryczne i magnetyczne okazało się, że łatwiej steruje się polem elektrycznym. W związku z tym istnieją trzy sposoby wycinania wiązką laserową [4, 5].

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

Pierwszy sposób, gdy wektor poła elektrycznego jest równoległy do ruchu wiązki laserowej. Wtedy jakość krawędzi jest najgorsza. Drugi, gdy wektor pola elektrycznego obraca się, wtedy uzyskuję się średnią jakość krawędzi. Trzeci sposób jest najdokładniejszy, jest to sposób, w którym wektor pola elektrycznego jest prostopadły do wektora ruchu wiązki. Trzeci sposób łatwo można stosować przy cięciu części prostych, łatwych do wykonania, zaś przy wykonaniu części o złożonej formie (np. ślimak) natykamy się na problem. Żeby cały czas mieć wysoką jakość musielibyśmy obracać laserem żeby mieć kąt prosty pomiędzy wektorami ruchu wiązki i pola elektrycznego, co jest trudne do zrealizowania. Jeżeli nie będziemy obracać to w niektórych częściach obrabianego przedmiotu będą występować krawędzie o bardzo niskiej jakości, co spowoduje dodatkową obróbkę przedmiotu.



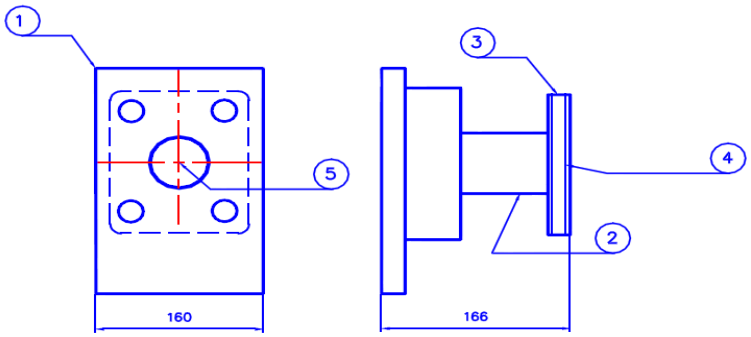
Rys. 2. Wyniki cięcia wiązka laserową przy wybranych rodzajach polaryzacji [3]

W takich przypadkach najlepiej zastosować drugi sposób. Żeby realizować ten sposób musi być zastosowana płytka ćwierćfalowa polaryzatora, która pomoże zmieniać kierunek wektora pola elektrycznego wykorzystując proces polaryzacji. Płytka ćwierćfalowa (ćwierćfalówka) – przezroczysta płytka, po przejściu przez którą światło może zmienić swoją polaryzację. Na drodze równej grubości płytki światło o kierunku polaryzacji zgodnym z kierunkiem osi szybkiej wyprzedza światło o kierunku polaryzacji zgodnym z kierunkiem osi wolnej o ćwierć długości fali (stąd nazwa). Aby umożliwić obracanie płytki ćwierćfalowej o potrzebny kąt został zaprojektowany polaryzator [3].

Polaryzator zastosowany w projekcie stanowiska składa się z następujących elementów:

1. blok łożyskujący
2. tuleje dystansowe z tworzywa z obustronnym gwintem wewnętrznym
3. koło zębate
4. element przekładni (pasek)
5. płytka ćwierćfalowa.

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/



Rys. 3. Shemat polaryzatora (opracowanie własne)

