

Spawanie hybrydowe laser + MAG elementów urządzeń dźwigowych wykonanych ze stali ulepszonej cieplnie S960QL

Hybrid laser+MAG welding of lifting equipment elements made of S960QL quenched and tempered steel

Streszczenie

W artykule opisano zalety metody spawania hybrydowego laser+MAG. Przedstawiono wyniki badań spawania hybrydowego złącza doczołowych 5 + 5 i 5 + 7 mm ze stali S960QL oraz wyniki badań wytrzymałości, udarności i twardości uzyskanych złączy. Badanie złącza doczołowego blach o grubości 5 + 7 mm wykazało, że spełnia ono wymagania PN-EN ISO 15614-14.

Słowa kluczowe: spawanie hybrydowe laser + MAG; złącza doczołowe; stal S960QL

Abstract

The article describes the advantages of laser + MAG hybrid welding method. The results of research hybrid welding of 5 + 5 and 5 + 7 mm butt joints S960QL steel and strength and toughness tests of obtained joints were presented. Testing of 5 + 7 mm thick butt joints showed that it meets the requirements of the PN-EN ISO 15614-14 standard.

Keywords: laser + MAG hybrid welding; butt joints; S960QL steel

Wstęp

Proces spawania hybrydowego laser + MAG jest jedną z odmian procesu określanego w literaturze anglojęzycznej 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 jednościegowym 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 wykorzystywane podzespoły seryjnie wytwarzane przez producentów laserów, 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].

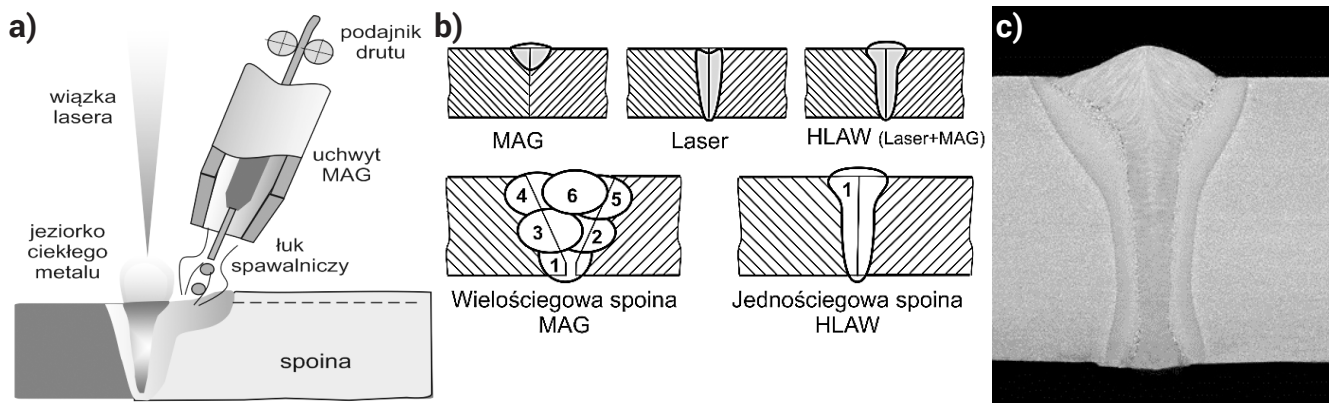
Schemat metody hybrydowej laser + MAG, jej zalety i różnice pomiędzy tradycyjną metodą spawania MAG a metodą hybrydową pokazano na rysunku 1a i 1b. Typowy kształt spoiny uzyskanej w procesie spawania hybrydowego przedstawia rysunek 1c.

Proces spawania hybrydowego jest wykorzystywany do spawania różnych gatunków stali konstrukcyjnych niestopowych i niskostopowych o podwyższonej wytrzymałości, stali do pracy w podwyższonych temperaturach i innych. Metodą hybrydową laser + MAG stosuje się do spawania złączy o grubości od kilku do kilkunastu milimetrów zarówno w konstrukcjach niewielkich rozmiarów, jak i w konstrukcjach wielkogabarytowych [9÷12].

