

dr hab. inż. Zygmunt Mikno  
Zastępca Dyrektora ds. Badawczych  
Instytutu Spawalnictwa - Sieć Badawcza Łukasiewicz

# Nie tylko spawanie łukowe

**S**POŚRÓD RÓŻNYCH PROCESÓW ŁĄCZENIA materiałów konstrukcyjnych możemy wyróżnić te, które w swoim procesie wykorzystują skoncentrowaną wiązkę energii. Do takich procesów możemy zaliczyć spawanie laserowe czy wiązką elektronów.

Skoncentrowaną wiązkę promieniowania laserowego można wykorzystać do spawania różnymi metodami. Najczęściej stosowaną metodą spawania laserowego jest przetapianie nieukosowanego styku łączonych elementów jedną zogniskowaną wiązką promieniowania (metoda klasyczna).

Jeśli chodzi o proces spawania laserowego, to na przestrzeni lat opracowano różne odmiany, techniki procesu, mające na celu taką jego modyfikację, aby była możliwość rozszerzenia zastosowania spawania laserowego w produkcji. Do takich odmian należy spawanie laserowe z ogniskowaniem wiązki w dwóch punktach, spawanie wiązką skanującą, lutowanie laserowe, spawanie laserowe z materiałem dodatkowym w postaci drutu.

## Spawanie hybrydowe

Jedną z najbardziej perspektywicznych, innowacyjnych metod stosowanych do spawania materiałów z wykorzystaniem lasera staje się obecnie spawanie hybrydowe laser + łuk elektryczny HLAW (Hybrid Laser Arc Welding).

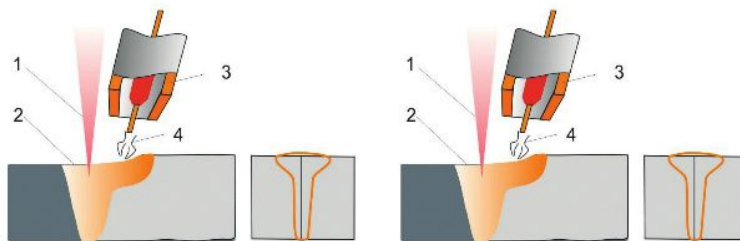
Spawanie hybrydowe polega na jednoczesnym wykorzystaniu, w tym samym miejscu i w tym samym czasie, dwóch źródeł ciepła (rys. 1a), tj. promieniowania laserowego i łuku elektrycznego (MIG, MAG, plazma). Hybrydowy proces spawania laserowego, w którym wykorzystywane jest źródło ciepła w postaci sprzężonej – wiązka promieniowania laserowego i łuk elektryczny, jest procesem wykazującym szereg zalet w odniesieniu do każdego z tych procesów z osobna.

Jednoczesne zastosowanie lasera oraz metod łukowych w metodzie hybrydowej, łączący w sobie głęboki przetop przy niskiej energii liniowej z dobrymi właściwościami złączy i większą tolerancją przygotowania elementów do spawania, ponieważ charakter procesu i dodatek spoiwa pozwalają wypełnić niewielką szczelinę w styku. Wzajemne oddziaływanie tych dwóch źródeł ciepła powoduje wzrost wydajności spawania poprzez zwiększenie prędkości spawania lub grubości spawanych elementów.

Metoda jednoczesnego spawania laserem i łukiem elektrycznym, kiedy te dwa źródła nie oddziałują w jednym jezioro roztopionego metalu (rys. 1b), nie jest metodą hybrydową, a wg normy ISO 15609-6 jest nazywana procesem kombinowanym (combined process) [2].

## Badania i wdrożenia

Badania nad spawaniem hybrydowym rozpoczęto niemal w tym samym czasie jak badania nad klasycznym procesem spawania laserowego. Pierwsze wzmianki o połączeniu dwóch źródeł ciepła (laser + łuk), zostały opisane w publikacji pt. „Laser zasili łuk w obróbce materiałowej” w Journal of Applied Physics w 1980 r. W początkach rozwoju metody większość prac badawczych była prowadzona z wykorzystaniem laserów o niewielkiej mocy i była skoncentrowana na kombinacji laser + metoda MIG/MAG. Wkrótce potem zaczęto prowadzić prace badawcze



Rys. 1a. Schemat procesu spawania hybrydowego laser + łuk elektryczny, gdzie: 1) wiązka laserowa, 2) wspólne dla obu metod jezioro roztopionego metalu, 3) palnik metody łukowej, 4) łuk elektryczny