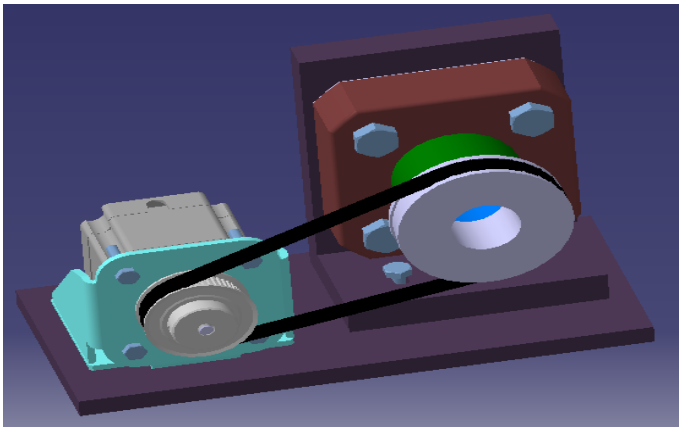
Blok łożyskujący służy do mocowania śrub kulowych i prętów, tak by zapewnić ich precyzyjne i sztywne prowadzenie. Dzięki zamontowanym w bloku łożyskom możliwe jest przenoszenie złożonych obciążeń promieniowych jak i osiowych we wszystkich kierunkach. Precyzyjne koło zębate zapewnia dużą dokładność pracy oraz niewielkie luzy na kolejnych stopniach przekładni. Zębatki są wykonane z aluminium, które zapewnia wysoką odporność na ścieranie oraz sztywność. Koło posiada nawiercony otwór na oś oraz nagwintowane otwory montażowe. Tulejka dystansowa gwintowana posiada kształt walcowy i jest wykonana z poliamidu. Temperaturowy zakres pracy od –20 do 140°C. Obustronny gwint wewnętrzny jest wykorzystany z jednej strony do zamocowania koła zębatego, z drugiej strony płytki ćwierćfalowej. Elementem przekładni wykorzystanym w projekcie stanowiska jest pasek zębaty. Zęby ukształtowane na wewnętrznej powierzchni pasa i odpowiednie zęby koła pasowego umożliwiały pracę przekładni bez poślizgu. Grzbiet pasa wykonany z elastycznej mieszanki polichloroprenowej, która chroni cięgno przed ewentualnym szkodliwym działaniem czynników zewnętrznych. Zęby podobnie jak grzbiet, wykonane z mieszanki polichloroprenowo-gumowej, która gwarantuje dużą odporność na ścinanie. Kord (cięgno) jest wykonane ze wzmocnionych, splecionych przeciwstawnie parami kordów z włókna szklanego. Takie cięgna charakteryzują się dużą wytrzymałością na rozciąganie, bardzo dużą elastycznością i bardzo małym wydłużaniem[8].

Do obracania koła zębatego zamocowanego na polaryzatorze jest zastosowany silnik krokowy. Hybrydowy silnik wykorzystany w projekcie charakteryzuje się stosunkowo dużym momentem w porównaniu do swoich rozmiarów. Tego rodzaju silniki znajdują zastosowanie tam, gdzie ważniejsza od dynamiki jest pewność zachowania dużej siły przy małej wykorzystywanej przestrzeni. Podstawowe cechy charakterystyczne:

1. silnik 2 fazowy z krokiem 1,8º ± 5%,
2. podwyższony moment do 0,42 Nm,
3. temperatura pracy 0 ~ +400°C,
4. klasa izolacji B.

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

Aby sterować skonstruowanym polaryzatorem jest wykorzystywany mikrokrokowy, trzyosiowy sterownik silników krokowych STC102. Jest on przeznaczony do sterowania małych i średnich silników krokowych dwufazowych. Dzięki zintegrowanemu zasilaczowi sterownik wymaga jedynie zewnętrznego transformatora i podania odpowiednio dla każdej osi sygnałów sterujących, co wpływa na znaczne zmniejszenie skomplikowania układu w porównaniu do rozwiązania zbudowanego z trzech niezależnych końcówek mocy i zasilaczy. Sterownik domyślnie posiada aktywny sygnał ENABLE, co umożliwia sterowanie tylko sygnałami Kroku i Kierunku. Dzięki możliwości podbijania wartości prądu przy sterowaniu mikrokrokowym, sterownik zapewnia zachowanie dynamiki i mocy w odniesieniu do sterowania pełnokrokowego, przy jednoczesnym zmniejszeniu niekorzystnego wpływu rezonansów silnika. Miksowany tryb wygaszania prądu wpływa na zwiększenie kultury pracy silnika, jak i zmniejszenie strat mocy [9].



