

Jan PILARCZYK, Sebastian STANO, Marek BANASIK, Jerzy DWORAK
Instytut Spawalnictwa, Gliwice

WYKORZYSTANIE TECHNIK LASEROWYCH DO SPAWANIA ELEMENTÓW O MAŁYCH WYMIARACH W CENTRUM LASEROWYM INSTYTUTU SPAWALNICTWA

Słowa kluczowe

Spawanie laserowe, spawanie wiązką laserową emitowaną w trybie impulsowym, spawalność, elementy małych wymiarów, stabilizacja procesu spawania laserowego impulsowego.

Streszczenie

Artykuł jest prezentacją Centrum Laserowego Instytutu Spawalnictwa. Omawia proces spawania laserowego w trybie impulsowym oraz problemy związane z jego kontrolą. Przedstawia przykłady zastosowań spawania impulsowego do elementów o małych wymiarach (elementów cienkościennych) oraz szczególne technologie i trudności dotyczące tych przypadków.

Wprowadzenie

Znakomita większość wytwarzanych obecnie materiałów metalowych jest łączona metodami spawalniczymi. Brak możliwości łączenia poważnie ogranicza stosowanie danego materiału na konstrukcje i wyroby spawane.

Połączenia spawane wykonywane są z materiałów o zróżnicowanych własnościach i grubościach. Są to m.in.: stale konstrukcyjne o wytrzymałościach od

300 do 1200 MPa, stale nisko- i wysokostopowe odporne na czynniki chemiczne i żaroodporne, metale nieżelazne i ich stopy, materiały galwanizowane, pokrywane lub powlekane i wiele innych. Grubość łączonych materiałów metodami spawalniczymi zmienia się w zakresie od mikrometrów (folie) do dziesiątek, a nawet setek milimetrów.

Tak różnorodne materiały są spawane różnymi metodami dobieranymi w taki sposób, aby wykonane złącza charakteryzowały się wysoką jakością, a proces spawania zapewniał odpowiednią wydajność. Najwyższą jakość połączenia spawanego uzyskuje się wtedy, gdy własności spoiny i strefy wpływu ciepła są wyraźnie zbliżone do własności materiału spawanego. W procesie spawania dąży się zatem do tego, żeby przetopienie materiałów tworzących spoinę, zmiany w obszarze strefy wpływu ciepła oraz naprężenia i odkształcenia spawalnicze w złączu spawanym były jak najmniejsze. Warunki te spełniają metody spawania, w których ciepło niezbędne do utworzenia spoiny jest silnie skoncentrowane lub inaczej, metody, w których energia liniowa spawania może uzyskiwać niskie wartości.

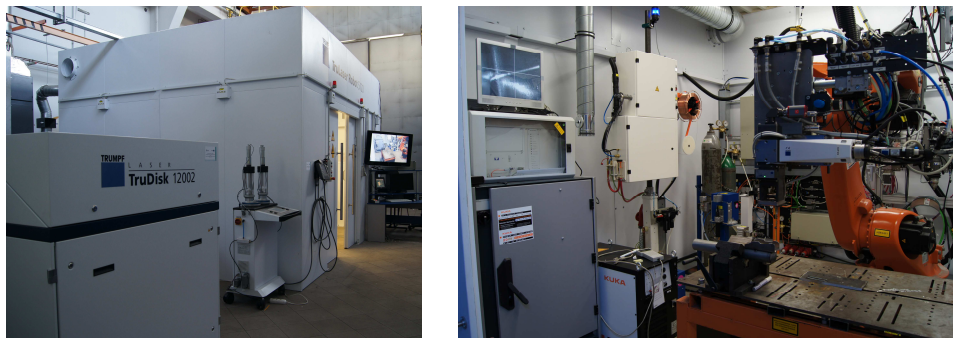
Metody spawania charakteryzujące się wysoką koncentracją ciepła to nowoczesne spawanie łukowe (spawanie plazmowe) oraz spawanie wiązką elektronową i laserową.

