

Tomasz Baraniecki  
Edward Chlebus  
Marian Działkiewicz  
Jakub Kędzia  
Jacek Reiner  
Marcin Wiercioch

# System laserowego mikronapawania proszków metali

## System for laser microcladding of metal powders

### Streszczenie

W artykule przedstawiono technologię laserowego napawania proszków metali oraz opracowaną dla niej obrabiarkę do laserowego mikronapawania proszków. Zaprojektowane i wykonane stanowisko bazuje na trzosiowej obrabiarce CNC, którą wyposażono w odpowiednie układy bezpieczeństwa laserowego i pyłowego. Jako źródło energii laserowej wykorzystano laser dyskowy sprzężony światłowodem z optyką obróbkową. Szczotkowy podajnik proszków wraz z dyszą kształtującą strumień proszku zapewnia jego podawanie współosiowo z wiązką lasera. Układ został zintegrowany z kartą PC-motion, która pełni rolę sterownika CNC.

Prezentowano również uzyskane wyniki napawania laserowego, charakteryzując je w kryteriach: szerokości i wysokości ściegu, głębokości wtopienia, kąta zwilżania oraz parametrów mikrostrukturalnych. Jako parametry niezależne przyjęto gęstość mocy wiązki lasera, prędkość i gęstość podawania proszku oraz względny posuw głowica-przedmiot.

### Abstract

The paper presents the technology of laser cladding of metallic powders with a machine for laser microcladding, developed in-house. The designed and constructed set-up is based on a three-axis CNC machine, equipped with appropriate laser safety and a dust extraction system. A disk laser is used as a source of energy, connected with processing optics by a fibre cable. A rotating brush powder feeder transfers the powder to a cladding nozzle, which provides the powder coaxially with the laser beam. The integration of system components is based on a PC-motion card that acts as a CNC controller.

Additionally, first results of experiments carried-out on the machine are presented, with characterisation in terms of the cladding height, width and depth, the wetting angle and microstructural features. As independent processing variables the laser power density, the powder feeding rate and the processing speed were used.

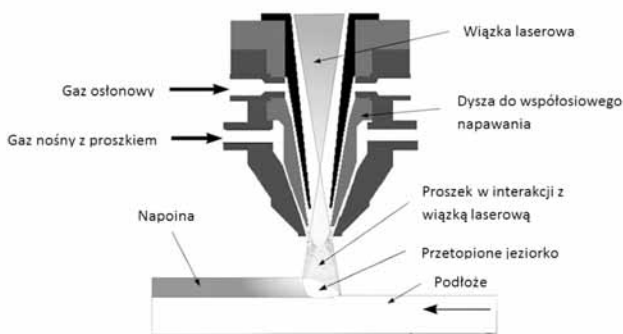
### Wstęp

Napawanie laserowe jest alternatywną technologią w stosunku do tradycyjnych metod napawania łukowego czy plazmowego. Wykorzystuje się w nim wiązkę laserową jako źródło energii do przetopienia podłoża oraz proszku. Materiał, z którego powstaje powłoka, może być dostarczany na podłoże dwoma metodami [1]. Pierwsza z nich to odmiana dwuetapowa,

polegająca na nałożeniu napawanego materiału (w postaci pasty, złoza proszku lub inną techniką pokrywania) na podłoże przed procesem przetopienia, a następnie stopienia jej wiązką laserową. Drugi sposób to podawanie w czasie procesu materiału w obszar przetopu przez wdmuchiwanie proszku, lub w postaci litego pręta albo ziaren proszku w rurce. Dostarczanie materiału napawanego przez współosiowe wdmuchiwanie proszku, transportowanego przez gaz nośny w obszar interakcji z laserem, okazuje się najbardziej elastyczną, odporną na zakłócenia i wydajną metodą stosowaną w procesach laserowego napawania [2] (rys. 1).

