

Maksymilian SIDOROWICZ, Jacek REINER, Tomasz BARANIECKIPOLITECHNIKA WROCLAWSKA, ITMA,
ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław**Pomiary i diagnostyka wiązki laserowej jako narzędzia wytwarzania****Mgr inż. Maksymilian SIDOROWICZ**

Ukończył Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej na specjalności Optokomunikacja (2007). Pracuje w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyki Politechniki Wrocławskiej. Odbył staż naukowy w Instytucie Fraunhofera IWS w Dreźnie (2009). Zajmuje się technologiami laserowymi w przemyśle wytwórczym. Zainteresowania szczególnie to monitorowanie i kontrola procesów zdalnej obróbki laserowej, diagnostyka jakości procesów obróbki laserowej i jakości wiązki oraz bezpieczeństwo laserowe.

e-mail: maksymilian.sidorowicz@pwr.wroc.pl

**Dr inż. Tomasz BARANIECKI**

Ukończył Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej na specjalności Optoelektronika i technika światłowodowa (2000). Po ukończeniu studiów podjął pracę w Institut fuer Hochfrequenztechnik na Technische Universitaet Braunschweig (Niemcy). Tam też obronił doktorat, którego celem były badania nad laserami światłowodowymi (2006). Po powrocie do kraju rozpoczął pracę na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej, gdzie zajmuje się zastosowaniami przemysłowymi laserów wysokiej mocy.

e-mail: tomasz.baraniecki@pwr.wroc.pl

**Dr inż. Jacek REINER**

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (1995). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (2003). Zatrudniony na stanowisku adiunkta na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Jego główne zainteresowania naukowe dotyczą optomechaniki a w szczególności systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania oraz przemysłowych technologii laserowych. Prowadzi projekty R&D szczególnie dla przemysłu motoryzacyjnego i medycyny.

e-mail: jacek.reiner@pwr.wroc.pl

**1. Laser jako narzędzie**

W przypadku klasycznej obróbki mechanicznej sam proces zachodzi jako zestaw oddziaływań mechanicznych wynikających z bezpośredniej styczności narzędzia i materiału. Jednymi z podstawowych parametrów definiujących jakość narzędzia są tutaj jego cechy geometryczne. W celu poznania i nadzorowania tych wielkości przeprowadza się systematyczne i znormalizowane pomiary. Umożliwiają one monitorowanie procesu zużywania się narzędzia i rozwoju wad, co znacząco wpływa na utrzymanie stałej jakości produkcji. Przykładem mogą być pomiary geometryczne narzędzi skrawających, gdzie wyznaczane są m.in.: kąt ostrza, kąt wierzchołkowy, kąt przyłożenia, promień ostrza jak też współrzędne położenia wierzchołka narzędzia [1]. Analogiczne cele pomiarów i diagnostyki towarzyszą narzędziom laserowym – wiązce promieniowania.

Lista przemysłowych zastosowań laserów dynamicznie się rozwija. Obecnie największe sektory przemysłu wytwórczego dla aplikacji laserowych to obróbka metali, znakowanie i grawerowanie, półprzewodniki, ogniwa fotowoltaiczne i mikroobrobka [2]. Laser w obróbce występuje zarówno jako wsparcie dla innych procesów, np. skrawania [3], jak i samodzielne narzędzie obróbkowe realizując m.in.: cięcie, spawanie, drążenie, obróbkę powierzchniową, ablację, hartowanie, grawerowanie itp. [4]. W zależności od rodzaju procesu obróbkowego realizowanego przez system laserowy koniecznym jest prawidłowy dobór źródła laserowego oraz układu optycznego. Jest to zdeterminowane optymalnym dopasowaniem parametrów wiązki laserowej do charakterystyki interakcji obrabianego materiału z koherentną wiązką promieniowania świetlnego. Parametry o których mowa powinny być utrzymywane możliwie blisko swojego optimum przez cały czas eksploatacji narzędzia laserowego ze względu na ich silny wpływ na jakość wytwarzania..

