

# Spawanie laserowe – wybrane metody

## Laser welding – selected methods

### Streszczenie

W artykule przedstawiono podstawy i odmiany procesu spajania materiałów na drodze spawania laserowego. Odkrycie promieniowania laserowego w połowie XX w. przyczyniło się do dynamicznego rozwoju technik spajania materiałów. Źródło energii w postaci wiązki laserowej okazało się być w wielu przypadkach idealnym narzędziem w procesach spajania ze względu na swoją niespotykaną dotąd specyfikę. Do najważniejszych atutów promieniowania laserowego w aspekcie wykorzystania go w procesach spawania bez wątplenia zaliczyć można elastyczność w zakresie gęstości używanych energii, jak również możliwość praktycznie dowolnego formowania kształtu i rozkładu energii w wiązce. Dzięki między innymi tym cechom proces spawania laserowego może być realizowany na wiele różnych sposobów oraz zastosowany do wielu różnych typów materiałów.

**Słowa kluczowe:** laser; spawanie; spajanie

### Abstract

The article the basics and variations of the process of bonding materials by laser welding. Discovery of the laser radiation in the mid-20th century, contributed to dynamic development of the bonding techniques. Source of energy in the form of a laser beam turned out to be, in many cases, an ideal tool in the process of bonding due to its unprecedented specificity. The most important strengths of laserradiation, in terms of its use in welding processes, without a doubt include the flexibility in terms of the density of energy which is used, as well as the ability to form any shape and to distribute energy in the beam. Thanks to these features, the laser welding process can be performed in many different ways and be applied on many different types of materials.

**Keywords:** laser beam; welding

### Wstęp

Od zarania dziejów człowiek dąży do poprawy komfortu swojego życia. Cel ten osiągnąć jest poprzez podporządkowywanie sobie natury i materii. O ile ta pierwsza jest krnąbrna i często nieprzewidywalna, o tyle ta druga daje się w miarę łatwo okiełznać. Kształtowanie materii na potrzeby wytwarzania narzędzi ewoluuje od czasów prehistorycznych. Zagadnienie to od początku realizowane było dwutorowo – poprzez odejmowanie lub dodawanie materiału. Rozwój zastosowań energii elektrycznej w wieku XIX w. znacznym stopniu przyczynił się do rozkwitu metod wytwarzania, a odkrycie lasera w połowie wieku XX było przełomowe dla postępu w wielu dziedzinach nauki i przemysłu.

### Spawanie laserowe

To odmiana techniki spawania polegająca na spajaniu materiałów poprzez stapianie obszaru ich styku za pomocą wiązki promienia laserowego. Proces ten prowadzony jest zazwyczaj w osłonie gazu obojętnego, natomiast w przypadku kiedy materiał spawany nie utlenia się spawanie prowadzone jest w powietrzu i zapewnia dużą wytrzymałość spoin. Spawanie laserowe powszechnie stosowane jest w wielu dziedzinach przemysłu w produkcji wielkoseryjnej m.in. w przemyśle ciężkim i motoryzacyjnym. W tym

celu wykorzystuje się wiązki o dużej gęstości energii rzędu MW/cm<sup>2</sup>. W wyniku zastosowania oddziaływania wiązki laserowej o niewielkim rozmiarze a ogromnej gęstości energii szerokość strefy wpływu ciepła jest mała a oddziaływanie temperatury na konstrukcje niewielkie. Z tego także powodu procesowi towarzyszy szybkie odprowadzanie ciepła i stygnięcie spoiny. Możliwa do uzyskania szerokość uzyskiwanych spoin wynosi od 0,2 do 13 mm. Praktycznie wykorzystywane są głównie spoiny o małych szerokościach. Zakres wnikania energii w głąb materiału jest proporcjonalny do mocy lasera, współczynnika absorpcji promieniowania laserowego danego materiału, ale zależy również od lokalizacji ogniska lasera i prędkości posuwu wiązki. Najbardziej efektywny sposób dostarczania energii wiązki lasera w głąb materiału jest realizowany poprzez lokalizowanie ogniska tuż poniżej powierzchni łączonych materiałów.