Energia doprowadzana w postaci wiązki laserowej stosowana jest do stopienia cienkiej warstwy metalicznego podłoża oraz części cząstek znajdujących się

**Dr inż. Tomasz Baraniecki, prof. dr hab. inż. Edward Chlebus, mgr inż. Marian Działkiewicz, mgr inż. Jakub Kędzia, dr inż. Jacek Reiner, mgr inż. Marcin Wiercioch** – Politechnika Wroclawska.



**Rys. 1.** Napawanie laserowe z współosiowym podawaniem proszku [3]

**Fig. 1.** Laser cladding with coaxial powder supply [3]

w strumieniu gazu nośnego. Pozostałe cząstki przetwarzane są po dotarciu do utworzonego jeziora ciekłego metalu na powierzchni podłoża. Wprowadzenie ruchu między napawaną powierzchnią oraz dyszą do napawania umożliwia pokrywanie podłoża pojedynczymi ściegami, które wykonywane kolejno w określonym odstępie tworzą na podłożu jednorodną napawaną powłokę.

W procesach napawania laserowego istotne jest zapewnienie właściwej gęstości mocy wiązki laserowej ( $10^4$ - $10^5$  W/cm<sup>2</sup>) oraz czasu jej interakcji (0,01÷1 s) z materiałem napawanym i materiałem podłoża [4]. Istotna jest również jakość wiązki laserowej, a szczególnie możliwość uzyskania odpowiednich średnic plamki lasera i równomiernego rozkładu gęstości energii – np. *top-hat*. Pozwala to na zlokalizowaną obróbkę, gwarantującą wąską strefę wpływu ciepła, znikome odkształcenie przedmiotu obrabianego oraz niewielki wtop w podłoże, definiowany jako stosunek głębokości wtopienia do całkowitej wysokości napoiny (5÷10%). Relatywnie małe wymiary tworzonego na podłożu jeziora sprawiają, że w procesie występują bardzo wysokie prędkości chłodzenia (>1000 K/s), zapewniające powstanie w napawanych powłokach struktur o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych [5]. Obecnie technologia napawania laserowego oferuje możliwość tworzenia powłok w zakresie 0,05÷2 mm [6].

Od kilkunastu lat widać silny wzrost zastosowania mikrokomponentów w wielu dziedzinach takich jak medycyna, telekomunikacja, przemysł samochodowy, lotniczy, itp. Miniaturyzacja produktów wymaga coraz dokładniejszych i zlokalizowanych technologii obróbki. Doskonałe możliwości w tym zakresie oferuje technologia laserów ultrakrótkich impulsów ns, ps, fs. Przy odpowiednio wysokiej energii i krótkich czasach ekspozycji dochodzi tylko do odparowywania materiału, a jego topienie jest znikome. Przykładami dobrze opracowanych i szeroko stosowanych w przemyśle technologii wykorzystujących laser mogą być mikrocięcie, mikrowiercenie oraz mikrosparowanie [7, 8].

Obecnie naukowcy pracują nad zastosowaniem napawania laserowego w mikroinżynierii, gdzie wymiary geometryczne wytwarzanych elementów nie przekraczają 100  $\mu$ m. Przykładowym obszarem zastosowania mikronapawania są próby tworzenia antykorozyjnych powłok ze stopów Al-Si (siluminy) na powszechnie stosowanych w przemyśle samochodowym komponentach z bardzo lekkich stopów magnezowych [9]. Problemem jest wtedy nałożenie materiału o wyższej temperaturze topnienia na materiał o niższej temperaturze topnienia i parowania. Dobór odpowiednich parametrów procesu ma zapewnić minimalny wtop napawanej warstwy w podłoże oraz zapobiec występowaniu mikropęknięć mogących prowadzić do uszkodzenia warstwy wierzchniej podczas użytkowania. Przykładem z medycyny są próby implementacji technologii do znakowania metalicznymi markerami stentów wykonanych ze stopów z pamięcią kształtu (Nitinol) [10]. Napawane tantalowe, niobowe lub platynowe markery służą do identyfikacji stentu w naczyniach krwionośnych, stanowiąc elementy o wysokim kontraście w stosunku do tkanek ludzkich podczas prześwietlania ciała promieniowaniem rentgenowskim. Prowadzone są również badania nad mikronapawaniem laserowym elektrycznych kontaktów wykonanych ze złota w metanolowych ogniwach paliwowych DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*) [11]. Wzrastająca oporność w miejscach kontaktu pomiędzy stosami w ogniwach prowadzi do wydzielania ciepła i strat mocy wyjściowej. Napawane złote mikrokontakty o wymiarach rzędu 70  $\mu$ m i wysokości 30  $\mu$ m wyraźnie obniżają straty spowodowane opornością styków oraz charakteryzują się bardzo dobrym wiązaniem z podłożem, co dodatkowo wydłuża trwałość ogniw.