Taka potrzeba zaowocowała opracowaniem metod pomiarowych, wprowadzeniem międzynarodowych norm porządkujących systematykę tych metod i definicji parametrów wiązki laserowej – ISO 11146 oraz wytworzeniem specjalistycznej i precyzyjnej aparatury pomiarowej.

2. Parametry wiązki laserowej podstawowe dla wytwarzania

Podstawowy parametr promieniowania laserowego to długość fali λ . Powinna ona być dopasowana do maksymalnego pochłaniania promieniowania przez materiał obrabiany. Doboru dokonuje się bazując na spektrum absorpcyjnym materiału mając świadomość, że akcje laserowe poszczególnych typów laserów zachodzą na ściśle określonych liniach spektralnych wynikających z budowy molekularnej medium aktywnego [5]. Dostępne lasery przemysłowe silnie zawężają możliwy wybór. Zestawienie zakresów długości fal dla najpopularniejszych laserów w wytwarzaniu przedstawia tab. 1.

Streszczenie

Omówiono podstawowe dla jakości procesu parametry wiązki laserowej takie jak: długość Rayleigha; przewężenie wiązki; współczynniki jakości K , M^2 i BPP; rozkład gęstości mocy oraz kaustykę. Opisano metody pomiarowe wiązek dużej mocy bazujące na wirującej igle pomiarowej oraz akwizycji obrazu przez matrycę CCD/CMOS. Przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych aparaturą FocusMonitor firmy Primes dla systemów obróbkowych wyposażonych m.in. w lasery: diodowy 4 kW, dyskowy 2 kW oraz gazowy CO_2 2 kW. Przeanalizowano uzyskane wyniki oraz powtarzalność pomiarów. Pokazano charakterystyczne problemy będące skutkiem aberracji w torze optycznym - astygmatyzm wiązki i zjawisko "focus shift" oraz omówiono najczęstsze wady systemów laserowych.

Słowa kluczowe: pomiar wiązki laserowej, parametry wiązki laserowej, obróbka laserowa.

Measurements and diagnostics of a laser beam as a manufacturing machine tool**Abstract**

Laser beam as a machine tool for manufacturing has to keep its parameters just as classic mechanical machine tools. The paper describes the following laser beam parameters essential for processing quality: Rayleigh length; beam waist; K , M^2 and BPP beam quality factors; power density distribution and beam caustic [2]. The main parameters are presented in Fig. 1. Actual measurement methods for the listed above laser beam parameters that comply with the ISO 11146 recommendations are described. That concerns scanning the laser beam with a rotating tip [9] as a first method and acquiring the image of the laser beam intensity distribution projected on the CCD or CMOS photosensitive matrix [10] as a second method. Principles of both methods are shown in Fig. 2. Different laser machine systems equipped with, i.a.: 4 kW diode laser, 2 kW disc laser, 2kW CO_2 laser has been measured by Primes FocusMonitor and analysed (Tab. 2) The measurement repeatability has been calculated for a specified setting of a P=1 kW disc laser beam emission and presented in Tab. 3. Characteristic problems caused by optical path aberrations – astigmatism (Fig. 4) and focus shift (Fig. 5) as well as other common laser systems failures are discussed.

Keywords: laser beam measurements, laser beam parameters, laser processing.

Tab. 1. Długości fal promieniowania dla komercyjnie dostępnych przemysłowych generatorów laserowych

Tab. 1. Laser emission wavelengths of commercially available industrial laser generators

typ lasera ¹	CO ₂	Nd:YAG ²	dyskowy Yb:YAG	diodowy	światłowodowy ³
dł. fali λ [nm]	10600	1064; 532; 355	1030	780 – 1030	1053; 1060; 1064; 1080

¹ – Zgodnie ze zwyczajowym nazewnictwem przyjętym w przemyśle.

² – Kolejne wartości to harmoniczne generowane na kryształach nieliniowych (SHG i THG).

³ – Lista podanych dł. fal może być niekompletna ze wzgl. na dynamiczny rozwój l. światłowodowych.