Spawanie laserowe w wielu odmianach stosowane jest do spajania praktycznie większości rodzajów stali, metali trudno topliwych, metali aktywnych chemicznie, aluminium i tytanu, jak również tworzyw sztucznych, krzemu, szkła oraz ich układów. Proces spawania laserowego znajduje zastosowanie w przemyśle głównie w skali makro. Istnieje jednak szereg odmian spawania laserowego wykorzystywanych również w skali mikro. W artykule przedstawione zostaną wybrane odmiany procesu spawania (również te hybrydo-

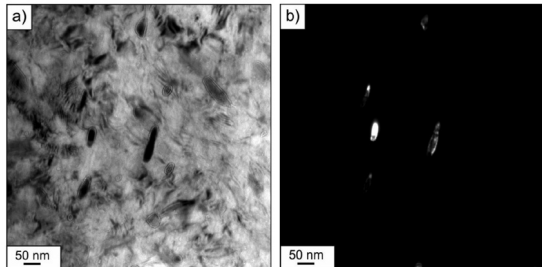
**Dr inż. Dominik Wyszyński** – Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: wyszynski@mech.pk.edu.pl

we) laserowego oraz podane zostaną typowe obszary zastosowań.

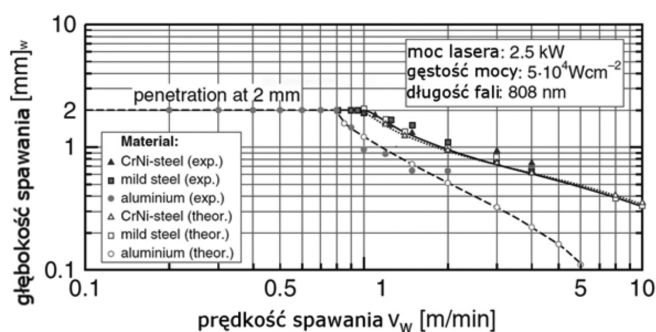
## Opis procesu

Proces spawania laserowego może być realizowany na wiele sposobów oraz z wykorzystaniem różnych źródeł laserowych. Do najczęściej stosowanych należy zaliczyć lasery dużej mocy pracujące w sposób ciągły takie jak laser CO<sub>2</sub>, matryce diod laserowych dużej mocy oraz lasery światłowodowe czy lasery impulsowe Nd:YAG.



Rys. 1. Schemat procesu spawania laserowego  
Fig. 1. Scheme of laser welding process

Wiązka laserowa pada na powierzchnię spawanych materiałów. W wyniku absorpcji promieniowania elektromagnetycznego przez atomy łączonych materiałów dochodzi do wzrostu temperatury w obszarze oddziaływania wiązki. Wzrostowi temperatury towarzyszą przemiany strukturalne i fazowe. Po przekroczeniu temperatury topnienia łączne materiały zaczynają się intensywnie ze sobą mieszać. Ponieważ rozmiar skupionej plamki laserowej jest niewielki, również i spoina posiada niewielkie rozmiary poprzeczne a strefa wpływu ciepła w tym przypadku uzależniona jest od mocy lasera, rozmiaru plamki skupionej wiązki laserowej, przewodności cieplnej spawanych materiałów oraz czasu interakcji wiązki laserowej z materiałem (prędkością posuwu wiązki). Ponieważ strefa oddziaływania wiązki laserowej jest niewielka względem objętości materiału, a dodatkowo ruchoma, przetopiony materiał będzie relatywnie szybko stygł, tworząc spoinę. Naturalnie tempo procesu spawania uzależnione jest od współczynnika absorpcji promieniowania lasera o danej długości fali, mocy zastosowanego źródła laserowego, grubości spawanych materiałów oraz ich przewodności cieplnej. Do najczęściej stosowanych w procesie spawania laserów należą lasery CO<sub>2</sub>, Nd:YAG oraz matryce diod laserowych. Przykładową zależność pomiędzy prędkością spawania a głębokością spawania przedstawiono na przykładzie wysokiej mocy diodowej głowicy laserowej



Rys. 2. Zależność grubości spawania w zależności od prędkości spawania i rodzaju materiału [1]  
Fig. 2. The dependence of the thickness of welding, depending on the speed and type of material.

(rys.1). Wykres obejmuje także zależność tempa i głębokości procesu spawania laserowego od typu spawanego materiału i jego właściwości cieplnych.