Rys. 4. Polaryzator wykonany w CATIA V5
(opracowanie własne)

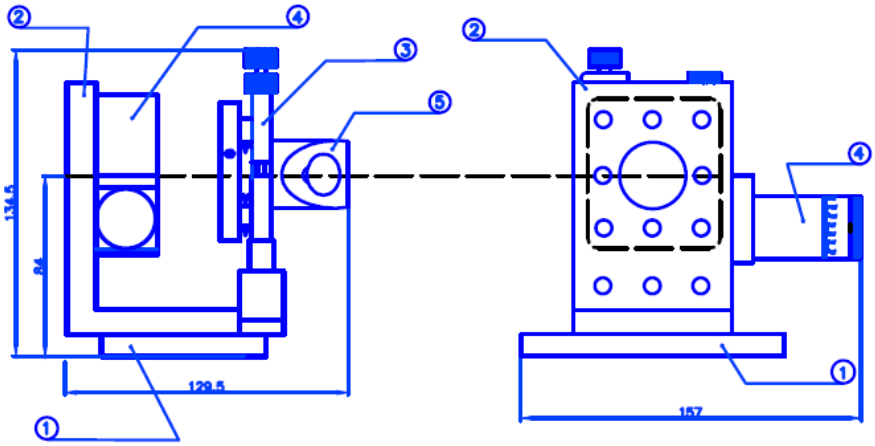
4.2. Tłumik optyczny

Tłumik optyczny to urządzenie przeznaczone do kontrolowania i sterowania mocy transmitowanego sygnału. W tym celu tłumik należało umieścić w torze optycznym. Po przejściu przez ten element możliwa jest zmiana intensywności bez zmian innych parametrów wiązki, możliwe jest zmniejszenie mocy optycznej do poziomu potrzebnego w pewnym zakresie pracy. Proces ten odbywa się poprzez absorpcję, rozproszenie lub odbicie fotonów. Tłumik pozwala na dostosowanie kąta padania i uzyskaniu maksymalnego kontrastu polaryzacji. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi tłumik optyczny są: dokładność tłumienia, moc wyjściowa, zakres częstotliwości, współczynnik odbicia [8].

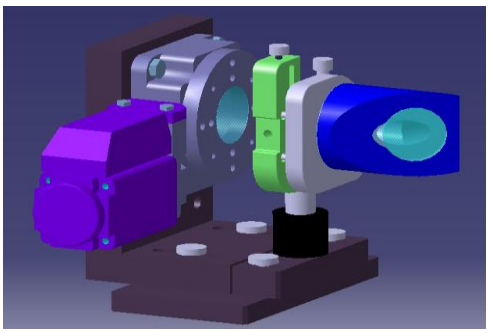
http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

Tłumik zastosowany w projekcie stanowiska składa się z następujących elementów:

1. podstawa z możliwością precyzyjnego pozycjonowania,
2. adapter optyczno-mechaniczny,
3. precyzyjny uchwyt optyczno-mechaniczny,
4. obrotowa podstawa zintegrowana z silnikiem elektrycznym,
5. adapter do okrągłego polaryzatora o kącie 56 stopni.



Rys. 5. Schemat tłumika optycznego
(opracowanie własne)

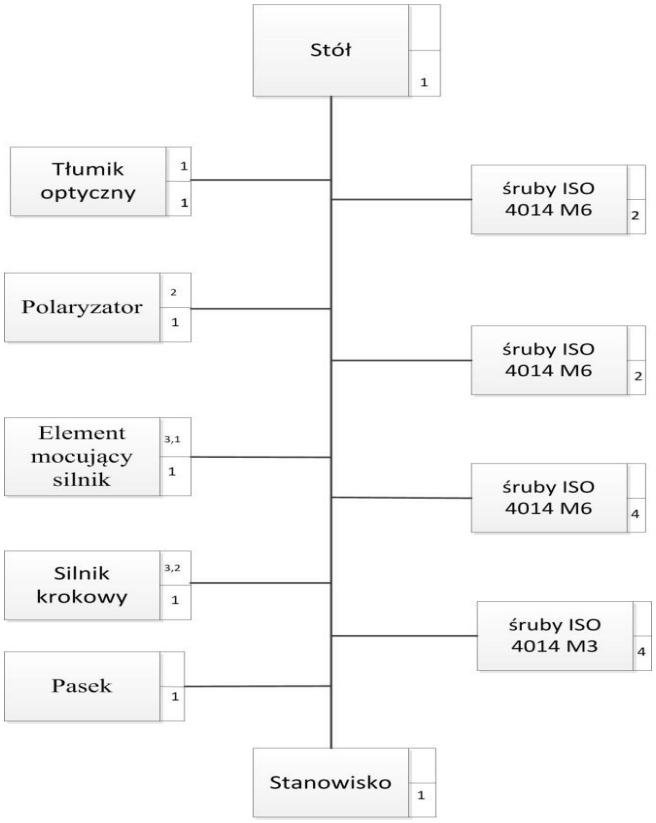


Rys. 6. Tłumik optyczny wykonany w CATIA V5
(opracowanie własne)