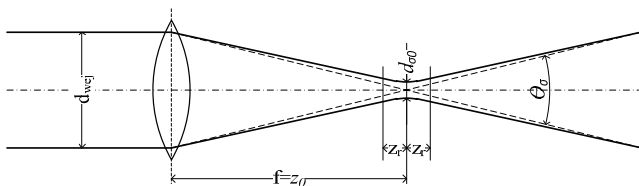
Pozostałe parametry definiujące podstawową specyfikę światła o strukturze koherentnej:

- moc wiązki, a w przypadku l. impulsowych – energia wiązki,
- średnica wiązki skolimowanej,
- polaryzacja,
- kąt rozbieżności wiązki dla pola dalekiego θ_σ .

Promieniowanie laserowe dopiero po przejściu przez system doprowadzenia wiązki i optykę ogniskującą staje się użytecznym narzędziem wytwarzania. Część parametrów możliwa jest do zdefiniowania jedynie dla takiego zestawienia [2, 6, 7]. Są to:

- położenie przewężenia wiązki z_0 ,
- średnica przewężenia wiązki $d_{\sigma 0}$,
- rozkład gęstości mocy wiązki skupionej, a dla laserów impulsowych rozkład gęstości energii,
- kaustyka wiązki,
- parametry jakościowe wiązki: K , M^2 , BPP ,
- długość Rayleigh'a z_r .

Poniżej zdefiniowano najważniejsze z wymienionych parametrów. Dla zachowania przejrzystości opisu przyjęto przypadek szczególny wiązki o symetrii promieniowej zgodnie z PN-EN ISO 11146.



Rys. 1. Schemat ideowy obrazujący wybrane parametry wiązki laserowej
Fig. 1. Schematic diagram representing chosen laser beam parameters

Średnica przewężenia wiązki: Jest to średnica wiązki $d_{\sigma 0}$ znajdująca się w przewężeniu wiązki wyznaczanym wzdłuż osi propagacji wiązki z . Jej ogólne równanie to:

$$d_\sigma(z) = 2\sqrt{2}\sigma(z), \quad (1)$$

gdzie moment drugiego rzędu funkcji rozkładu gęstości mocy $E(x,y,z)$ wiązki w położeniu z wyraża

$$\sigma^2(z) = \frac{\iint r^2 E(r,z) r dr d\varphi}{\iint E(r,z) r dr d\varphi}, \quad (2)$$

gdzie r jest odległością od centroidy (\bar{x}, \bar{y}) , której współrzędnymi są momenty pierwszego rzędu [7].

Jakość wiązki: Definiowana w literaturze przez trzy zależne od siebie wielkości. Zgodnie z nazewnictwem ISO wyróżnia się współczynnik propagacji wiązki K i parametr jakości wiązki M^2 . Spotyka się także parametr BPP (ang. *beam parameter product*). Są one definiowane następująco:

$$M^2 = \frac{1}{K} = \frac{\pi}{\lambda} \frac{d_{\sigma 0} \theta_\sigma}{4}, \quad (3)$$

$$BPP = M^2 \frac{\lambda}{\pi}. \quad (4)$$

Kąt rozbieżności θ_σ : Dla wiązki z symetrią promieniową jest to kąt rozchodzenia się wiązki zawarty w dowolnej płaszczyźnie przekroju wzdłużnego wiązki między jej przeciwległymi liniami obwodni. Kąt θ_σ powinien być wyznaczany dla pola dalekiego, tj. z odległości większej od $10 z_r$ [6].

Długość Rayleigh'a z_r : Jest to odległość wzdłuż osi z od przewężenia wiązki do płaszczyzny w której średnica wiązki zwiększa się o $\sqrt{2}$ w stosunku do $d_{\sigma 0}$. Definiuje ona obszar pola bliskiego, czyli głębi ostrości. Wyraża się zależnością