W przypadku elementów które zostały wstępnie ogrzane (np. skutek procesu spawania realizowanego w obrębie tego samego arkusza blachy), nagrzewanie zachodzi znacznie szybciej niż w obszarach chłodnych co może skutkować głębszą i szerszą spoiną lub możliwością zwiększenia prędkości spawania.

Proces spawania laserowego posiada wiele odmian. Poniżej wymieniono metody stosowane najczęściej:

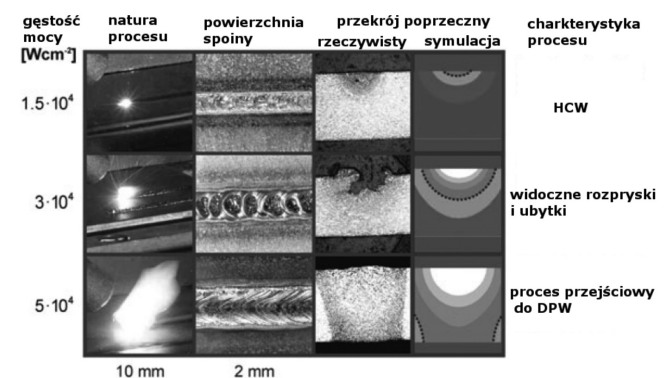
- spawanie poprzez przewodzenie ciepłe (Heat Conduction Welding),
- spawanie poprzez głębokie przetopienie materiału (Deep Penetration Welding),
- spawanie hybrydowe,
- spawanie materiałów termoplastycznych,
- łączenie laserowe z udziałem reakcji termochemicznych,
- lutowanie laserowe,
- mikrospawanie laserowe,
- w dalszej części artykułu omówione zostaną wybrane spośród wymienionych.

## Spawanie poprzez przewodzenie ciepłe – Heat Conducted Welding

Jest to proces, podczas którego materiał podgrzewany jest do temperatury topnienia, lecz nie wyższej, aby uniknąć nadmiernego parowania materiału spawanego materiału. Zatem krytycznymi z punktu widzenia parametrami tego procesu będą moc lasera, gęstość energii, rozmiary spawanych elementów oraz ich temperatura i przewodność cieplna. Proces ten najczęściej stosowany jest do łączenia cienkich arkuszy blachy stalowej i aluminiowej o grubościach nieprzekraczających 1,5 mm. Tego typu materiały stosowane są najczęściej w przemyśle samochodowym oraz do produkcji armatury. W porównaniu z innymi metodami spawania ten typ procesu charakteryzuje relatywnie niska ilość energii dostarczanej do przedmiotu obrabianego wskutek czego dochodzi do mniejszych niż zazwyczaj odkształceń oraz zwiększenia wydajności procesu. Schemat takiego procesu przedstawiony został wcześniej na rysunku 1.

W procesie tym najczęściej stosowane są lasery gazowe (np. CO<sub>2</sub>), na ciele stałym (np. Nd:YAG) czy diody laserowe wysokiej mocy.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki zastosowania lasera diodowego o mocy 2,5 kW do spawania stalowego arkusza blachy o grubości 2 mm. Prędkość spawania wynosiła 1,8 m/min. Rozmiar plamki laserowej 1,7x3.8 mm.

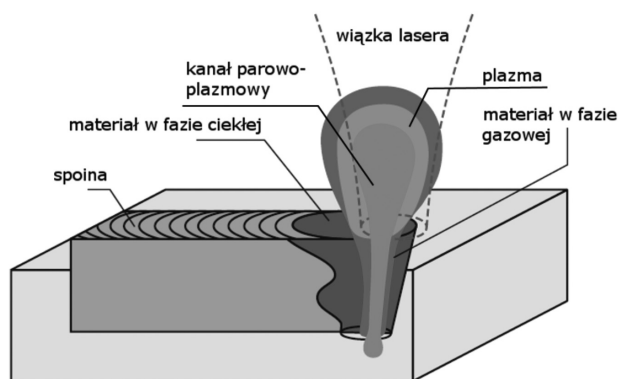


Rys. 3. Charakterystyka procesu HCW [3]  
Fig. 3. Characteristic of the HCW process

Czasem, jak to ma miejsce podczas spawania stali chromowo-niklowych, niezbędne jest zastosowanie gazu roboczego takiego jak argon czy hel lub ich mieszanek, aby poprawić jakość spoiny i uniemożliwić utlenianie materiału w jej przypowierzchniowej warstwie. Obróbka wykańczająca górnej powierzchni spoiny nie jest wymagana.