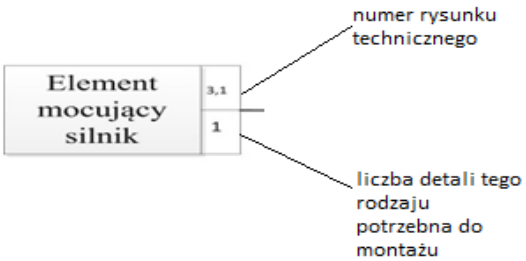
Adapter nadaje się do cienkich okrągłych polaryzatorów laserowych filmowych o kącie 56 stopni. Optyka jest mocno trzymana przez plastikową śrubę mocującą. Optyka o średnicy 21,0-25,5 mm i grubości 2-6 mm może być zabezpieczona plastikowymi śrubami. Duży wspornik kątowy posiada gwintowane otwory M6 25 mm.

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

Szczeliny w podstawie umożliwiają ruch wzdłużny. Ortogonalne powierzchnie modeli są prostopadłe w ciągu 0,015 mm. Adapter jest wyposażony w pierścienie o średnicy Ø25,4 mm (1 cal). Posiada kinematyczną konstrukcję. Wartość tilt / tip w zakresie ± 2°.Czułość adaptera wynosiła 3 arcsec. Są dwa otwory obok toru optycznego przeznaczone pod śruby regulacyjne. Są to śruby z 0,25 mm skokiem. Podstawa obrotowa posiada kąt obrotu 360° z 0,6 arcmin. rozdzielczości. Mimośród 10 µm [9].

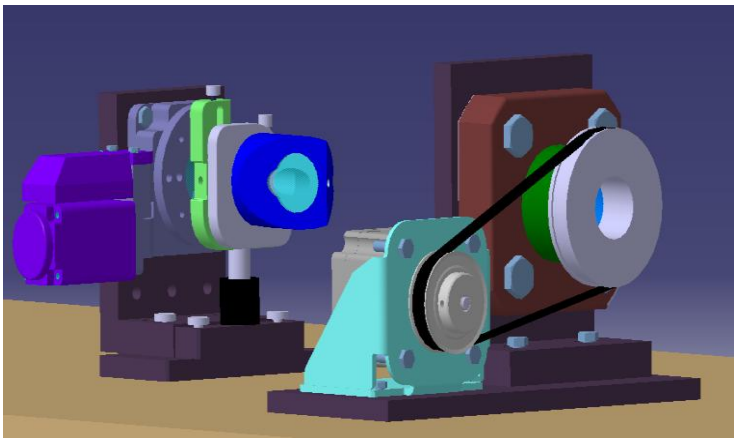


gdzie:



Rys. 7. Schemat montażu stanowiska wykonany w Visio (opracowanie własne)

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/



Rys. 8. Widok stanowiska (opracowanie własne)

Posiadając dane podstawowe, I = 1,5 A; U = 12 V; M = 0,35 Nm; d1 = 20 mm; d2 = 64 mm; α1 = 1,8°. obliczono moc prądu elektrycznego silnika krokowego przy pomocy natężenia prądu i napięcia elektrycznego.

$$P = U \times I$$

$$\mathrm{P} = 1{,}5\,\mathrm{A} \times 12\,\mathrm{V} = 18\,\mathrm{V} \times \mathrm{A} = 18\,\mathrm{W}$$

gdzie:
P – moc urządzenia,
U – napięcie elektryczne,
I – natężenie prądu.

Następnie wyliczono ilość obrotów dla silnika przy pomocy danych o mocy prądu i momentu siły.

$$\mathrm{M[Nm]} = \frac{\mathrm{P[W]}}{\mathrm{w_1}[\mathrm{obr}/\mathrm{min}]} = \frac{\mathrm{P}}{\frac{2\pi\pi_1}{60}}$$

$$0{,}35 = \frac{18 \times 30}{3{,}14 \times \mathrm{n_1}}$$

$$\mathrm{n_1} = 491\mathrm{obr}$$

gdzie:
P – moc urządzenia,
M – moment obrotowy,
w – prędkość kątowa.