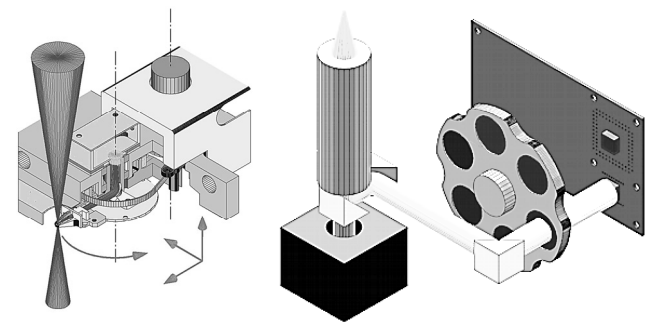
$$z_r = \frac{4\lambda M^2 f}{\pi d_{\sigma 0}}, \quad (5)$$

gdzie f to ogniskowa skupiającego układu optycznego [2].

Kaustyka wiązki: Jest to hiperpowierzchnia będąca obwodnią wiązki. W najczęstszym przypadku mówi się o kaustyce wokół przewężenia wiązki skupionej. Nazwą przyjętą w [7] jest *dopasowanie hiperboliczne* do średnic wiązki wyznaczonych zgodnie z drugimi momentami. W celu dokonania dopasowania hiperbolicznego norma zaleca wykonanie co najmniej 10 pomiarów średnic wiązki z czego 5 z nich powinno się znaleźć w odległości od przewężenia mniejszej niż z_r .

3. Metody pomiarowe

Początkowo analiz wiązki wysokiej mocy dokonywano przez tzw. próbę krzyżową lub przez wytopienie jej śladu w przezroczystym polimerze. Próba krzyżowa polega na ustawieniu w torze wiązki maski w postaci krzyża z drutu oraz papieru światłoczułego. Na skutek impulsu o wysokiej mocy i czasie trwania <50 ms na papierze powstaje obraz względnego rozkładu gęstości mocy. Na podobnej, prymitywnej, zasadzie można zgrubnie ustalić położenie ogniska wiązki. Badania oparte o wytopienie śladu w polimerze polegają na interpretacji geometrii 3D powstałego zagłębienia. Metoda wykorzystująca polimer stanowi zagrożenie dla zdrowia ze względu na uwalnianie się toksycznych gazów podczas próby. Może też prowadzić do zanieczyszczenia układu optycznego lasera [8]. Obie metody w ogóle nie spełniają normy PN-EN ISO 11146 m.in. z powodu niewystarczającej dokładności, niemożliwości wyznaczenia momentów 2. rzędu dla $E(x,y,z)$ i subiektywnej oceny wyniku przez operatora.



Rys. 2. Idea pomiaru wiązki przez: skanowanie wirującą igłą (z lewej), obrazowanie wiązki na matrycy półprzewodnikowej (z prawej) [PRIMES]

Fig. 2. The principle of a beam measurement by: spinning tip scanning (left), beam projection on a semiconductor matrix (right) [PRIMES]

Od lat 90' XX wieku rozpoczęto prace nad metodą pomiarową opartą o wirującą miedzianą igłą z nawierconym mikro otworkiem (ang. *pinhole*) o średnicy rzędu $10 \mu\text{m}$ odprowadzającym jedynie część promieniowania do detektora. Przykładowo wiązka laserowa o mocy 5 kW skupiona na powierzchni miedzianej do średnicy $200 \mu\text{m}$ potrzebuje ok. $100 \mu\text{s}$, by rozgrzać ją do setek K co zniszczyłoby igłę pomiarową. Dlatego pomiar odbywa się przez obroty skanowanie wiązki laserowej z prędkościami liniowymi większymi od 30 m/s [9]. Ideę rozwiązania przedstawia rys. 2. Ruchoma oś Z umożliwia pomiary rozkładu gęstości mocy

w wielu równoległych płaszczyznach wzdłuż osi optycznej; również w ognisku wiązki. Następnie obliczane są pozostałe parametry zgodnie z wytycznymi ISO.