## Spawanie poprzez głębokie przetopienie materiału (Deep Penetration Welding)

Aby połączyć materiał poprzez jego głębokie przetopienie proces spawania laserowego musi zachodzić przy znacznie mniejszych prędkościach w porównaniu z omawianym wcześniej procesem. Zmniejszenie prędkości spawania umożliwia zwiększenie tempa przepływu ciepła w głąb materiału, tak aby możliwe było zarówno przetopienie przypowierzchniowej warstwy utlenionej jak i dolnej części arkusza. Absorbowana przez materiał energia lasera rozgrzewa go do temperatury przekraczającej zarówno temperaturę topnienia, jak i parowania. Z uwagi na prężność par oraz ich przepływ w obszarze przetopionego płynnego materiału (jeziorka) formowany jest kanał parowy – rysunek 4. Ponieważ ciepło w tym przypadku rozchodzi się zarówno w kierunku w głąb materiału, jak i (w znacznie większym stopniu niż w omawianym wcześniej przypadku) na boki, powstałe w ten sposób spoiny są głębsze i szersze.



Rys. 4. Schemat procesu spawania DPW. Opracowanie własne na podstawie [2]

Fig. 4. Scheme of DPV process

W tym procesie przetopiony materiał opływa kanał parowo-plazmowy i zastyga wokół niego, tworząc spoinę. Ta odmiana procesu spawania laserowego pozwala na uzyskiwanie spoin o stosunku szerokości do grubości większym niż 10:1. Aby przejść od procesu HCW do DPW w większości przypadków wystarcza także zwiększenie gęstości mocy lasera (zmniejszenie średnicy plamki przy zachowaniu tej samej mocy lasera i prędkości spawania). W przypadku spawania stopów aluminium przejście takie z użyciem laserów diodowych jest niemożliwe z uwagi na właściwości optyczne i termiczne tych stopów. Zatem proces ten będzie w tym przypadku zawsze procesem HCW wraz z wszystkimi jego ograniczeniami.

W procesie DPW ważną rolę odgrywa jonizacja parującego metalu i powstająca plazma. Po przekroczeniu pewnej granicy gęstości mocy lasera gęstość plazmy dramatycznie rośnie, powodując silne odbijanie promieniowania laserowego. Zakłóca to równowagę procesu spawania [3].

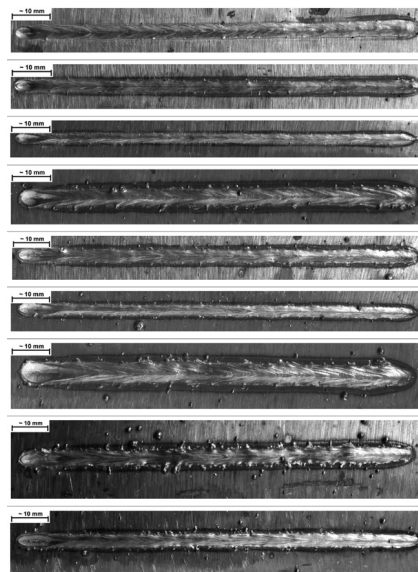
Warto także wspomnieć, że głębokość, na jakiej materiał zostaje w tym procesie przetopiony zależy prócz jego właściwości fizycznych również od głębi ostrości stosowanej w procesie soczewki skupiającej. Dodatkowo z uwagi na wie-

lokrotne odbicia wiązki laserowej w kanale parowym (każdemu odbiciu towarzyszy jednakże pewna absorpcja energii) możliwe jest uzyskanie wysokiej sprawności absorbowania energii lasera również dla materiałów posiadających wysoki współczynnik odbicia dla danej długości fali. Formujący się kanał parowy i występująca w nim dodatkowa absorpcja energii sprzyjają jednolitemu ogrzewaniu spoiny na całej grubości arkusza blachy, a sam kanał stanowi ujście dla powstających gazów, przez co dochodzi do odgazowania roztopionego metalu i zmniejsza to jego porowatość.

