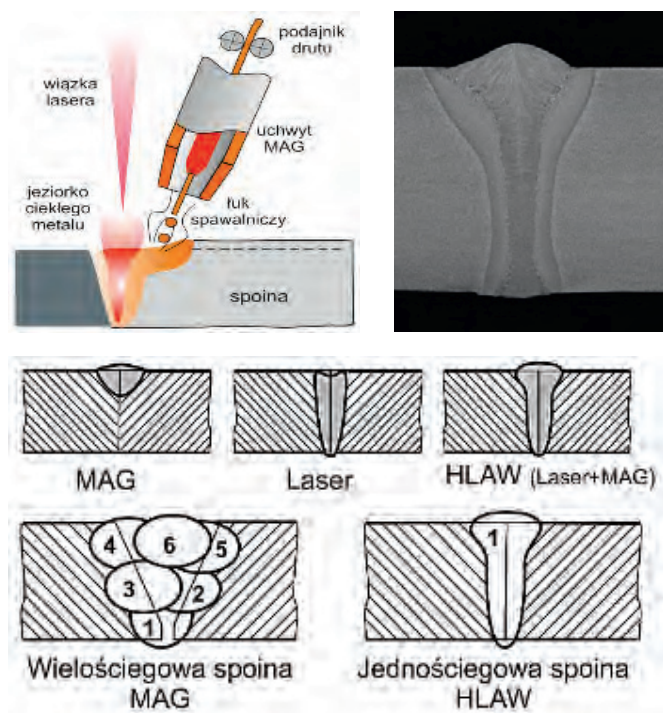


Spawanie hybrydowe (HLAW) laser + mig złączy stopów aluminium z serii 6xxx

Michał Urbańczyk

1. Wstęp

Proces spawania hybrydowego laser + MAG jest jedną z odmian procesu określanego w literaturze angielskiej jako HLAW (Hybrid Laser Arc Welding), tj. procesu, który polega na jednoczesnym wykorzystaniu dwóch źródeł ciepła – wiązki promieniowania laserowego i łuku elektrycznego, które w procesie spawania tworzą jedno wspólne jezioro spawalnicze (rys. 1a). Metoda hybrydowa laser + MIG/MAG jest procesem intensywnie badanym, rozwijanym i wdrażanym na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat. Zainteresowanie tą właśnie metodą hybrydową i jej rozwój wynikają z faktu, że spawanie hybrydowe laser + MAG/MIG jest wysokowydajnym jednościgowym procesem spawania, który może być zastosowany w dużym zakresie grubości łączonych elementów wykonanych z różnych gatunków stali. Proces ten, w odróżnieniu od spawania laserowego, stwarza również możliwość modyfikacji składu chemicznego spoiny i w wielu przypadkach rozwiązuje problem spawania elementów przygotowanych do spawania z odstępem większym niż wymagany przy spawaniu laserowym. Wdrażanie tej metody do produkcji ułatwia fakt, że do konstrukcji stanowisk do spawania hybrydowego metodą laser + MIG/MAG są wykorzystane podzespoły seryjnie wytwarzane przez producentów laserów,



Rys. 1. Spawanie hybrydowe HLAW: a) zasada metody spawania hybrydowego laser + łuk MIG/MAG, b) charakterystyczna makrostruktura spoiny wykonanej metodą HLAW, c) różnice pomiędzy kształtem spoiny przy spawaniu MAG, spawaniu laserowym oraz spawaniu hybrydowym laser + MIG/MAG

Streszczenie: W artykule opisano zalety innowacyjnej metody spawania hybrydowego laser + MIG. Przedstawiono wyniki badań własnych dotyczących spawania hybrydowego złączy doczołowych 5 + 5 mm ze stopu aluminium EN AW 6082 oraz wyniki badań wytrzymałości uzyskanego złącza. Badania wykazały, że proces spawania hybrydowego pozwala uzyskać złącza charakteryzujące się równomiernym gładkim licem i prawidłowo uformowaną granią spełniając wymagania poziomu jakości B wg normy PN-EN ISO 10042. Przeprowadzone badania metalograficzne makroskopowe nie ujawniły pęcherzy gazowych w spoinie. Badanie złącza doczołowego blach z aluminium o grubości 5 + 5 mm wykazało, że spełnia ono wymagania normy PN-EN ISO 15614-14.