Alternatywną metodą dla diagnostyki wiązki laserowej zgodnej z normą jest projekcja obrazu wiązki na matrycę CCD lub CMOS. Matryca nie może być jednak eksponowana na tak duże natężenie światła. Rozwiązaniem jest zastosowanie wielu absorberów i odsprężaczy wiązki oraz zestawu filtrów optycznych. Dzięki temu na powierzchni przetwornika powstaje obraz wiązki o intensywności 0,1% mierzonoego rozkładu gęstości mocy lub mniejszej. Głównym ograniczeniem metody jest powierzchnia pierwszej soczewki. Typowo maksymalna gęstość mocy na tej powierzchni nie może przekroczyć 10 MW/cm², a całkowita moc wiązki musi być niższa od 300 W [10]. Te zakresy można rozszerzyć odpowiednio do 10 GW/cm² i 10kW stosując zaawansowany układ optyczny z dodatkowym absorberem oraz obiektywem wykonanym z materiałów optycznych o znacznie podwyższonych właściwościach transmisyjnych [11].

Warto w tym miejscu nadmienić, że koszty aparatury pomiarowej do bezpośredniego badania parametrów wiązki laserowej są stosunkowo wysokie, a diagnostyka systemu laserowego wiąże się z koniecznością jego czasowego wyłączenia z produkcji. Dlatego do celów bieżącej kontroli jakości w procesach laserowych wykorzystuje się monitorowanie online interakcji wiązki laserowej z materiałem. Obecnie najczęściej realizowane jest to przez system wizyjny pracujący współosiowo z wiązką laserową. Może on bazować przykładowo na szybkiej kamerze o podwyższonej dynamice obrazu i optyce dichroicznej umożliwiającej współdzielenie toru optycznego. Efektem jest uzyskanie obrazu w czasie rzeczywistym z ROI podążającym za punktem obróbki widzianym od strony incydencji wiązki [12]. Trzeba jednak podkreślić, że jest to metoda pozwalająca tylko na bieżącą ocenę jakości procesu. Nie umożliwia ona dogłębnej analizy parametrów wiązki laserowej i pełnego śledzenia bezpośrednich przyczyn rozwoju wad układu laserowego.

4. Przeprowadzone badania pomiarowe

Badania przeprowadzono z użyciem urządzenia FocusMonitor firmy Primes, wykorzystującego metodę wirującej igły. Polegały one na pomiarze parametrów wiązki laserowej w funkcji zadanej mocy wyjściowej. Serie pomiarowe przeprowadzono dla systemów laserowego napawania proszków metali w technologii DMD wyposażonych w laser diodowy LDF 4000 ($P_{max}=4$ kW; $f=150$ mm) i światłowodowy YLR-500-SM ($P_{max}=200$ W; $f=200$ mm). Zbadano także układ z laserem dyskowym pracujący z głowicą tnącą ($P_{max}=2$ kW; $f=150$ mm).

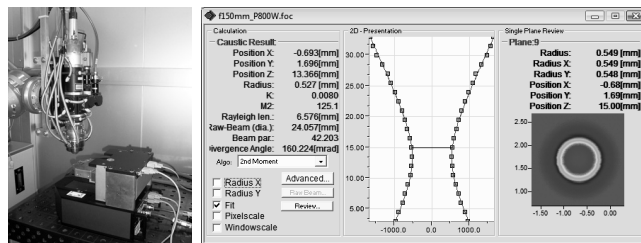
Tab. 2. Zestawienie wyników badań jakości wiązki (pod nazwą lasera podano deklarowaną jakość wiązki)

Tab. 2. Summary of beam quality measurements (below the laser type name a declared beam quality is given)

laser	TruDisk 4002 (BPP=8mm·mrad)		LDF 4000 (BPP=33mm·mrad)		YLR-500-SM ($M^2 < 1,1$)	
doprowadzenie wiązki	światłowod MM, rdzeń Ø 200 µm		światłowod MM, rdzeń Ø 600 µm		światłowod SM, rdzeń Ø 15 µm	
optyka skupiająca	f=150 mm; (cięcie)		f=150 mm; (proces DMD)		f=200 mm; (proces DMD)	
moc optyczna [W]	250	100	500	4000	20	200
średnica przewężenia [µm]	144	165	1055	1082	124	70,76
M^2	24,9	29,9	122,5	133,4	2,59	1,46
BPP [mm·mrad]	8,150	9,801	41,332	25,070	0,881	0,498

Wyniki porównano z danymi katalogowymi deklarowanymi przez producentów. Podstawowe zestawienie w tab. 2. Zmierzone wartości parametrów jakościowych nie odbiegają znacząco od oczekiwanych i reprezentują typowe wartości dla poszczególnych

typów generatorów laserowych. Należy podkreślić, że na jakość wiązki w punkcie obróbki wpływa nie tylko jakość generatora laserowego, ale również znacząco tor optyczny doprowadzający wiązkę i optyka skupiająca.