1. Centrum Laserowe Instytutu Spawalnictwa

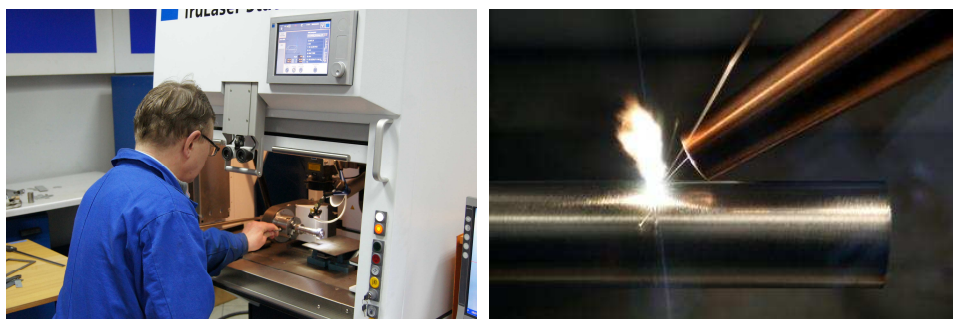
Instytut Spawalnictwa w Gliwicach jest wiodącym w kraju centrum technik laserowych. Wyposażenie centrum stanowią wysokiej jakości stanowiska laserowe (rys. 1, 2, i 3), umożliwiające prowadzenie obróbki laserowej z wykorzystaniem trzech różnorodnych, najczęściej spotykanych w przemyśle laserów przemysłowych.



Rys. 1. Uniwersalne centrum obróbkowe Lasercell Trumpf TLC 1005 do cięcia, spawania i napawania laserowego z laserem gazowym CO₂ o mocy 3,8 kW



Rys. 2. Zrobotyzowane stanowisko obróbki laserowej z laserem dyskowym Yb:YAG TruDisk 12002 o mocy 12 kW, umożliwiające badania procesu spawania hybrydowego, spawania laserowego wiązką skanującą, lutospawania, spawania z zimnym i gorącym drutem oraz napawania. Stanowisko wyposażone jest w robot przemysłowy KUKA KR30/2 HA. Na końcówce robota instalowane są głowice do różnych procesów spawalniczych



Rys. 3. Stanowisko CNC TruLaser Station 5004 do obróbki materiałów laserem impulsowym Nd:YAG TruPuls 103, o mocy średniej 95 W i maks. mocy impulsu 6 kW, z systemem kontroli mocy w czasie trwania impulsu od 0,3 ms do 50 ms z możliwością dowolnego kształtowania przebiegu mocy w czasie trwania impulsu

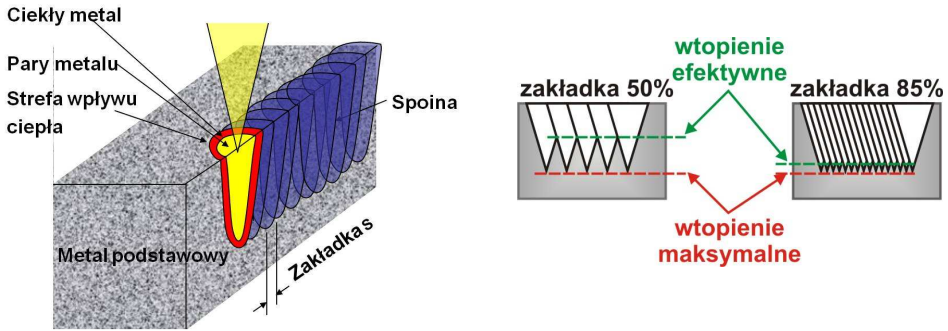
W centrum technik laserowych Instytutu Spawalnictwa, oprócz badań laserowych procesów spawalniczych, wykonuje się opracowania technologii laserowych oraz prototypowe serie wyrobów przeznaczone do testów i prób, orzeczenia i opinie dla zakładów produkcyjnych reprezentujących bardzo szerokie spektrum branżowe. Zakładom tym oferowana jest pomoc w zakresie badań nad możliwością zastosowania spawalniczych technologii laserowych w produkcji konkretnych detali oraz transferu nowoczesnych technologii do produkcji przemysłowej.