Słowa kluczowe: spawanie hybrydowe laser + MIG, złącza doczołowe, aluminium EN AW-6082 AISi1MgMn

HYBRID (HLAW) LASER + MIG WELDING OF 6XXX SERIES ALUMINUM ALLOY JOINTS

Abstract: The article presents the advantages of the innovative laser + MIG hybrid welding method. The article present shows the results of own research on the hybrid welding of 5 + 5 mm butt joints of aluminum alloy EN AW 6082 and the results of strength tests of the obtained joint. The research revealed that the hybrid welding process makes it possible to obtain quality butt joints with the uniform face and the properly formed root (meeting the requirements of quality level B according to PN-EN ISO 10042). The macroscopic tests carried out did not reveal gas pores in the weld. Testing of the butt joint of 5 + 5 mm thick aluminum plates showed that it met the requirements of PN-EN ISO 15614-14.

Keywords: laser + MIG hybrid welding, butt joints, aluminum alloy EN AW-6082 AISi1MgMn

półautomatów MIG/MAG, manipulatorów spawalniczych (robotów i stanowisk sterowanych numerycznie). W metodzie tej mogą być również wykorzystane standardowe, popularne druty elektrodowe (lite i proszkowe) oraz standardowe mieszanki osłonowe stosowane w metodach MIG/ MAG [1 – 8].

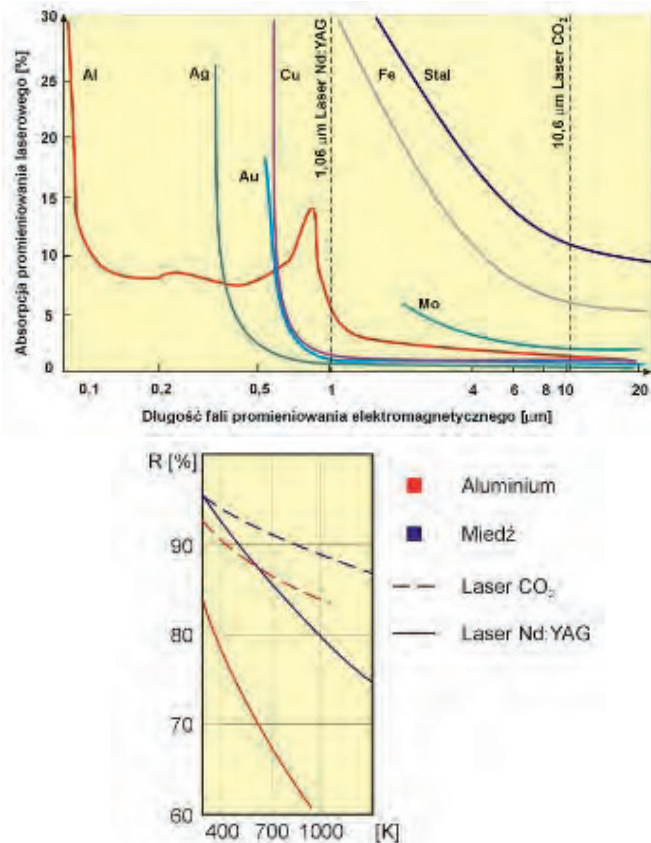
Schemat metody hybrydowej laser + MAG, jej zalety i różnice pomiędzy tradycyjną metodą spawania MAG a metodą hybrydową pokazano na rys. 1a i b. Typowy kształt spoiny uzyskanej w procesie spawania hybrydowego przedstawia rys. 1c.

Proces spawania laserowego oraz hybrydowego jest wykorzystywany do spawania różnych gatunków stali i stopów aluminium.