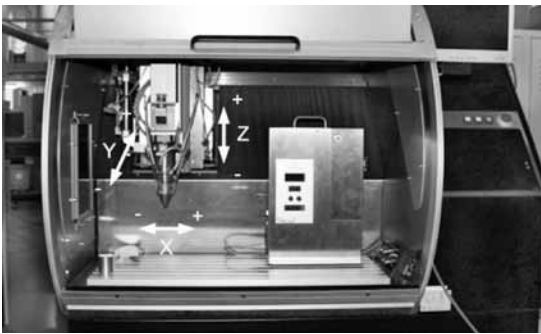
## Stanowisko do laserowego mikronapawania proszków

Złożoność procesu napawania wymaga integracji wielu odrębnych rozwiązań z zakresu mechaniki, elektroniki i sterowania, optyki i laserów, materiałoznawstwa oraz technologii wytwarzania w jeden funkcjonalny system. Końcowa realizacja zależy oczywiście od postawionych wymagań, które są zawsze kompromisem kosztowym.

Dla opracowywanego stanowiska postawiono wymagania laserowego napawania ścieżek o szerokościach poniżej 300  $\mu$ m. Przestrzeń robocza została ograniczona do 150x200x100 mm<sup>3</sup>, a dokładność pozycjonowania powinna wynosić 0,01 mm. Projektowane urządzenie miało być platformą badawczą, stąd oczekiwanie elastyczności i otwartości w zakresie sterowania i integracji różnych źródeł promieniowania laserowego, podajników proszków i aparatury monitorującej.

## Układ kinematyczny i sterowanie

Jako bazę nowego urządzenia wykorzystano obrabiarkę CNC Premium 4820. Jest to trzyosiowa frezarka wyposażona w granitowy stół poprawiający stabilność temperaturową i odporność na drgania. Ze względów bezpieczeństwa obudowa obrabiarki wymagała zmian. W celu możliwości bezpośredniej obserwacji procesu obróbki laserowej zastosowano okienko z filtrem ochronnym. Dodatkowo zainstalowano wyciąg eliminujący cząstki nieprzetopionego proszku oraz inne produkty obróbki termicznej. System sterowania został wyposażony w dodatkowe elementy bezpieczeństwa, np. *interlock* zapobiegające nieodpowiedniemu użyciu urządzenia.



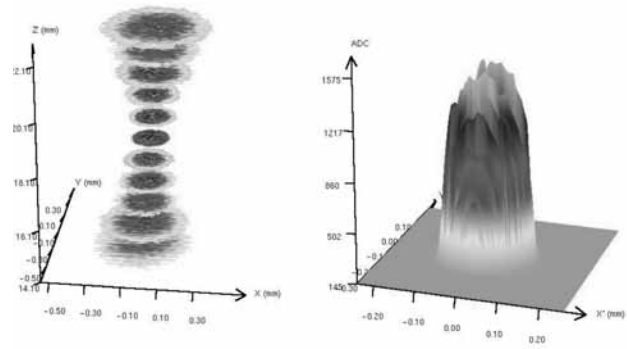
Rys. 2. Stanowisko do mikronapawania laserowego  
Fig. 2. Laser micro-cladding set-up

Ruch w poszczególnych osiach jest realizowany za pomocą silników liniowych, których parametry dynamiczne znacznie przewyższają wymagania procesu napawania, a spełnienie wymagań dokładności nie stanowi problemu.