Rys. 3. Urządzenie pomiarowe FocusMonitor przygotowane do pomiaru (z lewej), główne okno przeglądu pomiarów wraz z kaustyką i rozkładem gęstości mocy (z prawej)

Fig. 3. FocusMonitor measuring device prepared for the measurement (left), result review main window with caustic and power density distribution (right)

W celu sprawdzenia powtarzalności pomiarów urządzenia FocusMonitor przeprowadzono odpowiednią analizę dla najważniejszych parametrów wiązki laserowej. Wykonano serię 30 pomiarów kaustyki wiązki na laserze Yb:YAG TruDisk 4000 z głowicą tnącą o $f=150$ mm. W czasie pomiarów laser pracował z mocą 1 kW w trybie ciągłym. Pojedynczy pomiar składał się z 21 płaszczyzn pomiaru rozkładu gęstości mocy rozmieszczonych równomiernie w przedziale $[-5z_r; +5z_r]$, co spełnia zalecenia ISO. Tabela 3. prezentuje wyniki estymacji niepewności standardowej wyliczonej dla każdego z parametrów na podstawie odchylenia standardowego zgodnie z ogólnym wzorem:

$$u(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Tab. 3. Wyniki wyznaczenia niepewności pomiarów dla Primes FocusMonitor
Tab. 3. Measurement uncertainty calculations for Primes FocusMonitor

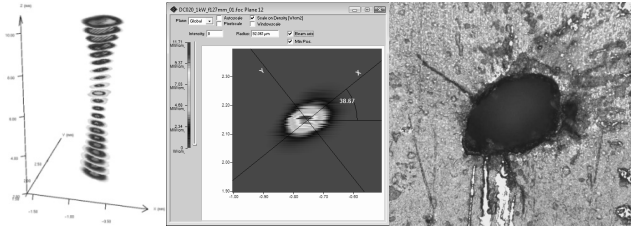
	średnia	rozstęp	niepewność std.
współrzędne przewężenia	x [mm]	-0,337	0,024
	y [mm]	0,676	0,029
	z [mm]	5,238	0,051
promień przewężenia [µm]	80,053	2,661	0,111
parametr M^2	28,1	0,9	0,037
BPP [mm·mrad]	9,676	0,302	0,012
z_r [mm]	0,662	0,049	0,0019
$\Delta\sigma$ [mrad]	241,763	10,639	0,437

5. Problemy i wady wiązki laserowej

Badania wiązki laserowej w systemie obróbkowym dokonuje się w celu poznania możliwości narzędzia oraz rozpoznania wad i ograniczeń. Poza okresowymi pomiarami konserwacyjnymi winno się przeprowadzać kompletną analizę wiązki w momencie instalacji systemu obróbkowego, po każdym jego transporcie, czy modyfikacji i oczywiście w sytuacjach problemów technologicznych. W ramach zrealizowanych badań eksperymentalnych zaobserwowano dwa częste zjawiska niepożądane: astygmatyzm wiązki i przesunięcie ogniska (ang. *focus shift*).