Aluminium i jego stopy to bardzo ważna grupa materiałów konstrukcyjnych, z których wytwarzane są różnorodne konstrukcje dla kluczowych dziedzin przemysłu i gospodarki. Wykonywane są zarówno konstrukcje wielkogabarytowe, jak i niewielkie podzespoły.



Rys. 2. Przykładowe wykorzystanie spawania laserowego i hybrydowego w przemyśle motoryzacyjnym do łączenia elementów konstrukcyjnych z aluminium: a) konstrukcja dachu spawana z wykorzystaniem metody laser+ MIG w sam. Audi A8, b) elementy drzwi, c) elementy baterii, d) element osi Mercedesa S-Class (Daimler) [9 – 12]



Rys. 3. Zmiany współczynnika absorpcji oraz współczynnik odbicia R promieniowania laserowego dla aluminium i miedzi w zależności od: a) długości fali promieniowania elektromagnetycznego, b) temperatury metalu [12]

Zastosowaniem metody HLAW w seryjnej produkcji różnorodnych konstrukcji ze stopów aluminium najbardziej zainteresowane są: przemysł stoczniowy, wytwórcy sprzętu AGD, przemysł lotniczy oraz motoryzacja (elementy karoserii, zawieszenia samochodów, naczep oraz baterii) (rys. 2).

W porównaniu ze stałą przy spawaniu aluminium wymagane są większe gęstości mocy niezbędne do inicjacji procesu i utworzenia kapilary (kanału gazodynamicznego). Wynika to z faktu, iż aluminium i jego stopy charakteryzują się stosunkowo niskim współczynnikiem absorpcji promieniowania laserowego (rys. 3).

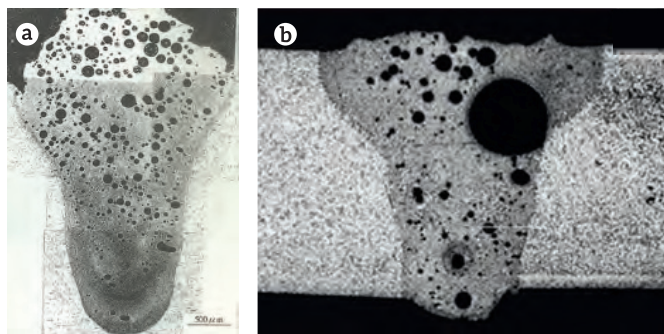
W literaturze [11, 12] można znaleźć informację dotyczącą minimalnej wartości gęstości mocy jaka jest niezbędna do zainicjowania procesu spawania z głębokim przetopieniem stopów aluminium – $1,5 \cdot 10^6$ [W/cm²] dla długości fali promieniowania 1,06 [μm] oraz $4 \cdot 10^6$ [W/cm²] dla długości fali promieniowania 10,6 [μm]. Stąd do spawania laserowego obecnie stosowane są najczęściej najnowsze, intensywnie rozwijane w ostatnich latach różne typy laserów YAG oraz lasery włóknowe.

Do najczęściej spotykanych niezgodności spawalniczych jakie mogą pojawić się w złączach spawanych aluminium należą: porowatości spoin, pęknięcia, miejscowe braki przetopu, podtopienia i wycieki od strony grani spoiny [12 – 14].

Jak podają autorzy w pracy [13], w czasie spawania laserowego stopów aluminium z głębokim wtopieniem (z oczkiem) kapilarną, szczególnie w dolnej części, jest bardzo niestabilna ze względu na niższą lepkość stopów aluminium w porównaniu ze stałą. Prowadzi to do licznych zamknięć (zasłepienia) kapilary,

reklama

reklama



Rys. 4. Makrostruktura spoiny spawanej laserem: a) stop AW 5182 (laser CO₂, moc lasera 4,2 kW, prędkość spawania 4 m/min) b) stop EN AC - 43000 - AlSi10Mg, (laser Yb:YAG, moc lasera 4 kW, prędkość spawania 3 m/min) [13, 14]