Sterowanie obrabiarką realizowane jest za pośrednictwem karty APC18001. Sygnały sterujące z karty *motion* przekazywane są do sterownika LOGOSOL, który za pomocą serwowzmacniaczy kontroluje parametry ruchu oraz odpowiada za funkcje bezpieczeństwa. Realizacja działań na karcie *motion* realizowana jest współbieżnie przez cztery procesy, które działają niezależnie od obciążenia systemu operacyjnego komputera PC. Za ich pomocą zdefiniowano funkcje synchroniczne i asynchroniczne ruchu oraz współpracy z urządzeniami peryferyjnymi. Do wizualizacji stanu maszyny i jej urządzeń peryferyjnych oraz parametryzacji opracowano interfejs GUI.

## Laser i optyka

W pierwszym etapie rozwoju urządzenia jako źródło promieniowania laserowego wybrano laser dyskowy TruDisk 4002 (Trumpf). Laser generuje wiązkę o długości fali 1030 nm, o dobrym rozkładzie energii i jakości wiązki BPP 8 mm·mrad. Promieniowanie jest



Rys. 3. Wyniki pomiaru kaustyki wiązki laserowej (ADC – liczba zliczeń przetwornika)

Fig. 3. The results of the measurement laser beam caustic (ADC – the converter counts)

dostarczane do głowicy obróbkowej światłowodem o średnicy rdzenia 200  $\mu\text{m}$ . Głowica laserowa wyposażona jest w soczewkę skupiającą o ogniskowej  $f = 200 \text{ mm}$  i kolimacyjną  $f = 200 \text{ mm}$ , zamontowaną na zmotoryzowanym układzie przesuwym w osi Z w zakresie +10mm/-15mm. Dzięki integracji układu napędowego ze sterownikiem możliwa jest zmiana położenia ogniska wiązki laserowej, bez zmiany odległości głowicy od obrabianego przedmiotu. W celu weryfikacji parametrów układu optycznego i źródła laserowego dokonano pomiarów kaustyki wiązki za pomocą Focus Monitora (Primes) (rys. 3).

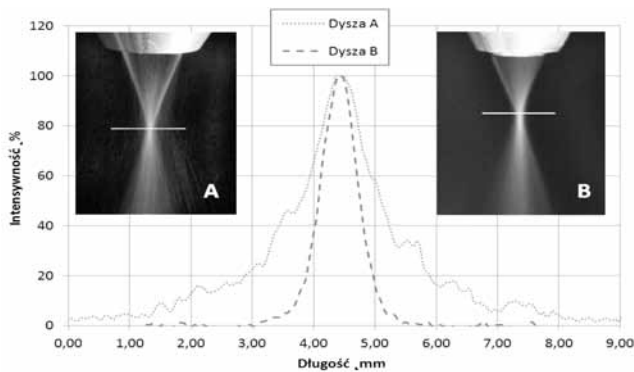
Pomiar umożliwił precyzyjne zlokalizowanie ogniska, potwierdzenie parametrów źródła laserowego (BPP = 7,07 mm·mrad) i zastosowanej optyki (Ray-length = 1,5 mm) wraz z oceną jej błędów. Jak potwierdził pomiar, średnica wiązki w ognisku wynosi 200  $\mu\text{m}$ . W celu lepszego skupienia wiązki laserowej konieczne byłoby zastosowanie soczewki skupiającej o krótszej ogniskowej lub poszerzenie średnicy wiązki za pomocą soczewki kolimacyjnej o dłuższej ogniskowej.