Jednym z obszarów produkcji, w którym prowadzi się intensywne badania i pojawiają się wdrożenia metody hybrydowej laser + MAG jest produkcja urządzeń dźwigowych, np. dźwigów stacjonarnych i samobieżnych, podnośników, suwnic i innych [11,12]. Wykonywane są one najczęściej ze stali ulepszonych cieplnie o podwyższonej granicy plastyczności. Stale te są stosowane z uwagi na możliwość

Dr inż. Marek Banasik; dr hab. inż. Eugeniusz Turyk; mgr inż. Michał Urbańczyk – Instytut Spawalnictwa, Gliwice.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: marek.banasik@is.gliwice.pl

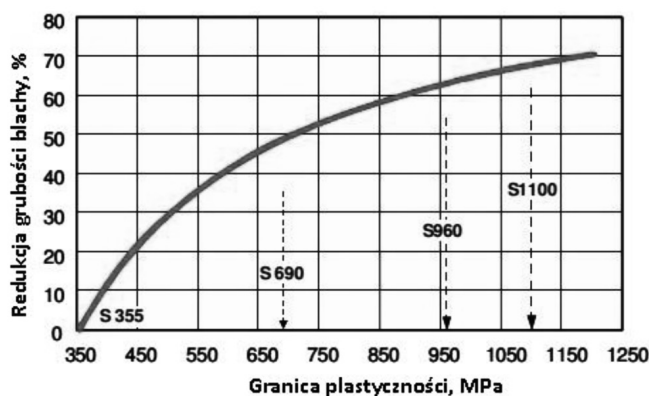


Rys. 1. a) zasada metody spawania hybrydowego laser + MAG; b) różnice pomiędzy kształtem spoiny przy spawaniu MAG, spawaniu laserowym oraz spawaniu hybrydowym laser+MAG; c) charakterystyczna makrostruktura spoiny wykonanej metodą HLAW
Fig. 1. a) principle of the laser + MAG hybrid welding method; b) the differences between the shape of the weld made by MAG, laser and laser + MAG hybrid welding; c) characteristic macrostructure of a HLAW weld

zmniejszenia grubości elementów konstrukcyjnych (rys. 2), co skutkuje obniżeniem masy konstrukcji i kosztów inwestycji przy zachowaniu bardzo wysokich własności wytrzymałościowych [13,14].

Jako przykład mogą posłużyć spawane rury teleskopów wysięgników dźwigów samobieźnych. Rura teleskopu jest konstrukcją wykonywaną z dwóch zespalanych segmentów (tzw. U-profilu), wcześniej precyzyjnie wyprofilowanych na specjalnych prasach krawędziowych (rys. 3). Grubość blach, z jakich wykonane są segmenty rury, mieści się najczęściej w granicach 4-12 mm. Spawane segmenty mogą mieć jednakową lub różną grubość ścianki w zależności od konstrukcji dźwigu. Z danych literaturowych i informacji uzyskanych od producentów elementów konstrukcji dźwigów, rury teleskopów wykonywane są najczęściej ze stali ulepszonej cieplnie o granicy plastyczności od kilkuset do 1100 MPa. Segmenty rury teleskopu łączone są obecnie najczęściej z wykorzystaniem wielościegowej spawania metodą MAG lub metodą MAG (ścieg graniowy) i łukiem krytym. Proces spawania z uwagi na długie, niejednokrotnie kilkunastometrowe, odcinki spoin jest procesem czasochłonnym i wymagającym zużycia dużej ilości materiałów dodatkowych.

Z uwagi na zainteresowanie producentów urządzeń dźwigowych zamianą dotychczas stosowanej metody MAG przez bardziej wydajne metody przeprowadzono w Instytucie Spawalnictwa badania nad opracowaniem technologii zrobotyzowanego spawania metodą hybrydową laser + MAG