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

Została obliczona prędkość kątowa.

$$w_1 = \frac{2\pi}{60} n_1 = 51{,}4 \, {obr}/{\min}$$

gdzie:
w – prędkość kątowa,
n – liczba obrotów.
Następnie wyliczono przełożenie.

$$i_{12} = \frac{w_1}{w_2}$$
$$v = w_1 \times r_1$$
$$v = w_2 \times r_2$$
$$w_1 = \frac{2v}{d_1}$$
$$w_2 = \frac{2v}{d_2}$$
$$i_{12} = \frac{2v}{d_1} \div \frac{2v}{d_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{64}{20} = \frac{16}{5}$$

gdzie:
w – prędkość kątowa,
d– średnica koła zębatego,
r – promień koła zębatego,
v – prędkość liniowa.

Następnie wyliczono ilość obrotów dla polaryzatora.

$$i_{12} = \frac{n_1}{n_2}$$
$$\frac{16}{5} = \frac{491}{n_2}$$
$$n_2 = 153 obr$$

gdzie:
n – liczba obrotów.

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

Następnie wyliczono prędkość kątową dla polaryzatora.

$$w_2 = \frac{2\pi}{60} n_2 = \frac{3{,}14}{30} \times 153 = 16 \, {}^{obr}\!/_{\min}$$

gdzie:
n – liczba obrotów,
w – prędkość kątowa.

Obliczono prędkość.

$$v = w_2 \times r_2 = 16 \times 32 = 512 \, {}^{mm}\!/_{\min} = 0{,}512 \, {}^{m}\!/_{\min}$$

gdzie:
w – prędkość kątowa,
r – promień koła zębatego,
v – prędkość liniowa.

Obliczono długość łuku przy obrocie silnika o jeden krok.

$$L = \frac{\pi \times r_1 \times \alpha_1}{180} = \frac{3{,}14 \times 10 \times 1{,}8}{180} = \frac{3{,}14}{10} = 0{,}314 mm$$

gdzie:
r – promień koła zębatego,
L – długość łuku.

Następnie wyliczono kąt obrotu koła zębatego w polaryzatorze przy obrocie silnika o jeden krok.

$$L = \frac{\pi \times r_2 \times \alpha_2}{180}$$

$$0{,}314 = 0{,}56 \times \alpha_2$$

$$\alpha_2 = 0{,}56^{\circ}$$

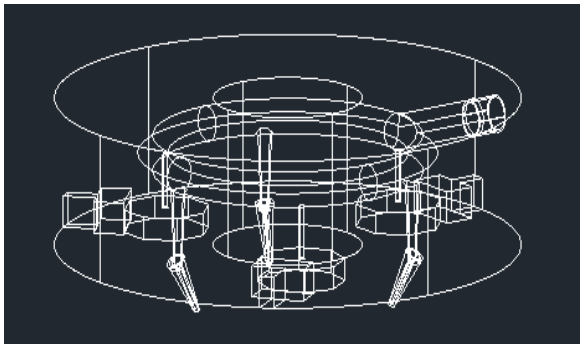
gdzie:
r – promień koła zębatego,
L – długość łuku.

Kolejną częścią pracy jest rozwiązanie problemu powstawania obłoku plazmowego i zmniejszenie strat mocy przy obróbce. Przy gęstości mocy około 10^7 W/cm^2 może powstawać plazma o temperaturze rzędu tysięcy K. Ze wzrostem długości czasu oddziaływania promieniowania na materiał wartość gęstości energii wywołującej tworzenie się plazmy obniża się i dla promieniowania ciągłego wynosi około 10^6 W/cm^2. Znajdująca się wewnątrz kanału parowego plazma ma pozytywny udział

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

w procesie spawania absorbując energię i przekazując ją do ścianek kanału. Pojawiający się nad wejściem kanału obłok plazmowy ma działanie negatywne, gdyż pochłonięta przez niego energia nie bierze udziału w procesie spawania i rozpraszana jest na zewnątrz [6]. Współczynnik pochłaniania w plazmie osiąga wartości p = 3 cm – 1. Obłok plazmowy o grubości d pochłonie część energii wiązki padającej równą 1 – exp (-μd). Dla d = 0,5 cm wartość ta wyniesie 78%. Oznacza to, że obłok plazmowy o grubości kilku milimetrów może całkowicie zablokować wiązkę [7]. Najprostszym sposobem uniknięcia powstawania obłoku plazmowego jest zainstalowanie systemu dysz doprowadzających gaz do ogniskowej wiązki laserowej znajdującej się na powierzchni obrabianego materiału, które spowodowało wydmuchiwanie stopionego metalu. W przypadku dużej mocy lasera, sposobem uniknięcia generacji obłoku plazmowego jest zastąpienie powietrza argonem (potencjał jonizacji 15,75 eV) albo gazem o jeszcze wyższym potencjale jonizacji, czyli helem (24,58 eV) [1, 2, 4].