## Układ podawania proszków

Kolejnym kluczowym składnikiem urządzenia do napawania jest układ podawania proszków. Składa się on z podajnika i dyszy podającej proszek (ang. *noz-zle*). Wybrano współosiowy układ podawania, dobierając głowice o jak najmniejszej średnicy skupiania wiązki proszku. Jak potwierdziły badania, osiągnięte skupienie zależy głównie od konstrukcji głowicy, parametrów podawania proszku i gazu nośnego, jak również od właściwości użytego proszku (sferyczność i frakcja średnicy ziaren). Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wynik porównawczy skupiania dwóch głowic, dla głowicy standardowej (A) średnica skupiania wynosi ok. 3 mm, a dla precyzyjnej (B) ok. 1 mm. Pomiarów dokonano w przewężeniu strumienia proszku.

W celu ochrony soczewki skupiającej zadawany jest dodatkowy strumień gazu osłonowego. Jego parametry również wpływają na ogniskowanie wiązki proszku.





**Rys. 4.** Porównanie zdolności ogniskowania proszku w dyszy: A – standardowej, B – precyzyjnej

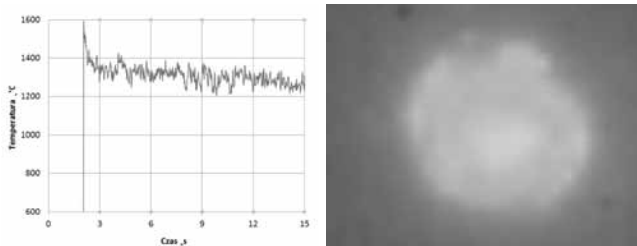
**Fig. 4.** Comparison of the powder focusing nozzle capability: A – standard, B – precision

Do dostarczania proszku wybrano podajnik szczotkowy. Umożliwia on transport proszków metali o granulacjach mniejszych niż 30  $\mu\text{m}$ . Proszki o tak małej granulacji mają tendencję do aglomeracji i w przypadku użycia standardowych metod grawitacyjnych często dochodzi od zasklepiania otworów podających, co staje się przyczyną nierównomiernego podawania.

Użyty podajnik umożliwia dozowanie proszku w zakresie od 11  $\mu\text{m}$  do 120 mg/s. Dzięki integracji ze sterownikiem parametry podawania proszku są zadawane w programie CNC.

## Monitorowanie procesu

W celach badawczych wprowadzono układ monitorowania jeziora spawalniczego. Monitorowanie takie odbywa się poprzez współosiową obserwację obszaru przetwarzanego. Głowica optyczna jest wtedy rozszerzana o lustro dichroiczne przekierowujące promieniowanie emitowane z obszaru obróbki do detektora. Jako detektor wykorzystywany jest pirometr dwukolorowy umożliwiający pomiary temperatury w zakresie 550÷1400°C (maks. 2000°C), lub kamera HDRC o rozszerzonej dynamice. Za pomocą kamery obserwowany jest obszar wokół miejsca obróbki, co ułatwia konfigu-



**Rys. 5.** Wynik monitorowania temperatury jeziora spawalniczego za pomocą pirometru i współosiowy obraz obszaru obróbki w trakcie procesu.

**Fig. 5.** Weld pool temperature monitoring by pyrometer and coaxially view of cladding area in the process

rację stanowiska oraz przebieg procesu. Zastosowanie filtra pasmowo – przepustowego dostarcza informacja o rozkładzie temperatury na powierzchni obróbki. Pozwala to optymalizować proces napawania przez sterowanie mocą lasera *on-line* wg kryterium oddziaływania termicznego.

## Próby technologiczne i badania

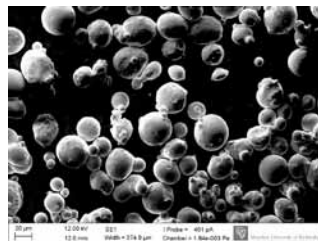
W celu wstępnej weryfikacji technologicznej stanowiska badawczego wykonano zestaw podstawowych napoin oraz wykonano ich makrostrukturalne badania.

Jako podłoże zastosowano płytę wykonaną ze stali S235 o grubości 10 mm, a do napawania użyto proszku ze stali AISI 316L, podzielonego na dwie frakcje: 20÷40  $\mu\text{m}$  oraz 40÷63  $\mu\text{m}$ .