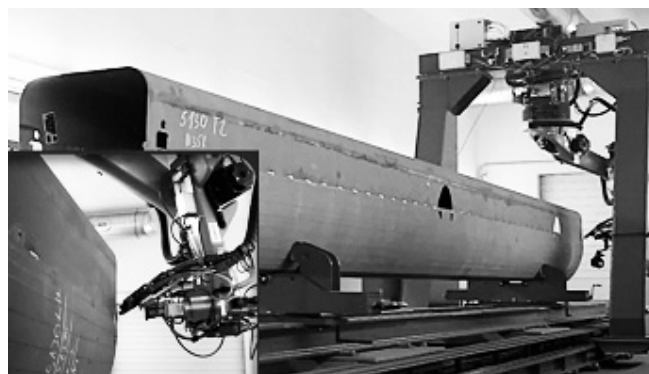
Rys. 2. Spadek wymaganej grubości blachy przy zastosowaniu stali o wysokiej granicy plastyczności w porównaniu do konstrukcji wykonanej ze stali S355 [14]

Fig. 2. The decrease in the sheet thickness required the use of steel with high yield strength in comparison to a design made of steel S355 [14]

połączeń, jakie występują w konstrukcji wyżej opisanych rur teleskopów oraz innych elementów ram i podwozi urządzeń dźwigowych.



Teleskop wysięgnika dźwigu samobieźnego

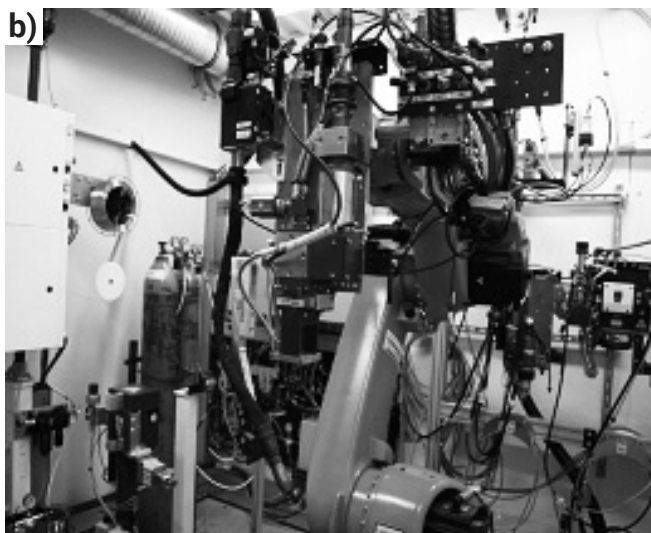


Rys. 3. Konstrukcja teleskopu wysięgnika dźwigu teleskopowego [11,12]

Fig. 3. The telescope design of the telescopic boom crane [11,12]

Przebieg i wyniki badań

Próby spawania hybrydowego laser + MAG przeprowadzono na zrobotyzowanym stanowisku, w skład którego wchodzi laser dyskowy najnowszej generacji TruDisk 12002 oraz robot spawalniczy KUKA KRC30HA wyposażony w głowicę do spawania hybrydowego z podajnikiem spoiwa w postaci drutu (rys. 4). 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 inwerterowe, synergiczne źródło prądu przeznaczone do metody MIG/MAG. Sterowanie parametrami prądowymi źródła



Rys. 4. Uniwersalne stanowisko do spawania metodą HLAW w Instytucie Spawalnictwa: a) widok stanowiska z laserem dyskowym TruDisk 12002 i kabiną ochronną, b) wnętrze kabiny – robot z głowicą do spawania hybrydowego

Fig. 4. The Institute of Welding universal station for HLAW welding: a) view of the laser disk TruDisk 12002 station with the safety cab, b) cab interior – robot head for the hybrid welding

Tablica I. Skład chemiczny płyt próbnych ze stali S960QL

Table I. The chemical composition of S960QL steel test plates

Podstawa [%]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Nb
Karta katalogowa	max 0,20	max 0,50	max 1,60	max 0,020	max 0,010	max 0,70	max 2,0	max 0,7	max 0,06	max 0,04	max 0,3	max 0,04
Analiza kontrolna	0,13	0,39	1,40	0,009	0,001	0,60	0,19	0,44	0,03	0,001	0,01	0,02

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

Skład chemiczny użytych blach ze stali S960QL wg danych katalogowych producenta oraz wg kontrolnej analizy chemicznej przeprowadzonej z użyciem spektrometru iskrowego Q4 TASMAN 170 firmy Bruker, zestawiono w tablicy I. Jest on zgodny z danymi katalogowymi producenta stali i spełnia wymagania normy PN-EN 10025-6+A1:2009 [15].