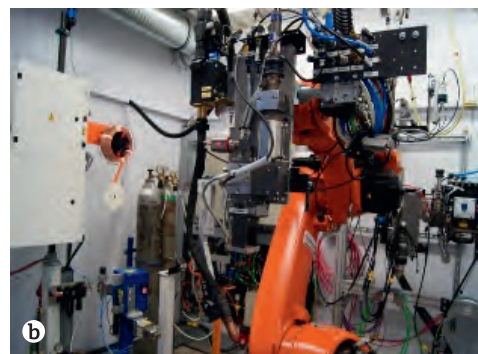
co skutkuje pojawianiem się dużej ilości porów i pęcherzy; są to tzw. pory procesowe (rys. 4). Uniknięcie (odgazowanie) tych porów jest bardzo trudne ze względu na bardzo małe jeziorko spawalnicze i relatywnie krótki czas przebywania metalu w stanie roztopionym podczas spawania laserowego.

Zjawisko występowania porowatości w przypadku spawania laserowego aluminium ogranicza przede wszystkim głębokość wtopienia, tj. grubość spawanych elementów. Podstawowe sposoby przeciwdziałania temu zjawisku, jakie najczęściej są stosowane, sprowadzają się do powiększenia jeziorka spawalniczego i wydłużenia czasu przebywania metalu w stanie ciekłym. Jednym z takich sposobów jest stosowanie innowacyjnych procesów spawania jak spawanie hybrydowe (HLAW) [15].

Metoda HLAW w zastosowaniu do spawania stopów aluminium pozwala na większą elastyczność w zakresie regulacji energii liniowej procesu (dobór i ustalenie proporcji mocy obu źródeł) oraz możliwość precyzyjnego kształtowania geometrii spoiny (sposób ogniskowania lasera i ustawienie łuku), co w przypadku spawania stopów aluminium może mieć istotne znaczenie i decydować o uzyskaniu złączy bez pęcherzy gazowych i innych niezgodności spawalniczych.

2. Przebieg i wyniki badań

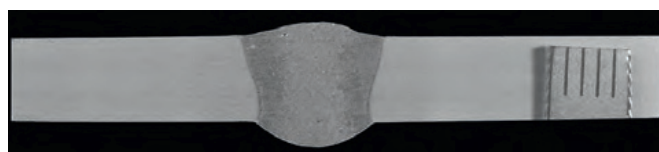
Próby spawania hybrydowego laser + MIG stopu aluminium przeprowadzono na zrobotyzowanym stanowisku, w skład którego wchodził laser dyskowy najnowszej generacji TruDisk 12002 oraz robot spawalniczy KUKA KRC30HA wyposażony w głowicę do spawania hybrydowego z podajnikiem spoiwa w postaci drutu (rys. 5). Tego typu systemy są instalowane obecnie w nowoczesnych przemysłowych liniach zrobotyzowanych. Odpowiednie skonfigurowanie stanowiska umożliwia jego zastosowanie zarówno do procesów spawania laserowego z podawaniem drutu, jak i do spawania hybrydowego laser + MIG/MAG lub tylko spawania łukowego MIG/ MAG. Stanowisko wyposażone jest w niezależne inwertorowe, synergiczne źródło prądu przeznaczone do metody MIG/MAG. Sterowanie



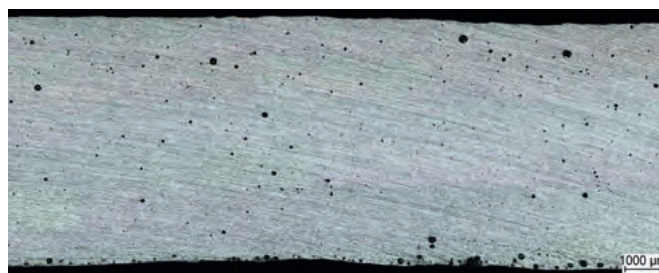
Rys. 5. Uniwersalne stanowisko do spawania metodą HLAW w Centrum Spawalnictwa Łukasiewicz – GIT: a) widok stanowiska z laserem dyskowym TruDisk 12002 i kabiną ochronną, b) wnętrze kabiny – robot z głowicą do spawania hybrydowego