W programie AutoCAD wykonany rysunek 3D, który został wykorzystany przez drukarkę przestrzenną. Model 3D łączył w sobie system wentylacyjny i oświetlenie. Jest to spowodowane małą przestrzenią pomiędzy soczewką a stołem roboczym.



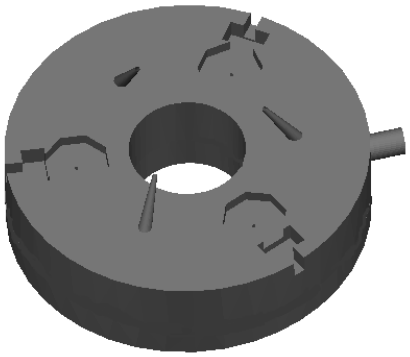
Rys. 9. Widok 1 systemu wentylacyjnego i oświetlenia
(opracowanie własne)

Detal został zaprojektowany tak, żeby tam można było zamontować trzy matryce diód, które by pozwoliły na równomierne oświetlenie stołu roboczego. Do każdej diody była doprowadzona rurka wentylacyjna, która chłodziła prostownik, który zmieniał prąd zmienny na stały oraz samą matrycę diód.

Na dolnej części modelu znajdują się trzy dysze, które są nakierowane dokładnie na ogniskową soczewki, przez którą przechodzi wiązka laserowa. Powietrze jest doprowadzane do modelu przez rurkę, która znajduje się z boku. Powietrze z detalu jest doprowadzane do obrabianego materiału poprzez dysze żeby zwiększyć ciśnienie powietrza, które pozwoli polepszyć proces obróbki.

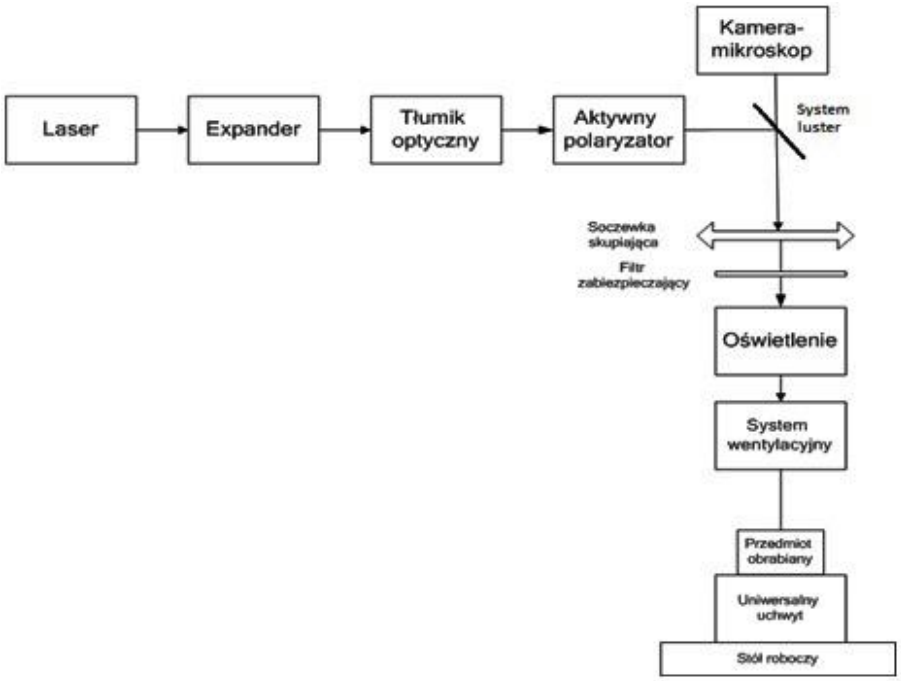
Ostateczny schemat stanowiska badawczego do obróbki laserowej przedstawiono na rys. 12.