Jako spoiwo wykorzystano drut spawalniczy Union NiMoCr (ISO 16834-A - G 69 6 M21 Mn4Ni1,5CrMo) o średnicy 1,2 mm, produkcji firmy Böhler Schweißtechnik GmbH.

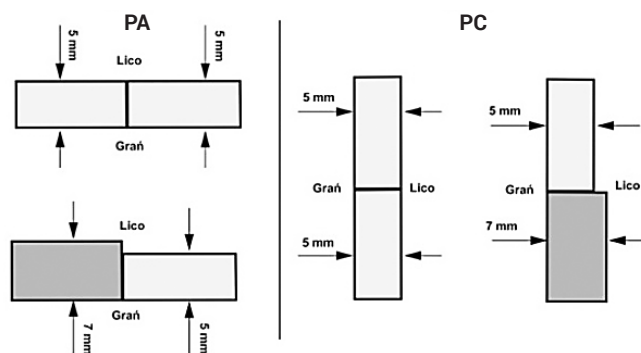
Zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 15614-14:2013 [16] dotyczącej kwalifikowania technologii spawania hybrydowego badania przeprowadzono na złączach próbnych blach o wymiarach 350x150 mm. Wykonano jednostronne złącza doczołowe z brzegami elementów przygotowanymi na I (nr 1.2.2 wg PN-EN ISO 9692-1:2014-02) z odstępem $b = 0$ mm blach o grubości 5 + 5 i 5 + 7 mm (złącza blach o tej grubości występują często w elementach konstrukcji dźwigowych). Próbkę były mocowane w oprzyrządowaniu umożliwiającym prowadzenie procesu spawania w pozycji podolnej PA i nasiennej PC (rys. 5 i 6).

Makrostruktury złączy doczołowych o grubości 5 + 5 i 5 + 7 mm wykonanych w pozycji PA i PC przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

Dla złączy doczołowych blach o grubości 5 + 7 mm, spawanego w pozycji PA, przeprowadzono komplet badań własności mechanicznych (rozciąganie, zginanie, udarność, twardość) zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-14.

Wytrzymałość na rozciąganie złącza nie powinna być mniejsza niż wartość minimalna wytrzymałość materiał podstawowego. Badane złącze spełniło warunek $R_m \geq 980$ MPa, uzyskując średnią wartość $R_m \geq 1053$ MPa, przy czym zerwanie próbek nastąpiło poza spoiną.

W badaniu na zginanie przyjęto, zgodnie z wymaganiami normy dla stali S960QL, średnicę trzpienia gnącego $d = 40$ mm. Kąt gięcia próbek zginanych z rozciąganiem lica i grani spoiny wynosił 180°.