Do parametrów mających największy wpływ na tę odmianę procesu spawania laserowego zaliczyć można:

- długość fali lasera, moc lasera, stan polaryzacji fali elektromagnetycznej, ogniskowa soczewki i stosunek rozmiaru plamki padającej na soczewkę do rozmiaru plamki po skupieniu oraz gęstość mocy;
- rodzaj użytego w procesie gazu osłonowego, jego wydatek, rodzaj i kształt dyszy (czasem stosowany jest w procesach hybrydowych drut – jego wpływ omówiony zostanie w dalszej części artykułu);
- rodzaj spawanego materiału, jego grubość, struktura, stan warstwy wierzchniej oraz przygotowanie krawędzi przed spawaniem;
- prędkość spawania, kierunek spawania, umiejscowienie ogniska wiązki laserowej, przyspieszenia;
- kształt łączonych elementów, umiejscowienie spoiny jak również jej dostępność.

Poniżej na rysunku 5 przedstawiono przekrój poprzeczny czołowy spoiny po spawaniu z użyciem lasera dyskowego o mocy 8 kW.



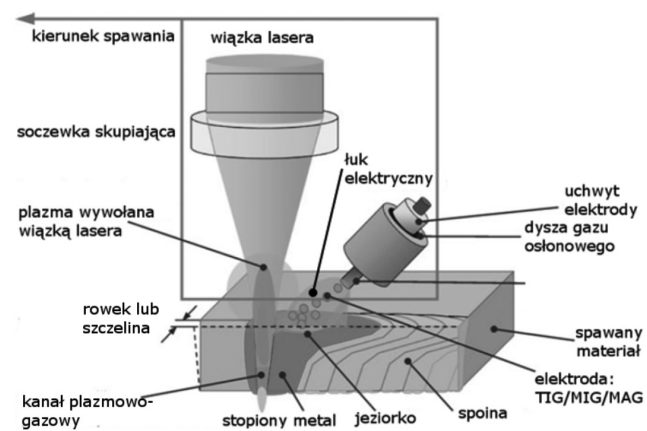
Rys. 5. Fotografia przekroju poprzecznego spoiny po spawaniu arkusza blachy ze stali nierdzewnej z użyciem lasera dyskowego o mocy 8kW, prędkość spawania 3m/min, grubość spoiny 10mm [2]

Fig. 5. Picture of the seam cross section of stainless steel welding. Disk laser P=8kW, feed rate 3m/min, thickness 10mm [2]

## Spawanie hybrydowe

Spawanie hybrydowe to proces, w którym obok wiązki laserowej używa się innego komplementarnego źródła energii np. w postaci wyładowania łukowego. Podczas takiego procesu energia lasera dostarczana jest do miejsca spawania w sposób identyczny jak podczas omawianych wcześniej procesów. Różnica polega jednak na tym, że dodatkowo spawany materiał przypięty jest do źródła

prądu stałego i stanowi jedną z elektrod. Druga z elektrod umieszczona jest pod kątem względem głowicy laserowej. Zazwyczaj elektroda ta stanowi także źródło materiału wypełniającego spoinę. Cechą charakterystyczną dla tej odmiany procesu spawania jest to, że zarówno energia lasera, jak i wyładowania łukowego dostarczane są w to samo miejsce – do jeziorka. Schemat stanowiska przedstawiony został na rysunku 6 poniżej.



**Rys. 6.** Schemat procesu spawania hybrydowego. Opracowanie własne na podstawie [4]

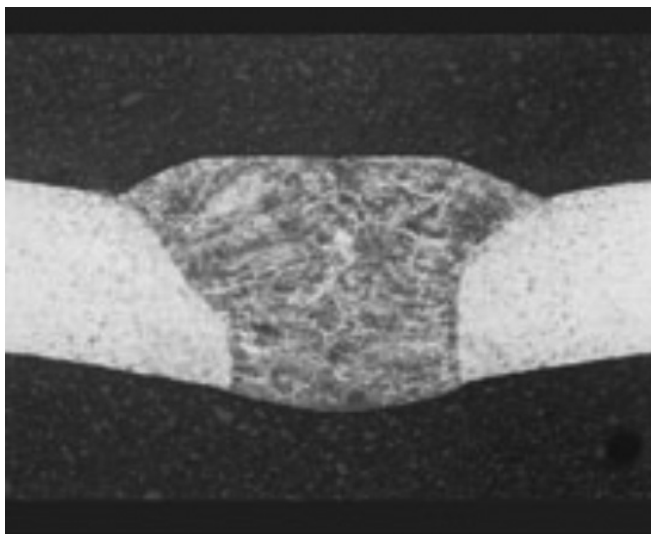
**Fig. 6.** Scheme of hybrid welding process [4]