Rys. 1b. Metoda kombinowana laser + łuk elektryczny, gdzie: 1) wiązka laserowa, 2) jezioro roztopionego metalu utworzone oddziaływaniem wiązki lasera, 3) palnik metody łukowej, 4) łuk elektryczny, 5) jezioro roztopionego metalu utworzone oddziaływaniem łuku

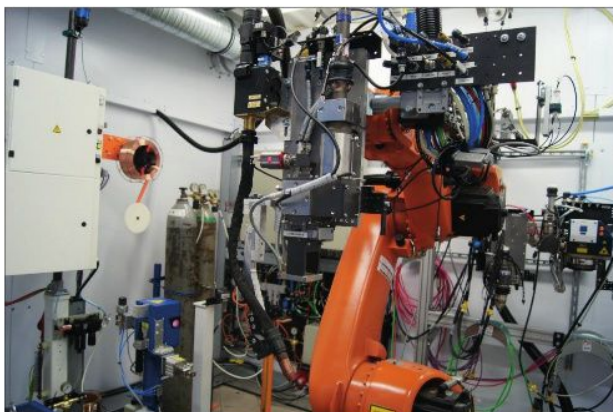
nad połączeniem lasera z innymi źródłami łukowymi, metodą TIG (1984) oraz łukiem plazmowym (1995).

Wyniki wczesnych badań wskazywały, że może to być metoda o dużym potencjale w zastosowaniach przemysłowych. Podczas badań nad procesem hybrydowym, naukowcy prowadzący je napotykali różne problemy. Trudności związane z opanowaniem metody na pierwszym etapie badań były związane z małą mocą i precyzją ogniskowania dostępnych wówczas laserów. Jeden z naukowców prowadzących wówczas badania stwierdził: „Czułem, że dużą wadą naszych badań, które prowadziliśmy było to, że mieliśmy duży, „niezgrabny”, stary laser i nie byliśmy w stanie dobrze skupić wiązkę promieniowania laserowego”. Niewielkie zastosowanie przemysłowe procesu hybrydowego w tym okresie było związane z ryzykiem braku powtarzalności uzyskiwanych wyników w warunkach przemysłowych z uwagi na niedoskonałości sprzętu i z powodu zapewnienia stabilności dużej ilości zmiennych parametrów procesu.

W początkowym okresie główne zainteresowanie wykorzystaniem spawania hybrydowego, było spowodowane dążeniem do zwiększenia wydajności produkcji dla zastosowań wojskowych, np. przy spawaniu stali HY-80 wykorzystywanej do produkcji okrętów podwodnych, jak również przy spawaniu rurociągów stalowych dalekiego zasięgu.

W roku 1990, niemiecka stocznia Meyer Werft Shipbuilding we współpracy z Instytutem RWTH z Aachen rozpoczęła prace nad wykorzystaniem metody hybrydowej w przemyśle stoczniowym. Efektem tej współpracy było uruchomienie w tej stoczni w 1999 r. nowej linii technologicznej do spawania płyt pokładu i usztywnień grodzi statku za pomocą spawania hybrydowego z wykorzystaniem lasera CO<sub>2</sub>. Był to znaczący postęp w rozwoju metody hybrydowej. W wyniku akceptacji przemysłowej technologii spawania hybrydowego opracowane zostały wówczas i przyjęte przez odpowiednie towarzystwa klasyfikacyjne nowe standardy i warunki odbiorowe w przemyśle stoczniowym.

Badania nad technologią hybrydową i jej wdrożeniem do przemysłu stoczniowego prowadzone były również w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie. Firma Applied Thermal Sciences (ATS), współpracowała w tym zakresie z Amerykańską Marynarką Wojenną. Pierwszym zastosowaniem tych badań było wykorzystanie spawania hybrydowego do połączenia elementów konstrukcji statku ze stali HSLA oraz spawania, wykonanych ze stali nierdzewnej, lekkich płyt warstwowych LASCOR (paneli



Fot. 1. Zrobotyzowane stanowisko ze specjalistyczną głowicą do spawania hybrydowego w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa: laser Yb:YAG Trumpf TruDisk 12002 12 kW, głowica KS HybridTec firmy KUKA, źródło prądu Tetrix T270 firmy EWM

typu sandwich). Panele te wykorzystywano do budowy prototypowych okrętów wojennych nowej generacji typu DDG-1000 budowanych w stoczni Bath Iron Works.