Pierwsza seria pojedynczych napoin była parametryzowana mocą lasera, ilością podawanego proszku oraz prędkością posuwu. Wyniki przedstawiono na rysunku 7.

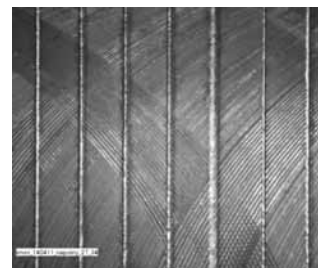
W czasie badań moc lasera dla pojedynczych ściegów zmieniano w przedziale 80÷140 W. Proszek podawany był z trzema prędkościami: 38 mg/s, 66 mg/s oraz 95 mg/s, a prędkość posuwu ustalano w przedziale między 10÷25 mm/s. Jako gaz transportowy oraz ochronny stosowano argon.

Ścieg, którego przekrój pokazano na rysunku 8, cechuje się poprawną geometrią i proporcjami dla napoin [9]. Otrzymany został przy gęstości mocy poniżej 300 kW/cm<sup>2</sup>, co przy zastosowanej plamce



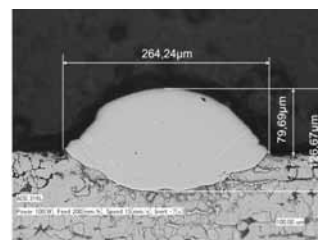
**Rys. 6.** Obraz SEM cząstek proszku AISI 316L, frakcja 20÷40  $\mu\text{m}$

**Fig. 6.** SEM view of AISI 316L powder, 20÷40  $\mu\text{m}$  fraction



**Rys. 7.** Seria pojedynczych napoin dla różnych parametrów oraz ich topografia

**Fig. 7.** Spot cladding series with different parameters and surface topography in selected area



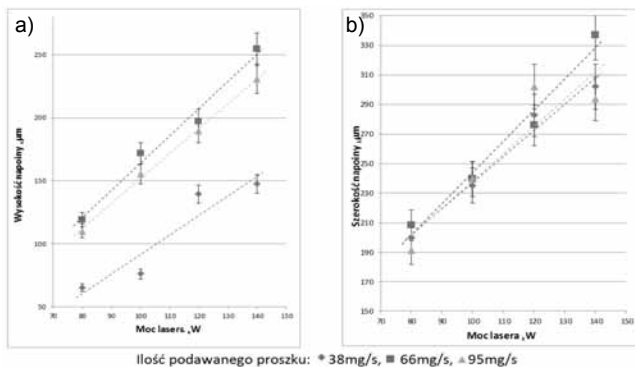
**Rys. 8.** Przekrój poprzeczny napoiny oraz jej charakterystyczne wymiary

**Fig. 8.** Cladding cross-section with specific dimensions of it

odpowiada mocy lasera 100 W. Prędkość posuwu wynosiła 15 mm/s, a prędkości podawania proszku 66 mg/s. Zauważono, że już niewielka zmiana jednego z parametrów powodowała brak prawidłowego przetopienia oraz zwilżenia materiału.

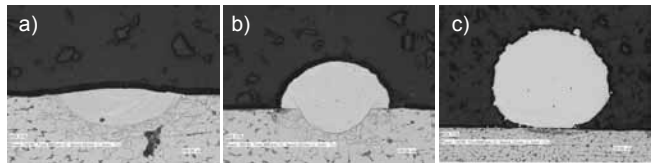
Wybrane wyniki wpływu mocy lasera na wysokość i szerokość ściegów, dla różnych prędkości posuwu oraz różnej ilości podawanego proszku, przedstawiono na rysunku 9.

Szczególnie przy małej prędkości i ilości podawanego proszku, dla większych średnic ziaren obserwowano duży rozrzut wysokości napoiwy.