Hybrydowe procesy spawania cenione są za wysoką wydajność i elastyczność, szczególnie jeśli wziąć pod uwagę synergii procesów DPW i MIG lub MAG. Metody te stosowane są na szeroką skalę w przemyśle stoczniowym [5,6] jak również motoryzacyjnym [7]. Przewagą procesu hybrydowego spawania laserowego w odniesieniu do standardowego spawania laserowego polega przede wszystkim na:

- udoskonaleniu procesu łączenia materiałów z użyciem niższych mocy lasera (rys. 8),
- łączenie przesuniętych krawędzi (rys. 9),
- obniżeniu wymagań dotyczących przygotowania i mocowania krawędzi,
- udoskonaleniu sterowania cyklem nagrzewania.

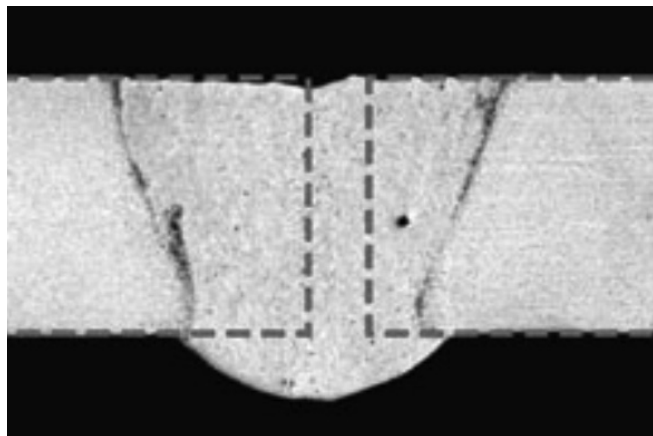
Natomiast w stosunku do tradycyjnych metod spawania jako zalety wyróżnić można:

- większą prędkość spawania (rys. 7),.



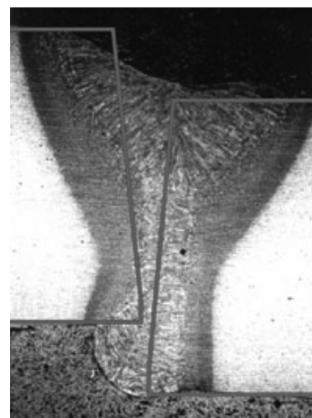
**Rys. 7.** Prędkość spawania 14,4m/min, stal niskowęglowa, arkusz o grubości 1 mm [9]

**Fig. 7.** Feed rate 14,4m/min, 1mm mild steel sheet [9]



**Rys. 8.** Wypełnienie szczeliny (0,8mm), profil aluminiowy o grubości 4 mm [9]

**Fig. 8.** Gap bridging (0,8mm), 4mm aluminium profile [9]



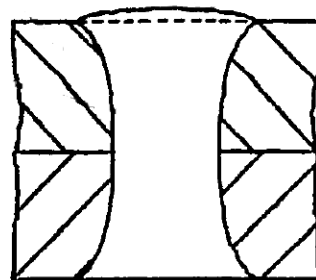
**Rys. 9.** Spawanie niedopasowanych (przesunięcie 2 mm) względem siebie krawędzi, stal (rura), grubość 10 mm [9]

**Fig. 9.** Leveling of misalignment (2mm) 10mm pipeline steel X25 [9]



**Rys. 10.** Wysoka jakość spoiny. Rura stalowa, grubość ścianki 12 mm [9]

**Fig. 10.** High quality seam. 12mm stainless steel tube [9]



**Rys. 11.** Schemat spoiny typu I uzyskiwanej podczas spawania złącz zakładkowych [8]

**Fig. 11.** Type I seam scheme [8]

- spawanie bez stosowania szczeliny oraz możliwość uzyskania spoiny typu I podczas spawania złącz zakładkowych (rys. 11),
- spawanie z przetopieniem spoiny na całej głębokości w podczas pojedynczego przejścia nawet dla dużych głębokości,
- mniejsze ilości ciepła,
- mniejsze odkształcenia,
- mniejsza ilość materiału na złączach teowych oraz w narożnikach, lepszy prześwit.

