

# Spawanie hybrydowe HLAW (wiązka laserowa – MAG) złączy teowych blach o grubości 10 mm ze stali S700MC

Hybrid Laser Arc Welding HLAW (laser – MAG)  
of 10 mm thickness S700MC steel T-joints

## Streszczenie

W artykule przedstawiono badania dotyczące technologii spawania hybrydowego (wiązka laserowa + MAG) złączy teowych stali obrabianej termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności S700MC o grubości 10 mm. Wykonano złącza spawane jednostronne i dwustronne. Przeprowadzone badania nieniszczące pozwoliły sklasyfikować złącza w poziomie jakości B zgodnie z PN-EN ISO 12932 (Spawanie. Spawanie hybrydowe laserowo-łukowe stali, niklu i stopów niklu. Poziomy jakości dla niezgodności). W przypadku spawania jednostronnego z niepełnym przetopem przy zastosowaniu mocy wiązki na poziomie 8,5 kW uzyskano wtopienie na głębokości 8 mm, bez wyraźnego odkształcenia środka złącza. Uzyskane złącza spawane dwustronnie charakteryzują się poprawną geometrią. Spoina posiada strukturę bainityczno-ferrytyczną, a jej twardość wzrasta o około 40 HV1 w stosunku do twardości materiału rodzimego (280 HV1). W obszarze SWC następuje niewielkie zmiękczenie w stosunku do twardości materiału rodzimego.

**Słowa kluczowe:** spawanie hybrydowe HLAW; złącza teowe; stal S700MC

## Abstract

In this article examinations of hybrid welding technology (laser beam + MAG) of T-joints from thermomechanically worked high strength steel S700MC 10 mm thick were presented. Joints welded from one side and both sides were made. Carried examinations enabled to classify joints in quality level B according to PN-EN ISO 12932 (Welding. Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys. Quality levels for imperfections). In case of one sided welding with partial penetration with beam power of 8.5 kW 8 mm of penetration was achieved without noticeable distortion of web. Double sided joints were characterized with correct geometry. Joint metal is bainitic-ferritic in structure and its hardness rises about 40 HV1 in comparison to base metal hardness (280 HV1). In HAZ a slight softening of material in comparison to base metal is present.

**Keywords:** HLAW hybrid welding; T-joints; S700MC steel

## Wstęp

Opracowanie nowych gatunków stali, zwłaszcza niskostopowych o wysokiej wytrzymałości (HSLA – *High Strength Low Alloy*) o strukturze ferrytycznej, ferrytyczno-perlitycznej, ferrytyczno-bainitycznej, bainitycznej lub martenzytu odpuszczonego pozwoliło na znaczną redukcję masy elementów i konstrukcji z nich wytwarzanych. Redukcja grubości blach wytwarzanych w procesach walcowania termomechanicznego (ang. *Thermo Mechanical Controlled Processing – TMCP*) na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego, okrętowego, naftowego, z jednoczesnym zachowaniem wszystkich dotychczasowych parametrów użytkowych pozwala na osiągnięcie znacznych oszczędności, wynikających z mniejszych

nakładów na przetwarzanie materiału i mniejszych kosztów transportu [2÷8].

Technika spawania laserowego hybrydowego (HLAW, ang. *Hybrid Laser Arc Welding*) jest oparta na połączeniu spawania wiązką laserową ze spawaniem łukiem elektrycznym, które oddziałują w tym samym miejscu, w tym samym czasie i w tym samym jezioru spawalniczym. Idea spawania hybrydowego została po raz pierwszy zaprezentowana w latach 70 jako „powiększone łukowo spawanie laserowe”, łączące proces spawania laserowego ze spawaniem TIG (GTA) [9]. Jako źródła laserowe stosowano głównie lasery CO<sub>2</sub>, które w tamtym czasie jako jedyne lasery przemysłowe

**Dr hab. inż. Jacek Górka** – Politechnika Śląska w Gliwicach; **dr inż. Sebastian Stano** – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: jacek.gorka@polsl.pl

umożliwiły dostarczenie ciągłej wiązki laserowej o mocy kilku kW. Obecnie, najpopularniejszym rozwiązaniem jest połączenie procesu spawania laserowego nowoczesnymi laserami na ciele stałym o dużej mocy (lasery dyskowe, włóknowe lub półprzewodnikowe) z procesem spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazu aktywnego bądź obojętnego (GMA). Zastosowanie metody MIG/MAG umożliwia nie tylko wykorzystanie dodatkowej energii pochodzącej od łuku elektrycznego, ale także podawanie w trakcie spawania materiału dodatkowego, co ma korzystny wpływ na formowanie się spoiny (nadlew lica, wypełnienie szczeliny pomiędzy spawanymi materiałami) i możliwość modyfikacji składu chemicznego spoiny.