**Rys. 9.** Zależność wysokości (a) i szerokości (b) napoiwy od mocy lasera dla stałej prędkości posuwu.

**Fig. 9.** Cladding high (a) and width (b) in the function of laser power and constant cladding speed



**Rys. 10.** Przykłady wadliwych napoiw: a) zbyt głęboki wtop, b i c) brak całkowitego przetopu

**Fig. 10.** Cladding with defects examples: a) to deep penetration, b, c) poor penetration

Na rysunku 10 przedstawiono przykładowe wady występujące wskutek utraty balansu między dostarczaną energią, ilością proszku i posuwem.

Wada pokazana na rysunku 10a, zbyt głęboki wtop, spowodowana jest zbyt dużą mocą lasera i prędkością posuwu w stosunku do ilości podawanego proszku. Gdy ilość podawanego proszku jest zbyt duża w stosunku do prędkości posuwu, dochodzi do efektu pokazanego na rysunku 10b. Wyolbrzymiony efekt braku przetopu podłoża pokazano na rysunku 10c, co było skutkiem zbyt wysokiej lokalizacji ogniska skupiania proszku i wiązki laserowej nad powierzchnią. Należy zaznaczyć, że zwiększanie dostarczanej energii wiązki lasera przy przekroczeniu parametrów podawania proszku w stosunku do prędkości posuwu nie prowadzi do dobrej jakości napoiwy.

## Wnioski

Uzyskane wyniki pozytywnie weryfikują opracowaną technologię oraz system do laserowego mikro-napawania proszków. Dzięki otwartości stanowiska, stanowi ono dobrą podstawę do badania, rozwoju i optymalizacji takich zastosowań.

Optymalny dobór parametrów technologicznych dla każdego z przypadków wymaga eksperymentów. Obok parametrów głównych procesu, takich jak:

gęstość energii dostarczanej za pomocą wiązki laserowej, prędkość podawania proszku oraz posuw względny głowica–obiekt, na przebieg procesu wpływają też inne czynniki. Jak pokazały badania, krytyczne jest precyzyjne ogniskowanie wiązki proszku i wiązki lasera, jakość powierzchni bazowej, ciśnienie i rodzaj gazu osłonowego, wytwarzana geometria, parametry proszku, itp.

## Literatura

- [1] Ehsan Toyserkan, Amir Khajepour, Stephen Corbin, LASER Cladding, 2005 by CRC Press LLC.
- [2] F. Lusquiños, R. Comesaña, A. Riveiro, F. Quintero, J. Pou, Fibre Laser Micro-Cladding Of Co-Based Alloys On Stainless Steel, Surface & Coatings Technology 203 (2009) s. 1933-1940.
- [3] L. Dubourg, J. Archambeault, Technological And Scientific Landscape Of Laser Cladding Process In 2007, Surface & Coatings Technology 202 (2008) 5863–586.
- [4] Wayne Penn, Laser cladding basics, Welding Journal – February 2008, Copyright 2008 American Welding Society.
- [5] Vilar R., Laser Cladding, The International Journal Of Powder Metallurgy, vol. 37, No. 2, March 2001.
- [6] Reinhart Poprawe, Tailored Light 2 – Laser Application Technology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- [7] Koji Sugioka, Michel Meunier, Alberto Pique, Laser Precision Microfabrication, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [8] Tomasz Baraniecki, Maksymilain Sidorowicz, Jacek Reiner, System for PS-Laser Micromachining, Proceedings on International Conference Production Engineering 2011, Wrocław July 2011.
- [9] Bernabe Carcel, Jesus Sampedroa, Ana Ruescas, Xavier Tonneub, Corrosion And Wear Resistance Improvement Of Magnesium Alloys By Laser Cladding With AL-SI, Physics Procedia 12 (2011) 353-363.
- [10] Fraunhofer ILT Annual Report 2007, Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, Micro-Laser Dispensing Of X-Ray Visible Markers On Stents.
- [11] Fraunhofer ILT Annual Report 2007, Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, Manufacturing Contact Points On Bipolar Plates For Direct Methanol Fuel Cells.