Zalety te mają bezpośredni wpływ na jakość (rys. 10) i wydajność procesu. Wynikają one z możliwości sterowania procesem polegającym na dostarczaniu odpowiedniej ilości stopionego materiału w wymagane miejsce przy użyciu metody MIG/MAG i jednoczesnym wytworzeniu przy użyciu wiązki lasera kanału gazowo-plazmowego w jeziorce, dzie-

ki któremu uzyskuje się wymaganą głębokość i prędkość spawania. Dodatkowo obserwowana jest poprawa właściwości metalurgicznych otrzymanych złączy związana z ich twardością, wytrzymałością i zmniejszoną porowatością. Zastosowanie w procesie źródeł laserowych (Nd:YAG, dyskowych czy światłowodowych) o krótszych długościach fal niż lasera CO<sub>2</sub>, pozwala na zaniechanie zjawisk związanych z ekranowaniem plazmy. Możliwy jest zatem dobór odpowiedniego gazu roboczego w celu stabilizacji wyładowania łukowego i ochrony podłoża. Najczęściej stosuje się w tym celu argon. W celu odpowiedniego odrywania kropeł materiału z elektrody i zapobiegnięcia ich rozchłapywania stosowany jest dodatek tlenu. Zastosowanie lasera CO<sub>2</sub> w tym procesie wymaga mieszanki helowej, aby zapobiec ekranowaniu plazmy. Obecność wiązki laserowej stabilizuje wyładowanie łukowe nawet przy dużym przepływie helu.

---

## Podsumowanie

Przedstawione w artykule metody stanowią jedynie pewien ułamek z wachlarza dostępnych sposobów na łączenie materiałów za pomocą wiązki lasera. Co więcej, z uwagi na ograniczenia redakcyjne w artykule omówione zostały tylko te stosowane na największą skalę. Dlatego także przedstawiono je w sposób jak najbardziej zwięzły i zaprezentowano jedynie najważniejsze aspekty omawianych procesów. Spawanie laserowe znajduje co raz to nowsze zastosowania, a systemy wyposażane są w różnorodne oprzyrządowanie zarówno jeśli chodzi o stosowane dysze, jak i układy optyczne. Na szczególną uwagę zasługuje tu zastosowanie spawania laserowego tworzyw termoplastycznych, szkła i półprzewodników oraz wykorzystanie precyzyjnych metod w przemyśle zegarmistrzowskim. W związku z powyższym, jeśli przedstawiona tematyka, spotka się z zainteresowaniem czytelników, autor zobowiązuje się w kolejnym artykule omówić również te aspekty.

## Literatura

- [1] R. Poprawe, D. Petring, C. Benter. (2001) "Schweißen mit Diodenlasern", iASTK 2001.
  - [2] R. Poprawe, Tailored laser light 2 – Laser Application Technology, Springer 2011.
  - [3] E. Beyer, Einfluß des laserinduzierten Plasmas beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Lasern. Dissertation, TH-Darmstadt, 1985
  - [4] D. Petring Hybrid laser welding. Industrial Laser Solutions, December 2001, pp. 12-16, 2001.
  - [5] H. Lembeck, Laser-Hybrid-Schweißen im Schiffbau. Proceedings Aachener Kolloquium für Lasertechnik 2002, Aachen, Germany, pp. 177-192, 2002.
  - [6] U. Jasna, J. Hoffmann, P. Seyffarth, R. Reipa, G. Milbradt, Laser-MSG Hybridschweißen im Schiffbau. Proceedings of European Automotive Laser Application 2003, Bad Nauheim, Germany, 2003.
  - [7] T. Graf, H. Staufer, Laser-Hybrid-Welding Drives VW Improvements. Welding Journal, pp. 42-48, 2003.
  - [8] US 8471173 B2, Laser hybrid welding method and laser hybrid welding torch using a zinc and/or carbon and/or aluminum-containing rod.
  - [9] D. Petring, C. Fuhrmann, Hybrid laser welding: laser and arc in concert. The Industrial Laser User, No. 33, pp. 34-36. 2003.
-