Rys. 6. Radiogram złącza doczołowego 5 + 5 mm wykonanego metodą HLAW



Rys. 7. Makrostruktura spawanego hybrydowo złącza doczołowego blach o grubości 5 + 5 mm



Rys. 8. Mikrostruktura spawanego hybrydowo złącza doczołowego blach o grubości 5 + 5 mm

Tabela 1. Skład chemiczny płyt próbnych z aluminium EN AW 6082

Podstawa	Mg%	Mn%	Si%	Cu%	Zn%	Cr%	Ti%	Fe%	Al%
Karta katalogowa	0,60±1,20	0,40±1,00	0,70±1,30	≤ 0,10	≤ 0,20	≤ 0,25	≤ 0,10	≤ 0,50	reszta

parametrami prądowymi źródła oraz parametrami lasera, po stworzeniu specjalnego oprogramowania, odbywa się z pulpitu sterowania kontrolera robota.

Skład chemiczny użytych blach z aluminium o grubości 5 mm wg danych katalogowych producenta zestawiono w tabeli 1. Jest on zgodny z danymi katalogowymi producenta blach aluminiowych i spełnia wymagania normy PN-EN 573-1 [16].

Jako spoiwo wykorzystano drut elektrodowy Al 5087 (AlMg4,5MnZr) wg EN ISO 18273 o średnicy 1,2 mm firmy Böhler. Jako gaz osłonowy w metodzie MIG został wykorzystany argon (Ar 100%).

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-14:2013 [17] dotyczącej kwalifikowania technologii spawania hybrydowego badania przeprowadzano na złączach próbnych blach o wymiarach 350 mm × 150 mm. Wykonano jednostronne złącza doczołowe z brzegami elementów przygotowanymi na I (nr 1.2.2 wg PN-EN ISO 9692-1:2014-02) z odstępem $b = 0$ mm blach o grubości 5 + 5 mm. Próbki były mocowane w oprzyrządowaniu umożliwiającym prowadzenie procesu spawania w pozycji podolnej PA.

Dla uzyskanego złącza przeprowadzono badania nieniszczące i niszczące. Na rys. 6 przedstawiono radiogram

złącza doczołowego, natomiast na rys. 7 przedstawiono makrostrukturę złącza.

Przeprowadzone badania wizualne wykazały, że uzyskane złącze charakteryzowało się równomiernym gładkim licem bez odprysków i prawidłowo uformowaną granią. Przeprowadzone badania radiograficzne nie wykazały niezgodności spawalniczych (pory pęknięcia), a uzyskane złącze spełnia poziom jakości B wg PN-EN ISO 10042 [18].

Kolejnym etapem były badania metalograficzne makroskopowe. W celu ujawnienia makrostruktury próbki trawiono w odczynniku Kellera. Czas trawienia wynosił ok. 7 ÷ 8 s. Badania metalograficzne makroskopowe nie ujawniły wewnętrznych niezgodności spawalniczych (rys. 7). Badania metalograficzne mikroskopowe ujawniły niewielkie mikropory w postaci kulistych pęcherzy. Jak wykazały pomiary ujawnionych mikropęcherzy, rozmiar ich średnic zawierał się w granicach od 20 do 60 μm ; pojedyncze pęcherze miały średnice maks. 140 μm (rys. 8).

Dla uzyskanego złącza przeprowadzono badania własności mechanicznych (rozciąganie) zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-14. Wytrzymałość na rozciąganie złącza nie powinna być mniejsza niż wartość minimalna wytrzymałości

materiału podstawowego. Badane złącze spełniło warunek $R_m \geq 196$ MPa, uzyskując średnią wartość $R_m \geq 217$ MPa (otrzymując odpowiednio 219 i 215 MPa), przy czym zerwanie próbek nastąpiło w spoinie.

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-14 dot. kwalifikowania technologii spawania złącze spełnia wymagania poziomu jakości B.