2. Proces spawania laserowego wiązką laserową emitowaną w trybie impulsowym

Wiązka promieniowania laserowego jest wykorzystywana w różnorodnych procesach technologicznych, takich jak: cięcie, spawanie, znakowanie, hartowanie powierzchniowe, napawanie, przetapianie, mikroobróbka. Źródłami promieniowania laserowego są lasery: gazowe CO₂, lasery na ciele stałym (lasery Nd:YAG, Yb:YAG, Yb:Glaas) oraz lasery diodowe. Wzrastającym zainteresowaniem cieszą się lasery na ciele stałym, co wynika szczególnie z wysokiej mocy (kilkanaście kilowatów) wiązki promieniowania osiąganego przez powszechnie już dostępne na rynku konstrukcje najnowszej generacji oraz krótszej długości fali promieniowania laserowego – ok. 1 μm w porównaniu z laserami CO₂, a to bezpośrednio przekłada się na możliwość transportu promieniowania laserowego z rezonatora do głowicy laserowej za pomocą światłowodów oraz na skuteczniejszą absorpcję promieniowania, zwłaszcza przez metale silnie odbijające. Dzięki temu uzyskuje się możliwość znacznego rozszerzenia aplikacji przemysłowych i objęcia obszarów dotychczas nieosiągalnych dla laserów CO₂.

Równoległe z laserami na ciele stałym o dużej mocy kilkunastu kilowatów rozwijane są lasery YAG o niewielkiej mocy średniej (do około kilkuset wat). Charakteryzują się one dobrą jakością wiązki, a ich konstrukcja umożliwia pracę w trybie impulsowym i pomimo stosunkowo małej mocy średniej – uzyskanie dużych wartości mocy szczytowych w impulsie (kilka kW). Emisja wiązki promieniowania lasera YAG w trybie impulsowym wynika z impulsowego wzbudzenia rezonatora lasera i chwilowego znacznego obciążenia elementu czynnego – kryształu Nd:YAG. Stąd lasery te są opisywane nie maksymalną mocą wiązki laserowej, ale energią, jaką mogą one wydatkować. Maksymalna energia lasera impulsowego decyduje o możliwości uzyskania impulsu o określonej mocy, czasie trwania oraz częstotliwości powtarzania impulsów.

Spoina wytwarzana przez wiązkę laserową emitowaną w trybie impulsowym składa się z wielu zachodzących na siebie pojedynczych spoin punktowych (rys. 4). Stopień zachodzenia na siebie poszczególnych impulsów określony w procentach, tzw. zakładka, oznacza, w jakim stopniu obszar przetopionego materiału przez pojedynczy impuls zachodzi na podobny obszar wytworzony przez impuls poprzedni. Za pomocą określonej zakładki (prędkości spawania oraz częstotliwości powtarzania impulsów) można regulować szczelność spoiny, rzeczywistą głębokość wtopienia oraz ilość ciepła wprowadzanego do materiału spawanego, a także wpływać na jednorodność struktury spoiny. Taki tryb pracy lasera znajduje szczególne zastosowanie do spawania cienkościennych konstrukcji, wrażliwych na duże ilości ciepła wprowadzanego do złącza, powodujące odkształcenia lub pęknięcia.

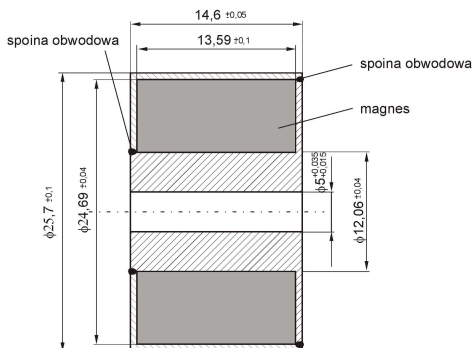


Rys. 4. Proces spawania laserem impulsowym i wpływ częstotliwości impulsów na stopień wzajemnego zachodzenia pojedynczych spoin punktowych

3. Przykłady zastosowania procesu spawania laserowego w trybie impulsowym

Spawanie elementów cienkościennych o grubości ścianek poniżej 1 mm tradycyjnymi, łukowymi metodami spawania jest trudne. Trudności powoduje brak stabilności procesu spawania. Spawanie łukowe musi być prowadzone bardzo małymi prądami, często na granicy możliwości, jakie dają dostępne źródła łuku. Tu użyteczne bywają urządzenia do spawania plazmowego, umożliwiające uzyskanie łuku plazmowego już przy prądach rzędu 0,5–1 A. Jakikolwiek zakłócenia procesu spawania powodują pojawianie się braków przetopienia lub przepaleń zakłócających ciągłość spoiny. Mała sztywność elementów cienkościennych powoduje znaczne ich odkształcanie (pofalowanie) w procesie spawania, wręcz dyskwalifikujące złącza spawane.