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/



Rys. 10. Widok 2 systemu wentylacyjnego i oświetlenia (opracowanie własne)

Rys. 11. Widok 3 systemu wentylacyjnego i oświetlenia (opracowanie własne)



Rys. 12. Schemat stanowiska badawczego do obróbki laserowej (opracowanie własne)

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

5. WNIOSKI

Sterowanie laserową wiązką jest trudnym zadaniem inżynierskim, które trzeba rozwiązywać dla każdego lasera osobno. W tej pracy przedstawiony jest jeden ze sposobów rozwiązania tego zadania dla lasera Patara Laser model PA-016-QTG. Żeby zrealizować to zadanie trzeba było rozwiązać parę problemów inżynierskich: zaprojektować stanowisko, obliczyć potrzebne wartości do dalszej pracy, zaprojektować stanowisko w 2D, opisać proces montażowy przy pomocy rysunków, następnie zaprojektować stanowisko w 3D, obliczyć podstawowe wartości takie jak: kąt obrotowy, jeden krok silnika, kąt nachylenia dysz, ogniskową soczewki i td. Sterowanie i kontrolowanie procesem obróbki zostało wykonane przy pomocy stanowiska składającego się z: lasera, ekspandera, tłumika optycznego, aktywnego polaryzatora, kamery-mikroskopu, systemu luster, soczewki skupiającej, filtra zabezpieczającego, zintegrowanego systemu dysz i oświetlenia, uchwytu uniwersalnego, stołu roboczego. Dzięki zastosowaniu kamery i komputerem współdziałających za pomocą oprogramowania LabVIEW jak również i systemu oświetlenia możliwe jest kontrolowanie procesu obróbki laserowej. Dzięki zastosowaniu systemu dysz możliwe jest zmniejszenie niepożądanego wpływu plazmy na jakość obrabianej powierzchni i zaoszczędzenie energii elektrycznej. Dzięki zastosowaniu tłumika optycznego możliwa jest kontrola mocy wiązki laserowej w trakcie trwania procesu. Dzięki zastosowaniu polaryzatora optycznego możliwe jest aktywne ustawianie położenia wektora natężenia pola elektrycznego, podczas trwania procesu wycinania laserowego. Zwiększenie wydajności procesu obróbki osiągnięto poprzez precyzyjną obróbkę materiałów trudnoskrawalnych, co pozwala ograniczyć obróbkę wykańczającą do minimum oraz zaoszczędzić czas na przestawianie lasera i obracanie przedmiotu obrabianego.

LITERATURA

[1] Hoffman J., Pochłanianie promieniowania laserowego w procesie spawania, PAN – Katowice 2000.
[2] Radziejewska J., Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem, Warszawa 2011.
[3] Wyszyński D., Skoczypiec S., Grabowski M., Ruszaj A., Lipiec P., Electrochemical microprocessing assisted by diode pumped solid state Nd:YAG pulse laser, Journal of Machine Engineering, 2012.
[4] Dubik A., Zastosowanie laserów, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1991.
[5] Jóźwicki R., Optyka laserów, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981.
[6] Ready A., Effects of High-Power Radiation, Academic Press, New York 1971.
[7] Ready J.F., LIA Handbook of Laser Materials Processing, Magnolia Publishing Inc., 2001.
[8] Liaushuk A., Wyszyński D., Projektowanie modułu do sterowania polaryzacją wiązki laserowej, Физика конденсированного состояния, 2013.

http://zeszyty.fem.put.poznan.pl/

Źródła internetowe

[9] www.wobit.com.pl (dostęp 10.12.2014).

MODIFICATION OF A LASER PROCESSING WORKSTATION, ENHANCING PRODUCTIVITY AND QUALITY OF PROCESSING

Summary

The article dwells on several issues connected with creating a research facility for investigating laser processing of materials. The facility is based on the Patara PA-016-QTG laser. Creating this research facility was connected with developing the visualization of systems controlling laser beam polarization in the process of laser cutting, and creating the complex equipment for illuminating the field of laser processing, and for preventing the unwanted effect of plasma on the processed surface. The concept solutions obtained in the development process are presented together with the author's calculations and extracts from the technical documentation which appeared in the process of their production.

Keywords: processing, laser, polarization, plasma, quality.