Po roku 2000 nastąpił duży postęp technologiczny w zakresie budowy laserów, który w znacznym stopniu wpłynął na rozwój procesu spawania hybrydowego. Obok dotychczas wykorzystywanych w zastosowaniach spawalniczych laserów CO<sub>2</sub>, laserów lampowych Nd:YAG i diodowych pojawiły się na rynku lasery dyskowe i włóknowe

Badania nad technologią spawania hybrydowego i jej wdrożeniem do przemysł były i są prowadzone również w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach. W 2007 r. nie dysponując wówczas specjalistycznym sprzętem w oparciu o standardowe systemy laserowe i źródła prądu metod łukowych zbudowano stanowisko laboratoryjne do spawania hybrydowego laser + MIG/MAG. W 2010 r. z funduszy unijnych tym samym udało się rozbudować Laboratorium Technologii Laserowych, wyposażone w zrobotyzowane stanowisko do spawania hybrydowego i laser dyskowy Yb:YAG Trumpf TruDisk 12002 12 kW, specjalistyczną głowicą do spawania hybrydowego KS HybridTec firmy KUKA oraz źródło łukowe Tetrix T270 firmy EWM (fot. 1).

W porównaniu do klasycznych metod łukowych spawanie hybrydowe laserowe jest procesem, który powoduje również zwykle mniejsze deformacje konstrukcji z uwagi na zoptymalizowany kształt spoiny oraz mniejszą ilość wprowadzonego ciepła do konstrukcji w porównaniu do klasycznych metod łukowych.

Zakres stosowania hybrydowej metody spawania laser + łuk elektryczny (MIG/MAG) w przemyśle ciągle wzrasta. Z uwagi na korzyści, które możemy osiągnąć, w ostatnich latach proces ten znalazł zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu m.in. w przemyśle stoczniowym, motoryzacji i transporcie, energetyce jak również przy produkcji rurociągów do transportu ropy i gazu.

Jeśli chodzi o rynek krajowy, to proces spawania hybrydowego (HLAW) znalazł zastosowanie w produkcji elementów nadwozi naczip do samochodów ciężarowych, jak również w przemyśle energetycznym czy kotlarskim w produkcji kotłów grzewczych. Warto nadmienić, że proces ten jest stosowany wyłącznie w aplikacjach zmechanizowanych lub zautomatyzowanych, co powoduje że firmy te stają się zakładami nowoczesnymi z innowacyjnymi procesami spawania.

### Spawanie wiązką elektronów

Drugą nowoczesną wysokenergetyczną technologią stosowaną przy wytwarzaniu różnorodnych konstrukcji jest spawanie

wiązką elektronów. Pomimo długiej historii [1–3] samego procesu, spawanie i modyfikowanie powierzchni z wykorzystaniem wiązki elektronów to wciąż prężnie rozwijająca się dziedzina tak od strony zastosowań przemysłowych, jak i naukowych. Do niedawna sądzono, że szybki rozwój technologii laserowej, zwłaszcza laserów wykorzystujących generatory ciała stałego i włóknowych spowoduje, że technologie elektroneowe stracą na znaczeniu. Tak się jednak nie stało, a wręcz przeciwnie: technologie jak i urządzenia są stale rozwijane. Technologie elektroneowe są zwłaszcza użyteczne w przemyśle [4–6]:

- motoryzacyjnym; spawanie elementów przekładni zębatych, korpusów silników, czujników, chłodziw, wałów korbowych, trzonów tłokowych, grzybków zaworów, filtrów, katalizatorów, turbosprężarek, felg, poduszek powietrznych i wielu innych;
- lotniczym; spawanie tytanowych zbiorników na propylen stosowanych w satelitach i raketach, zbiorników aluminiowych, dysz ciągu, wtrysków paliwa, elementów kadłubów z tytanu, podłokietników, stojanów, łopatek i osłon turbin, dysków w wirniku bębnowym sprężarek osiowych, den sitowych w raketach;
- energetycznym i elektroenergetycznym; spawanie elementów turbin, łopatek, wysokoprądowych elastycznych łączników, pojemników na odpady promieniotwórcze;
- budowie maszyn; spawanie elementów haków transportowych w silnikach okrętowych, piecy do niszczenia zużytej amunicji, kół i przekładni zębatych, cylindrów hydraulicznych (siła 15.000 kN), czujników temperatury i odkształceń, ram mikroskopów ze stopu aluminium, komutatorów, pił taśmowych, narzędzi wiertniczych, krystalizatorów do ciągłego odlewania stali, wysokociśnieniowych zaworów;
- medycynie; spawanie elementów przekładni zębatych w protezach kończyn, szybkie prototypowanie elementów endoprotez, modyfikacja powierzchni implantów;
- szynowym i kolejnictwie; spawanie elementów wagonów jak np. belek poprzecznych ze stopów aluminium, haków holowniczych, tulei łożyskowych, elementów zwrotnic, sprzęgieł cardana;