Problem spawania elementów cienkościennych rozwiązuje spawanie laserowe, prowadzone w trybie ciągłym lub impulsowym.

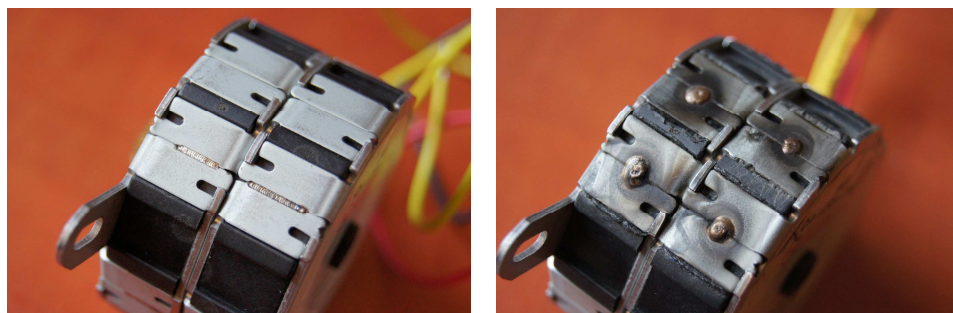


Rys. 5. Moduł sprzęgła magnetycznego (stal nierdzewna; przetop $\leq 0,5$ mm, laser CO₂)

W trybie ciągłym pracy lasera możliwe jest uzyskiwanie spoin o głębokości nawet kilku dziesiątych części milimetra. Jednakże technika ta może być stosowana, kiedy elementy cienkościennie łączone są z elementami masywnymi, mającymi możliwość odprowadzania ciepła. Przykładem są tu obudowy delikatnych lub specjalnych przedmiotów. Spoiny wykonywane są w trajektorii zamkniętej (rys. 5), zazwyczaj z brakiem pełnego przetopu, ze względu na czułość na termiczne oddziaływanie wiązki laserowej tego, co zawiera obudowa.

W przypadkach wrażliwości spawanych elementów zarówno na oddziaływanie wiązki laserowej, jak i na ciepło wydzielane w procesie spawania oraz elementów o niewielkich gabarytach, które nie są zdolne do odprowadzania ciepła powstającego w procesie spawania, dobre wyniki daje spawanie laserowe wiązką emitowaną w trybie impulsowym. Wtedy spoinę końcową tworzą pojedyncze spoiny punktowe zachodzące na siebie, a każda kolejna spoina punktowa układana jest po zakrzepnięciu poprzedniej. Spektakularnym przykładem tego typu wyrobów są spawane laserowo rozruszniki serca. W tytanowej obudowie mieszczą się bardzo czułe zespoły elektroniczne.

Praktycznym przykładem przemysłowego zastosowania spawania laserowego wiązką emitowaną w trybie impulsowym jest silniczek elektryczny małej mocy (rys. 6), którego obudowę wykonano z giętych segmentów ze stali ocynkowanej o grubości 0,8 mm.