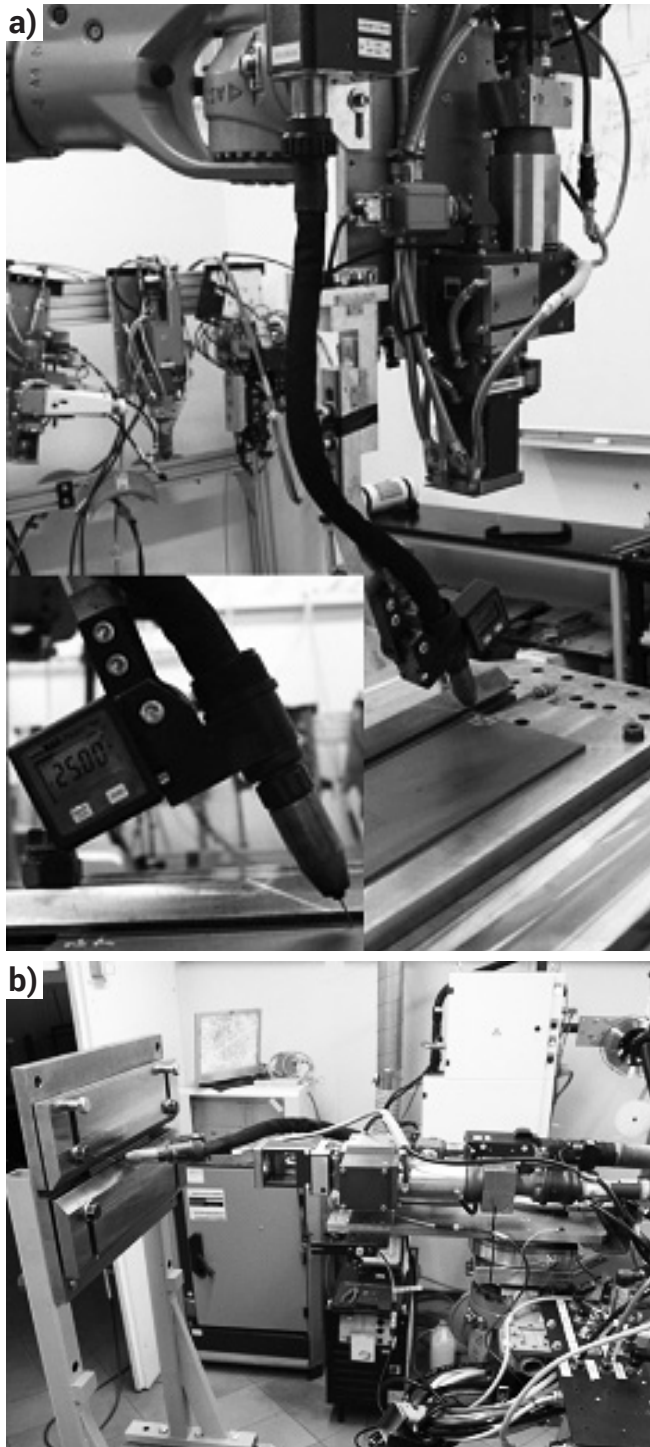


Rys. 5. Usytuowanie i grubość elementów złączy próbnych

Fig. 5. Position and thickness of the components of test pieces

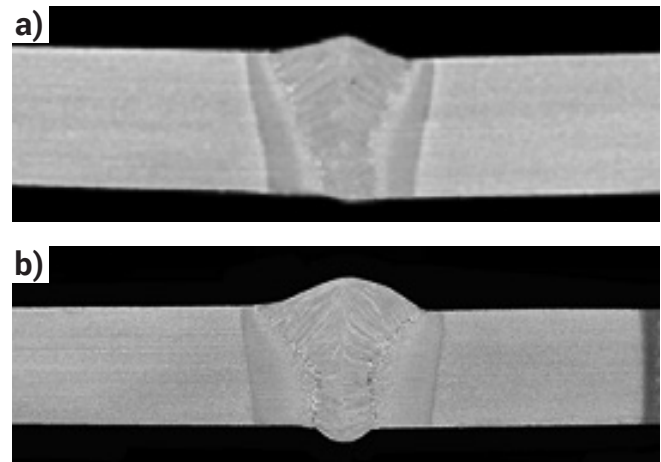
Badanie udarności wykazało, że średnia energia łamania w temperaturze -40 °C dla trzech próbek typu VWT (karb w spoinie) wyniosła 30 J, a dla próbek typu VHT (karb w SWC) 46 J. Średnia energia łamania dla obu stref złącza była większa niż minimalna dopuszczalna wartość 27 J dla stali S960QL wg PN-EN 10025-6, co świadczy o spełnieniu wymagań normy.

Pomiary twardości złącza spawanego przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 9015-1:2011 w dwóch liniach pomiarowych – 2 mm poniżej powierzchni blach od strony lica i 2 mm powyżej powierzchni blachy od strony grani spoiny, zgodnie ze schematem na rysunku 9. Wyniki pomiarów i rozkład twardości przedstawiono na rysunku 10.