wszędzie tam, gdzie najnowocześniejsze materiały do pracy w ekstremalnych warunkach nie mogą być łączone innymi metodami, jak na przykład stale super-wysokowytrzymałe o większych grubościach, dla których nie ma materiałów dodatkowych do spawania metodami łukowymi, a spawanie wiązką laserową w jednym przejściu jest niemożliwe, albo materiały reaktywne i trudnotopliwe, jak wolfram, cyrkon, hafn, tantal, iryd, wanad i ich stopy.

Spawanie wiązką elektronów polega na wykorzystaniu energii kinetycznej silnie skoncentrowanej wiązki elektronów bombardującej spawaną powierzchnię elementu umieszczonego w komorze próżniowej. Urządzenia spawalnicze, mogą być również



Fot. 2. Urządzenia elektroneowe do spawania i modyfikowania powierzchni w Łukasiewicz – Instytucie Spawalnictwa

wykorzystywane m.in. do napawania, lutowania, teksturyzacji powierzchni i szybkiego prototypowania oraz do napraw i regeneracji zużytych lub uszkodzonych elementów [7–11].

Nowoczesne elektronowe urządzenia do spawania i modyfikowania powierzchni gwarantują stabilność parametrów prowadzenia procesu technologicznego, pełną powtarzalność wyników oraz swobodną możliwość programowania. Urządzenia uniwersalne, dostępne z „katalogu” o napięciu przyspieszającym 150 kV, umożliwiają wykonywanie złączy spawanych ze stali o grubościach przekraczających 100 mm. Zasadniczą zaletą procesu spawania wiązką elektronów jest możliwość wykonywania najtrudniejszych połączeń materiałowych oraz złączy spawanych w konstrukcjach o bardzo dużej grubości lub w niedostępnych innymi metodami spawalniczymi miejscach. Ponadto przy użyciu nowych urządzeń można również spawać elementy o bardzo małej grubości, rzędu mikrometrów z bardzo dużymi prędkościami. Co ważne, spawanie wiązką elektronów jest jedyną technologią pozwalającą na wykonywanie złączy z materiałów o znacznie różniących się własnościach fizyko-chemicznych, bez stosowania warstw buforowych (pośredniczących), oraz materiałów trudnospawalnych metodami łukowymi. Technologia umożliwia: wykonanie spoiny w miejscu trudnodostępnym, bardzo wąskich spoin przy znacznie ograniczonej strefie wpływu ciepła i minimalnych odkształceniach w złączu spawanym, łączenie materiałów bez ukosowania krawędzi i w większości przypadków bez materiałów dodatkowych. W wielu zastosowaniach spawanie wiązką elektronów jest jedyną możliwą technologią do zastosowania i nawet najnowszej generacji urządzenia laserowe oparte o generatory ciała stałego nie są w stanie tego zmienić. Do takich zastosowań należy m.in. spawanie elementów turbin.