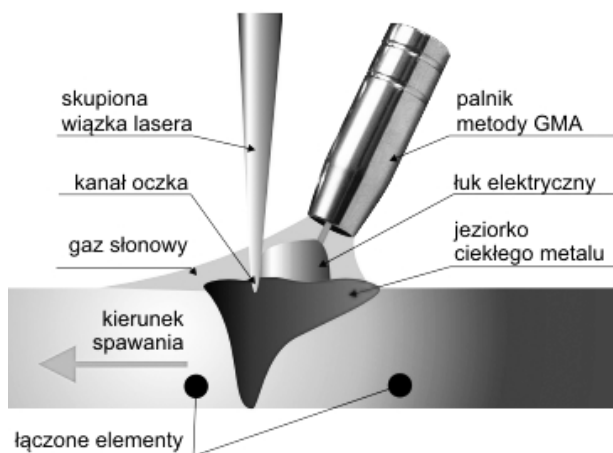
Podstawową ideą procesu HLAW jest wykorzystanie zalet i minimalizacja wad charakterystycznych dla składowych, poszczególnych procesów spawania. Znaczące rozpowszechnianie technologii spawania laserowego w przemyśle na przestrzeni ostatnich lat, związane z rosnącą niezawodnością urządzeń i ekonomiczną opłacalnością tego procesu przyczyniło się jednocześnie do uwypuklenia niedogodności związanych z jego stosowaniem (takich jak wysoki koszt oprzyrządowania, wymóg wysokiej dokładności przygotowania brzegów łączonych materiałów, problemy

metalurgiczne). Badania wykazały, iż powyższe niedogodności mogą zostać zminimalizowane, lub wyeliminowane poprzez połączenie procesu spawania laserowego oraz konwencjonalnego spawania łukowego w jeden wspólny proces spawania hybrydowego HLAW (rys. 1).

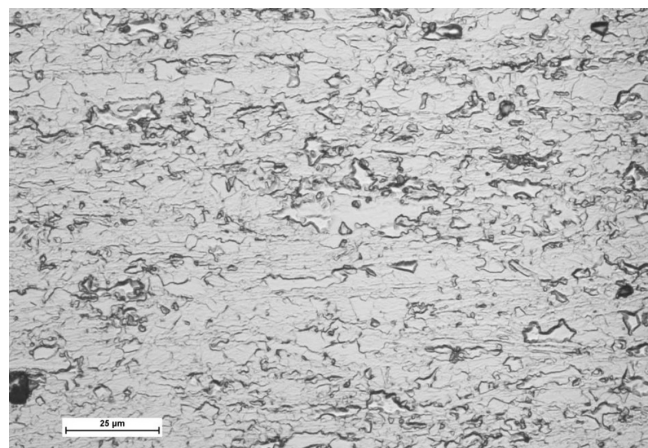
Połączenie takie przełożyło się ponadto na zwiększenie wydajności procesu spawania oraz minimalizację utrudnień związanych z odbijaniem wiązki laserowej przez materiał spawany laserowo. Oszczędności wynikające z zastosowania procesu spawania HLAW stanowią argument do dalszego aktywnego rozwoju tej technologii w zastosowaniach naukowych oraz przemysłowych [10÷12].

## Badania własne

Celem badań było określenie możliwości wykonania złączy teowych ze stali S700MC o grubości 10 mm techniką spawania hybrydowego HLAW (wiązka laserowa – MAG), przy użyciu materiału dodatkowego w postaci drutu litego (PN-EN ISO 16834-A: GMn4Ni1,5CrMo) o średnicy 1,2 mm. Skład chemiczny i własności stali oraz spoina przedstawiają tablice I i II, a strukturę stali rysunek 2.



Rys. 1. Schemat procesu spawania hybrydowego [9]  
Fig. 1. Scheme of Hybrid Laser Arc Welding [9]



Rys. 2. Bainityczno-ferytyczna struktura stali S700MC  
Fig. 2. Structure of bainitic-ferritic steel S700MC

Tablica I. Skład chemiczny wg PN EN 10149-2 i własności mechaniczne stali walcowanej termomechanicznie do kształtowania na zimno S700MC  
Table I. The chemical composition according to the regulation PN EN 10149-2 and mechanical properties of the S700 MC steel subjected to thermomechanical treatment used for cold moulding

Stężenie pierwiastków, %											
C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Al <sub>całk.</sub> min.	Nb max*.	V max.	Ti max.	B max.	Mo max.	Ce** max.
0,12	0,60	2,10	0,008	0,015	0,015	0,09	0,20	0,22	0,005	0,50	0,61
Własności mechaniczne											
Wytrzymałość na rozciąganie R <sub>m</sub> , MPa			Granica plastyczności R <sub>e</sub> , MPa			Wydłużenie A <sub>5</sub> , %			Udarność, J/cm <sup>2</sup> (-20 °C)		
822			768			19			135		
* – Suma zawartości Nb, V i Ti powinna wynosić max. 0,22%;											
** Ce – równoważnik węgla.											