3. Podsumowanie

Spawanie hybrydowe laser + MAG jest obecnie perspektywiczną innowacyjną technologią spawania, która może być wykorzystana do łączenia stopów aluminium. Przeprowadzone badania wykazały, że stosując tę metodę do łączenia blach z aluminium EN AW 6082 o grubości 5 + 5 można uzyskać jakościowe złącza doczołowe, z gładkim licem i prawidłowo uformowaną granią. Przeprowadzone badania metalograficzne makroskopowe nie ujawniły pęcherzy gazowych. Badania mikroskopowe ujawniły niewielkie mikropory w postaci kulistych pęcherzy.

Przeprowadzone badania złącza doczołowego blach o grubości 5 + 5 mm ze stopu aluminium z gatunku EN AW 6082 wykazały, że spełnia ono wymagania normy PN-EN ISO 15614-14 dotyczącej kwalifikowania technologii spawania hybrydowego.

Literatura

- [1] M.V. Brian: *Hybrid laser arc welding*, Edison Welding Institute, ASM Handbook, Volume 6A, Welding Fundamentals and Processes 2011, www.asminternational.org
- [2] PN-EN ISO 15609-6:2013, *Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Instrukcja technologiczna spawania. Część 6: Spawanie hybrydowe laserowo-lukowe.*
- [3] H. Lembeck: *Laser hybrid welding of thick sheet metals with disk lasers in shipbuilding industry*, International Laser Technology Congress AKL2010.
- [4] C. Macchietto: *Hybrid laser arc welding (HLAW)*, Valmont Industries, 2011.
- [5] <http://www.trumpflaser.com/en/solutions/applications/laser-welding/hybrid-welding.html>
- [6] P. Denney: *Hybrid Laser Arc Welding Has Its Time Finally Arrived?*. <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/mc1129.pdf>
- [7] http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_international/hs.xml/79_687_ENG_HTML.htm#.VSOHnvlV8E
- [8] M. Banasik, M. Urbańczyk: *Spawanie metodą hybrydową laser + MAG różnych rodzajów złączy*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol. 61, nr 1, s. 20 – 25, 2017.
- [9] H. Staufer: *A look at laser hybrid welding in the automotive industry*, The Fabricator, October 5, 2016, Fronius.
- [10] H. Bugłacki, G. Nesor: *Właściwości złączy spawanych stopów aluminium stosowanych w budownictwie okrętowym*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 45, nr 5, 2001.
- [11] P. Seyffarth, J. Hoffmann, U. Jasna: *Nd:YAG-Laser-MSG-Hybridschweißen von Aluminiumlegierungen im Schiffbau*. DVS Berichte Band 225 (ISBN 3-87155-683-1) Schweißen und Schneiden 2003.
- [12] K.E. Knipström: *New welding method for aluminium*. Svetsaren, 1995, nr 3.
- [13] G. Cao, S. Kou: *Predicting and reducing liquation-cracking susceptibility based on temperature vs. fraction solid*, Welding Journal. 2006. Vol. 85. N 1. P. 9-s-18-s.
- [14] S. Völkers, S. Böhm, V. Somonov: *Porosity reduction in the laser beam welding of aluminium die cast alloys through the overlapping of mechanically induced sound waves*, Journal of Physics: Conf. Series 1109 (2018) 012019.
- [15] M. Banasik, M. Urbańczyk: *Spawanie hybrydowe (HLAW) laser + MIG złączy stopów aluminium z serii 6xxx*, 2018. Praca badawcza nr ST 382/18 (Ac-147), Gliwice 2018.
- [16] PN-EN 573-1:2006, *Aluminium i stopy aluminium. Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie. Część 1: System oznaczeń numerycznych.*
- [17] PN-EN ISO 15614-14:2013-10, *Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Badanie technologii spawania. Część 14: Spawanie hybrydowe laserowo-lukowe stali, niklu i stopów niklu.*
- [18] PN-EN ISO 10042:2018-09, *Spawanie. Złącza spawane lukowo w aluminium i jego stopach. Poziomy jakości dla niezgodności spawalniczych.*



dr inż. Michał Urbańczyk

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Spawalnictwa, Grupa Badawcza Technologie Spawalnicze
ul. Bł. Czesława 16-18, 44-100 Gliwice