### Literatura

- [1] Meleka A.H.: Electron beam welding: principles and practice. McGRAW-HILL, London, 1971.
- [2] Myśliwiec M., Oparty-Myśliwiec D.: Techniki wytwarzania. Spawalnictwo. PWN 1981 Warszawa.
- [3] Klimpel A.: Spawanie zgrzewanie i ciecie metali. WNT Warszawa 1999.
- [4] Dobeneck D.: Those who rest will rust! The development of the technology and market for electron beam welding is being pushed by economic pressure. Welding in the World, 2007, vol. 51, 89–96.
- [5] Volker A., Uwe C., Dobeneck D.: Electron beam welding. The fundamentals of a fascinating technology. Pro-beam AG & Co. KGaA, 2011.
- [6] Ripper G.: Electron beam welding. Actual applications in the aerospace industry. International Electron Beam Welding Conference, Aachen, 2012.
- [7] Fu P., Mao Z., Yu W., Gong S., Tang Z.: Microstructure and properties of simultaneous EBW and heat treatment with multi-pools for near  $\alpha$  titanium alloy. International Electron Beam Welding Conference, Aachen, 2012.
- [8] Lachenberg K.: Electron beam near net shape processing using wire feed. Welding Journal, vol. 90, 2011, nr 1, 46–48.
- [9] Richter A., Krüssel Th., Just C.: Deposition welding with the electron beam as repair technology. International Electron Beam Welding Conference, Aachen, 2012.
- [10] Ribton C.N.: High productivity electron beam additive manufacturing. International Electron Beam Welding Conference, Aachen, 2012.
- [11] Buxton A.L., Oluleke R., Prangnell P.: Generating and assessing the quality and functionality of EB structured surfaces for dissimilar material joints. International Electron Beam Welding Conference, Aachen, 2012.

# BARNSHAWS POLSKA

**lider w branży, gęcia stali,  
wspiera polski przemysł energetyczny**

W ciągu ostatnich lat zespół Barnshaws Polska udowodnił, że żaden projekt nie jest dla nich niemożliwy. Specjaliści z Siemianowic Śląskich włożyli ogrom wysiłku w rozwój polskiego oddziału oraz w realizację procesów gęcia metalu różnymi metodami w najwyższych standardach jakościowych.

Firma z siedzibą na Górnym Śląsku z zaangażowaniem wspiera sektor energetyczny i tylko w tym roku zrealizowała zlecenia dla takich klientów jak PKN Orlen S.A., Naftoremont czy Izotechnik.

Pierwszy projekt dotyczył wykonania płaszczów na zbiorniki o pojemności 1000 m<sup>3</sup> do budowy nowoczesnej biorafinerii w Trzebnicy gdzie zakres prac obejmował wykrawanie, fazowanie oraz walcowanie blach o grubościach od 6 do 8 mm. Dodatkowo wykonano gęcie kątowników oraz ceowników usztywniających zbiorniki. Łączna waga zlecenia dla PKN Orlen to ponad 50 ton gętych stalowych elementów konstrukcyjnych.

Innym ciekawym zleceniem były wykonane dla Naftoremontu dźwigi dachu na 3 zbiorniki paliwowe o łącznej pojemności 32 000 m<sup>3</sup>. Zakres prac obejmował gęcie oraz docinanie 135 dwuteowników IPE450 o długości 21 m, a także 84 ceowników UPE400 do usztywnienia zbiornika. Jednakże głównym trzonem realizacji było wykonanie i spawanie niemal 3000 blach węzłowych – po 22 sztuki na każdy dźwigar. Łączna waga gętych elementów wynosiła niemal 320 ton.

Na uwagę zasługuje również projekt wykonany dla instalacji reaktora HDI (Innowacyjnej technologii umożliwiającej uwodornienie – utwardzenie – oleju rzepakowego, oleju posmażalniczego lub ich mieszanki), gdzie zostało wykonane wykrawanie, fazowanie oraz walcowanie blach platerowanych o grubości 56 mm. Łączna waga zlecenia to ponad 53 tony.

**MACIEJ WALKOWICZ, Dyrektor Barnshaws Polska, tłumaczy:**  
– Jesteśmy dumni, że nasza firma ma okazję pracować przy tak ważnych projektach. W dobre kryzysu energetycznego bardzo ważne jest wdrażanie nowych metod pozyskiwania paliw oraz energii. Nasza szeroka oferta usług pozwala nam podjąć się kompleksowej obsługi w zakresie precyzyjnego gęcia i obróbki elementów konstrukcji stalowych. Przekłada się to na niższe koszty i szybsze terminy realizacji dla klientów.

Barnshaws Polska oferuje gęcie profilu w rozmiarach do IPE 1000, gęcie rur stalowych do 508 mm oraz zwijanie blach do 3 m szerokości przy 20 mm grubości oraz 1,5 m szerokości i grubości 40 mm. Ponadto firma realizuje gęcie profilu aluminiowych w odseparowanej strefie wolnej od stali węglowej. W przypadku zapotrzebowania na gęcie większych rur, oddział Barnshaws w Wielkiej Brytanii posiada możliwość gęcia rur o średnicach do 1500 mm.