Astygmatyzm polega na ogniskowaniu wiązki w różnych punktach w zależności od płaszczyzny przekroju wzdłuż wiązki. Zjawisko to udało się zaobserwować podczas doświadczalnej diagnostyki 5-osiowej obrabiarki z laserem CO₂. W dwóch prostopadłych płaszczyznach przekroju, X i Y, zmierzone przesunięcie ogniska wyniosło 520 µm. Dodatkowo układ charakteryzował się eliptycznością wiązki ze względu na konstrukcję rezonatora. Opisanie zjawiska wynikały przede wszystkim z wad zbudowanego na lustrach teleskopu kształtującego wiązkę wyjściową z lasera

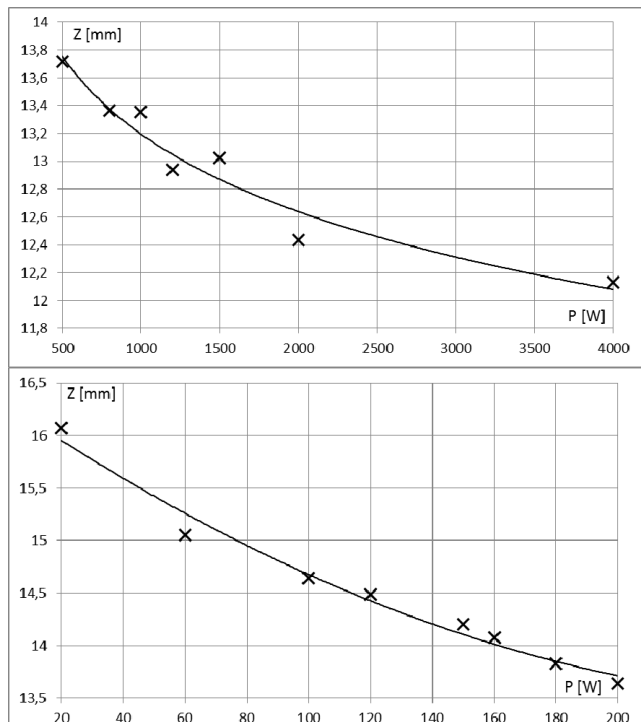
i powodowały efekt skręcenia wiązki w otoczeniu jej przewężenia. Jako wpływ astygmatyzmu na proces obróbkowy pokazano drążenie laserowe. Podczas badań optymalizacyjnych dla eksperymentalnego systemu nie udało się wytworzyć otworów pozbawionych eliptyczności i nieregularności geometrii. Astygmatyzm jest bardzo częstą wadą w systemach laserowych z układem optycznym wykorzystującym lustro w torze wiązki.



Rys. 4. Astygmatyzm wiązki lasera CO₂. Wizualizacja 3D kompletnego pomiaru (z lewej). Analiza rozkładu gęstości mocy w ognisku wiązki (środek).

Fig. 4. CO₂ laser beam astigmatism. 3D visualization of a complete measurement (left). Analysis of the power density distribution in the focal plane (middle). Defect influence on the hole shape in a laser drilling attempt (right)

Przesunięcie ogniska związane jest z termicznym samoogniskowaniem elementów optycznych. Zarówno współczynnik załamania światła, jak i odkształcenia geometryczne optyki rosnące w funkcji wzrostu temperatury, wpływają na skrócenie ogniskowej układu optycznego. Nieświadomość istnienia tego zjawiska może skutkować nieprawidłowością i spadkiem efektywności procesu wytwarzania. W ramach opracowania przeanalizowano to zjawisko dla wspomnianych laserowych systemów DMD. Zmierzono względne przemieszczenie ogniska w funkcji mocy promieniowania dla pełnego zakresu stabilnej pracy. Wyniki prezentują wykresy na rys. 5. Dla procesów DMD precyzyjne określenie położenia ogniska wiązki ma bardzo duże znaczenie dla jakości napoiny i minimalizacji strat materiału.



Rys. 5. Wykres przesunięcia położenia ogniska wzdłuż osi optycznej w funkcji mocy lasera w systemach napawania laserowego. Laser diodowy LDF 4000 (na górze), laser światłowodowy YLR-500-SM (na dole)

Fig. 5. Focus shifting along the optical axis as a function of laser power in laser cladding systems. LDF 4000 diode laser (top), YLR-500-SM fibre laser (bottom)

Innymi częstymi przyczynami wad wiązki laserowej skutkującymi w jakości procesu są m.in. zabrudzenia optyki podczas pracy

lasera, pęknięcia kryształu w laserach na ciele stałym, uszkodzenia światłowodów doprowadzających wiązkę, gradienty temperatur. Powoduje to głównie destruktywną transformację przestrzennego rozkładu gęstości mocy, co przekłada się na niestabilność procesu, spadek sprawności energetycznej systemu i w konsekwencji zwiększenie strat produkcyjnych.