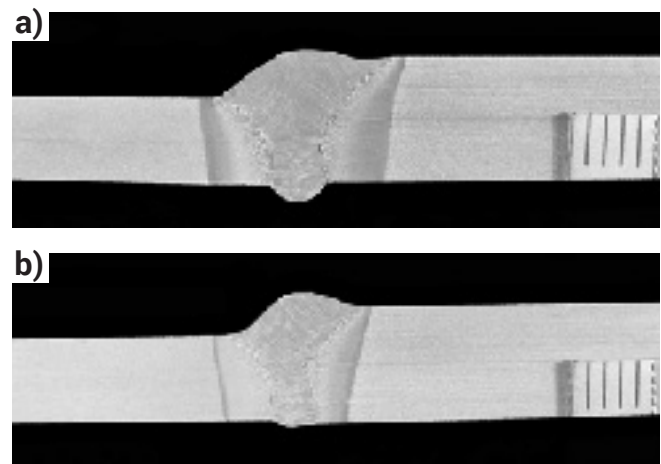


Rys. 6. Spawanie złączy doczołowych na stanowisku zrobotyzowanym: a) ustawienie wiązki i uchwytu MAG przy spawaniu w pozycji PA, b) ustawienie wiązki i uchwytu MAG w pozycji PC
Fig. 6. Butt joints welding on the robotic station: a) beam and MAG welding torch setting during welding in PA position, b) beam and MAG welding torch setting in PC position

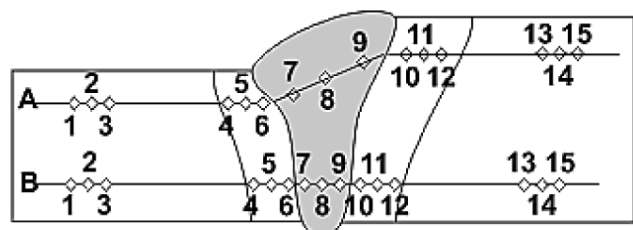
Najwyższe twardości, wynoszące 436 i 434 HV10, odnotowano w SWC przy linii wtopienia, w pkt. 6 linii pomiarowej B i w pkt. 10 linii pomiarowej A. Maksymalna twardość w osi spoiny wyniosła 383 HV10 (pkt 8 linii pomiarowej A). Zgodnie z normą PN-EN ISO 15614-14 maksymalna dopuszczalna twardość w złączy dla 3 grupy materiałowej wg ISO/TR 5608 wynosi 450 HV10, przy czym w przypadku stali z $R_{eH} > 890$ MPa norma ta dopuszcza stosowanie specjalnych wartości uzgadnianych pomiędzy stronami (wykonawca-odbiorca konstrukcji). Badane złącze spełniło wymagania twardości (≤ 450 HV) wg PN-EN ISO 15614-14.



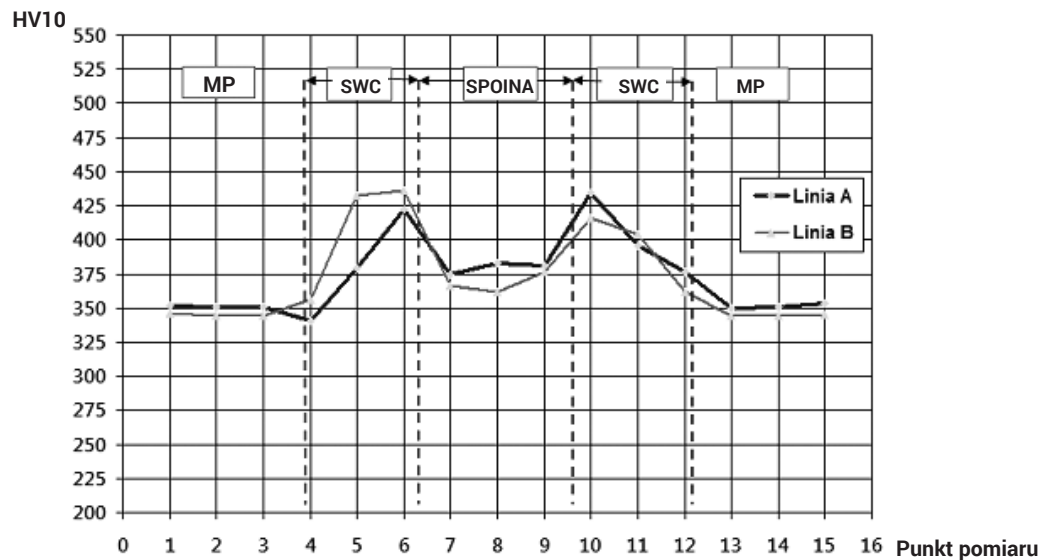
Rys. 7. Makrostruktura spawanego hybridowo złącza doczołowego 5 + 5 mm a) w pozycji PA b) w pozycji PC
Fig. 7. Macrostructure of hybrid welded 5 + 5 mm butt joint a) in PA position b) in PC position