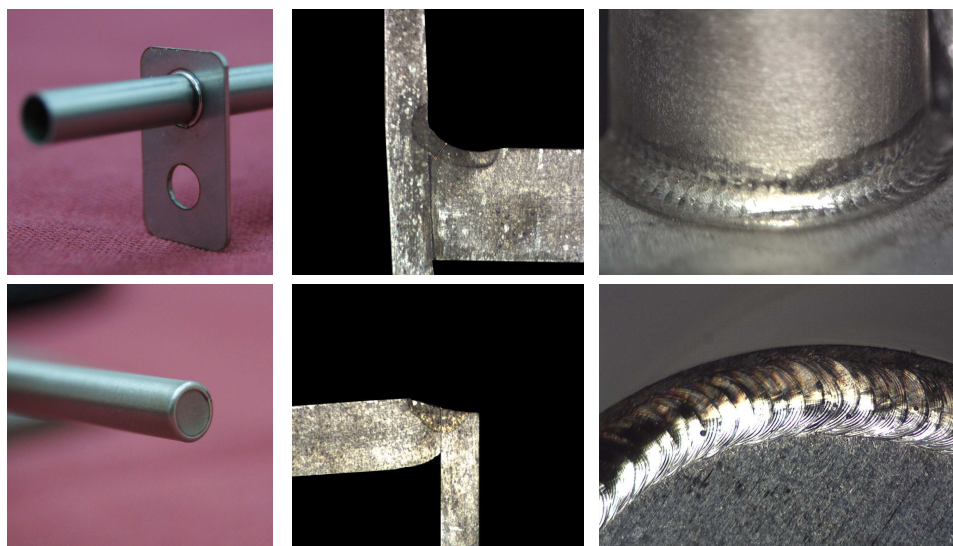


Rys. 6. Silniczek elektryczny małej mocy stosowany w układach elektroniki, spawany laserem impulsowym Nd:YAG (po lewej). Przy spawaniu łukowym (po prawej) następuje degradacja tworzywa sztucznego przylegającego do spawanych elementów metalowych

Ze względu na specyficzne warunki pracy należało wzmocnić metalową obudowę silniczka (połączyć segmenty obudowy ze sobą). Próby zastosowania spawania łukowego czy lutospawania nie dały dobrych wyników ze względu na zbyt duże ilości wprowadzanego ciepła i degradację tworzywa sztucznego przylegającego do metalowych segmentów. Zastosowanie spawania laserowego impulsowego pozwoliło uzyskać poprawne połączenia bez naruszenia wrażliwych elementów z tworzywa sztucznego. Szerokość lica spoiny (szerokość ubytku warstwy cynkowej) była bardzo mała i wynosiła ok. 0,5 mm. Spoiny są

bardzo estetyczne i nie wymagają przeprowadzenia jakichkolwiek dodatkowych operacji przed oddaniem silniczka do użytku.

Przykładem elementów, w których spawanie łukowe jest trudne do zastosowania ze względu na małe gabaryty i kumulację ciepła są różnego rodzaju niewielkie, cienkościennie rurki służące jako elementy obudowy czujników temperatury lub osłony przewodów sygnałowych (rys. 7). Końcówki tych rurek powinny być szczelnie zamknięte, a powierzchnie boczne powinny być połączone z elementami umożliwiającymi ich mocowanie w systemach pomiarowych. Równocześnie połączeniom stawiane są wysokie wymagania estetyczne. Przy grubości ścianki rurki 0,3 mm oraz grubości elementów mocujących 0,7 mm zastosowanie metod łukowych jest bardzo trudne. Zastosowanie spawania laserowego impulsowego pozwoliło uzyskać poprawne spoiny, z ładnym wyglądem lica, odpowiednim wtopieniem w ścianki rury oraz zapewnieniem szczelności.



Rys. 7. Spawanie laserem impulsowym Nd:YAG elementów cienkościennych rura o średnicy zewnętrznej 5 mm i grubości ścianki 0,3 mm:
a – spawana z uchwytem o grubości 0,7 mm
b – spawana z krążkiem zamykającym o grubości 0,5 mm

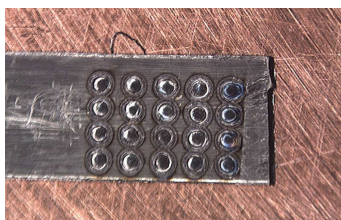
Jednym z głównych odbiorców technologii spawania laserowego impulsowego jest przemysł elektroniczny i elektrotechniczny, w którym łączy się bardzo cienkie styki elektryczne z różnorodnych materiałów: miedzi, brązu, mosiądzu, srebra, niklu itp. Materiały te charakteryzują się dużym współczynnikiem odbicia promieniowania laserowego i ich spawanie jest bardzo utrudnione. Jednakże uzyskanie dużych wartości szczytowych impulsu, tym samym dużych chwilo-

wych gęstości mocy w obszarze oddziaływania wiązki laserowej lub odpowiednie zaprojektowanie złącza umożliwiające oddziaływanie wiązki laserowej na materiał o większym współczynniku absorpcji, pozwala uzyskiwać złącza, w których podstawowym kryterium odbioru jest zachowanie na odpowiednim poziomie przewodności elektrycznej złącza. Przeprowadzone wstępne próby spawania laserowego miedzi ze specjalistycznym stopem oporowym (rys. 8) wykazały możliwość uzyskania połączeń o oczekiwanych własnościach. Prowadzone będą dalsze badania w celu poprawienia estetyki połączeń.