6. Podsumowanie

Metoda pomiarów wiązki laserowej oraz monitorowanie procesu w czasie rzeczywistym są jednymi z głównych narzędzi zapewniających jakość procesu wytwarzania laserowego. Z uwagi na duże gęstości mocy wiązki laserowej i zaawansowanie technologiczne aparatury pomiarowej, spełniająca wysokie wymagania ISO, jest obecnie kosztowna, przez co powszechnie realizuje się monitorowanie procesu online. Jednak bezpośrednie badanie skupionej wiązki umożliwia identyfikację szeregu jej parametrów. Systematyka badań układów laserowych w produkcji może zoptymalizować koszty, czas i jakość procesu wytwórczego. Przedstawione wyniki pomiarów pokazały ilościowo efekt *focus shift* i częstą wadę układów z laserem CO₂ – astygmatyzm. Doświadczony użytkownik, w oparciu o takie dane, jest w stanie szybko rozpoznać przyczyny tych nieprawidłowości.

Badania przeprowadzono w ramach realizacji projektu rozwojowego N R03 0045 06/2009 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Wykorzystano aparaturę badawczą zakupioną w ramach projektu POIG.02.01.00-02-113/08 współfinansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego.

7. Literatura

- [1] Pawłowski M., Jarosiewicz D.: Dokładność pomiaru położenia i geometrii ostrza narzędzia z wykorzystaniem optycznego przyrządu pomiarowo-ustawczego. Materiały konferencji „Metrologia w Technice Wytwarzania”, 23-25 września 2009 r., Żerków, s. 343-347.
- [2] Ion J.C.: Laser processing of engineering materials. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford 2005.
- [3] Shin Y.C.: Laser assisted machining. Industrial Laser Solutions, nr 26/1, 2011r., s. 18-22.
- [4] Tünnermann A.: High repetition rate short pulse fiber lasers and amplifiers: Fundamentals and perspectives in system design and application. Materiały konferencji “5th International Workshop on Fiber Lasers”, 30 września - 1 października 2009r., Dresden (Niemcy).
- [5] Ziętek B.: Optoelektronika. Wydawnictwo Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń 2004.
- [6] Märten O., Schwede H.: Systematical qualification of optics. Materiały konferencji “4th PRIMES Workshop”, 7-8 września 2010r., Seeheim-Jugenheim (Niemcy).
- [7] PN-EN ISO 11146:1999: Lasery i sprzęt laserowy. Metody badania parametrów wiązki laserowej. Szerokość wiązki, kąt rozbieżności i współczynnik propagacji wiązki. PKN, Warszawa 2002.
- [8] Green L.: On-line beam performance monitoring to improve laser reliability and performance. Materiały konferencji “SPIE Photonics West”, 20-25 stycznia 2002r., San Jose (USA).
- [9] Schwede H., Kramer R.: High Performance Laser Beam Diagnostics in Industrial Environment. Materiały konferencji “17th ICALEO”, 16-19 listopada 1998r., Orlando (USA).
- [10] Kramer R. et al.: Laser Micro Machining – Tool Check. Materiały konferencji “23rd ICALEO”, 4-7 października 2004r., San Francisco (USA).
- [11] Wolf S.: High-End Laser Beam Analyzer for Industrial Environment. Materiały konferencji “4th PRIMES Workshop”, 7-8 września 2010r., Seeheim-Jugenheim (Niemcy).
- [12] Kaielerle S.: Process Monitoring and Control of Laser Beam Welding. Materiały konferencji “AKL’08 International Laser Technology Congress”, 7-9 maja 2008r., Aachen.

otrzymano / received: 10.10.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.12.2011

artykuł recenzowany / revised paper