Rys. 8. Makrostruktura spawanego hybridowo złącza doczołowego 5 + 7 mm a) w pozycji PA b) w pozycji PC
Fig. 8. Macrostructure of hybrid welded 5 + 7 mm butt joint a) in PA position b) in PC position



Rys. 9. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych twardości na przekroju poprzecznym złącza doczołowego 5 + 7 mm spawanego hybridowo
Fig. 9. Scheme of hardness measurement points layout on the cross section of the 5 + 7 mm hybrid welded butt joint



	MP			SWC			Spoina			SWC			MP		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	352	351	351	341	379	422	375	383	381	434	396	376	350	351	353
B	346	344	344	356	432	436	366	362	376	416	404	362	344	344	345

Rys. 10. Rozkład twardości na przekroju złącza spawanego metodą HLAW: MP – materiał podstawowy, SWC – strefa wpływu ciepła
Fig. 10. Distribution of hardness on the cross section of the hybrid welded joint by HLAW method: MP – the parent material, SPOINA – weld, SWC – HAZ (heat affected zone)

Podsumowanie

Spawanie hybrydowe laser + MAG jest obecnie perspektywiczną innowacyjną technologią spawania, która może być wykorzystana do wysokowydajnego spawania stali ulepszonej cieplnie S960QL przy wykonawstwie wysokoobciążonych elementów urządzeń dźwigowych. Przeprowadzone badania wykazały, że stosując tę metodę do łączenia blach ze stali S960QL o grubości 5 + 5 i 5 + 7 mm można uzyskać jakościowe złącza doczołowe, z gładkim licem i prawidłowo uformowaną granicą zarówno w pozycji spawania podolnej, jak i naściennej. Przeprowadzone badania złącza doczołowego blach o grubości 5 + 7 mm wykazały, że spełnia ono wymagania normy PN-EN ISO 15614-14 dotyczącej kwalifikowania technologii spawania hybrydowego.

W artykule wykorzystano wybrane wyniki badań otrzymane podczas realizacji w Instytucie Spawalnictwa projektu nr PBS3/B5/31/2015, ścieżka B, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.



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-łukowe.
- [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.trumpf-laser.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/h.s.xsl/79_687_ENG_HTML.htm#.VSOHnvlv8E
- [8] M. Banasik, M. Urbańczyk: Spawanie metodą hybrydową laser + MAG różnych rodzajów złączy, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol. 61 (1), s. 20-25, 2017.
- [9] J. Adamiec, P. Adamiec, M. Więcek: Spawanie hybrydowe paneli ścian szczelnych za pomocą lasera światłowodowego, Przegląd Spawalnictwa, vol. 79 (10), s. 49-52, 2007.
- [10] M. Atabaki, J. Ma, G. Yang, R. Kovacevic: Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations, Materials and Design 64, pp. 573–587, 2014.
- [11] Strona internetowa i materiały informacyjne firmy Vlassenroot: <http://www.vlassenroot.com/EXEN/site/welding.aspx>
- [12] Strona internetowa i materiały informacyjne firmy Manitowoc i Cloos: <https://www.manitowoccranes.com/en>
<https://www.youtube.com/watch?v=ESxRPruVczk>
- [13] M. Zeman, E. Sitko: Przegląd stali o wysokiej i bardzo wysokiej wytrzymałości, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol. 51 (3), s. 30-32, 2007.
- [14] K. Hulka, A. Kern, U. Schriever: Application of Niobium in Quenched and Tempered High-Strength Steels. Materials Science Forum Vols. 500-501, pp. 519-526, 2005.
- [15] PN-EN 10025-6+A1:2009, Wyroby walcowane ze stali konstrukcyjnych. Część 6: Warunki techniczne dostawy wyrobów płaskich o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie.
- [16] PN-EN ISO 15614-14:2013-10, Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Badanie technologii spawania. Część 14: Spawanie hybrydowe laserowo-łukowe stali, niklu i stopów niklu.