Rys. 8. Przykładowe połączenie miedzi ze specjalistycznym stopem oporowym: widok lica bezpośrednio po spawaniu

Ciekawe wyniki uzyskano podczas prób spawania folii niklowej o grubości 0,15 mm do masywnego podłoża miedzianego. Odpowiednio dobrane parametry procesu umożliwiły uzyskanie połączenia zakładkowego bez przepalenia cienkiej folii. Wstępne próby wytrzymałościowe potwierdziły uzyskanie oczekiwanych parametrów połączenia (rys. 9).



Rys. 9. Połączenie folii niklowej o grubości 0,15 mm z podłożem miedzianym

Podsumowanie

Zastosowanie laserów w procesach spawalniczych, w tym także laserów o stosunkowo niedużej mocy średniej, ale pracujących w trybie impulsowym, znacząco rozszerza zakres możliwości spawania w przypadkach, w których tradycyjne, łukowe metody spawania nie mogą być stosowane. Dostarczanie energii w postaci kontrolowanych impulsów (w zakresie czasu trwania impulsu, mocy średniej i mocy szczytowej impulsu, przebiegu narastania mocy w czasie trwania impulsu, częstotliwości powtarzania impulsów) pozwala dobrać taką

ilość ciepła (przekazywaną do materiału), jaka zapewnia oczekiwany wynik. Ze względu na dużą czułość spawanych elementów na ilość dostarczanego ciepła, zakres możliwych parametrów, przy których uzyskiwane jest poprawne złącze jest stosunkowo wąski. Konstruktorzy nowoczesnych laserów impulsowych poprzez zaawansowane układy sterowania gwarantują stabilność parametrów generowanej wiązki laserowej i uzyskanie dużej powtarzalności wyników procesu spawania.

Bibliografia

1. Goneghy V., Petring D.: Parameter dependencies of copper welding with multi-kW lasers at 1 micron wavelength. *Physics Procedia* 12 (2011), 95–104.
2. Heider A., Stritt P., Hess A., Weber R., Graf T.: Process Stabilization at welding Copper by Laser Power Modulation. *Physics Procedia* 12 (2011), 81–87.
3. Lienert T.J., Lippold J.C.: Improved weldability diagram for pulsed laser welded austenitic stainless steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, vol. 8, nr 1.
4. Laser beam welding: benefits, strategies and applications. *Weld., J.*, 2007, nr 5.
5. Akman E., Demir A., Canel T., Sinmazcelik T.: Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009).
6. Naeem M. Controlling the Pulse in Laser Welding. weldingdesign.com/equipment-automation/news/wdf_11036.
7. Malek Ghaini F., Hamed M.J., Torkamany M.J., Sabbaghzadeh J.: Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd: YAG laser welding. *Scripta Materialia* 56 (2007), 955–958.
8. Shannon Geoff J.: Spot and seam welding applications using Nd:YAG lasers (www.muc.miyachi.com/res_resources/pdf/Unitek_miyachi_Westec_paper_LRM.pdf).
9. Laser-Schweißen in der Mikro-Material-Bearbeitung. www.laser-tech-gmbh.de.

Recenzent:
Józef GAWLIK

Laser beam welding of the small-sized elements in the Instytut Spawalnictwa Laser Centre

Key words

Laser beam welding, pulsed laser welding, weldability, small-sized elements, welding process parameters stabilization.

Summary

The Instytut Spawalnictwa Laser Centre has been presented. Pulsed laser process and its significant parameters have been discussed. Application examples of the pulsed laser welding on the small sized elements (thin wall elements) have been showed. Technological problems and difficulties have been scheduled.