Tablica II. Skład chemiczny i własności mechaniczne stopiwa drutu litego GMn4Ni1,5CrMo  
Table II. Chemical composition and mechanical properties of weld metal solid wire GMn4Ni1,5CrMo

Stężenie pierwiastków, %						
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ti
0,1	1,8	0,7	0,3	2,0	0,55	0,07
Własności mechaniczne						
Wytrzymałość na rozciąganie R <sub>m</sub> , MPa		Granica plastyczności R <sub>e</sub> , MPa		Wydłużenie A <sub>5</sub> , %		Udarność, J/cm <sup>2</sup> (-40 °C)
900		810		18		55

## Proces spawania

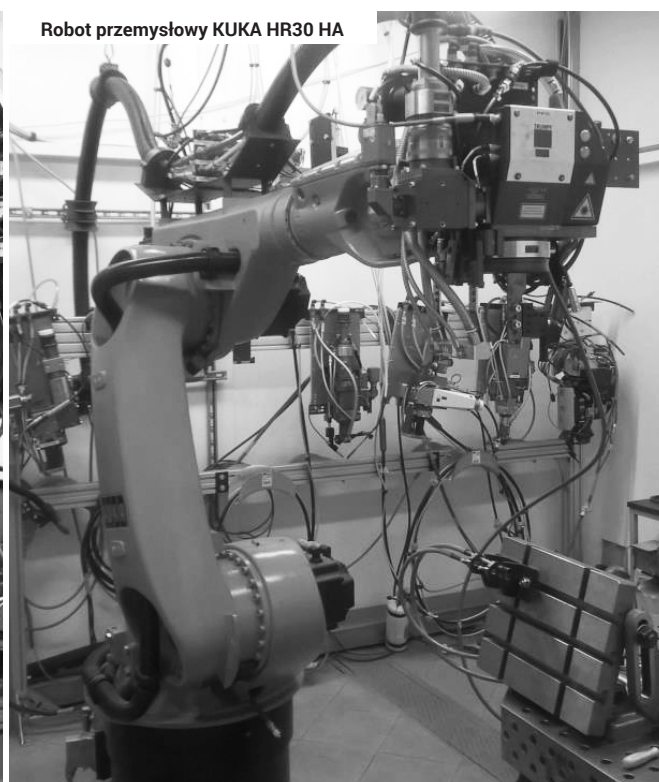
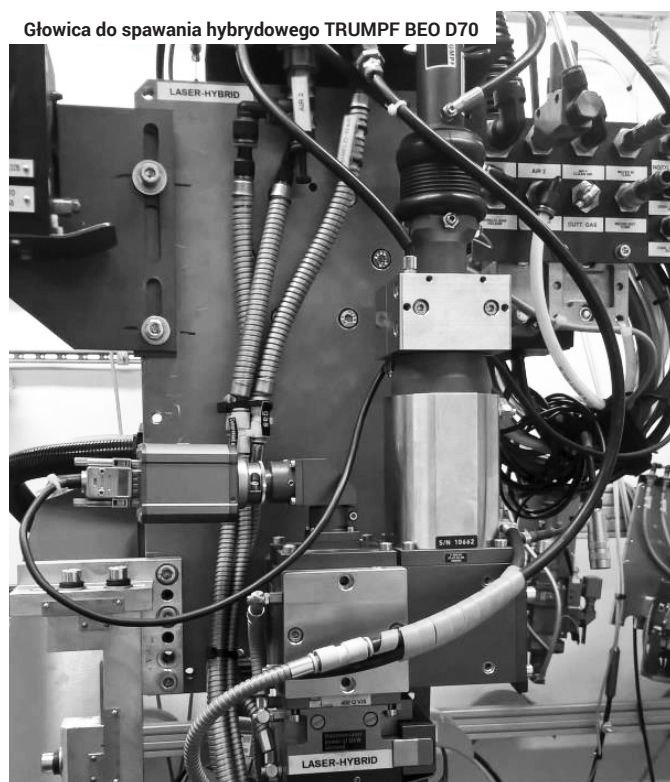
Próby spawania przeprowadzono w Instytucie Spawalnictwa na zrobotyzowanym stanowisku do spawania hybrydowego TRUMPF TruLaser Robot 5120, rysunek 3. W skład tego stanowiska wchodził laser dyskowy TRUMPF TruDisk 12002 emitujący wiązkę laserową o długości fali 1030 nm i jakości wiązki określanej parametrem  $BPP \leq 8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  oraz synergiczne źródło prądu EWM Phoenix 452 RC PULS. Do procesu spawania złączy teowych wykorzystano głowicę D70 firmy TRUMPF, połączoną z laserem dyskowym za pomocą światłowodu o średnicy 0,3 mm, która była zamocowana na ramieniu robota przemysłowego KUKA KR30 HA. Zastosowana głowica spawalnicza charakteryzowała się następującymi parametrami optycznymi:

- długość ogniskowej soczewki kolimatora:  $f_{kol} = 200 \text{ mm}$ ,
- długość ogniskowej soczewki ogniskującej:  $f_{og} = 400 \text{ mm}$ .  
Długość wolnego wylotu elektrody wynosiła  $l = 18 \text{ mm}$ .

Elektroda została pochylona do powierzchni spawanej pod kątem  $\alpha = 65^\circ$ , natomiast odległość między jej końcem a wiązką laserową równa była  $a = 2 \text{ mm}$ . Jako gazu osłonowego użyto mieszanki M21 (18%  $\text{CO}_2 + 82\% \text{ Ar}$ ), natężenie przepływu gazu ustalono na poziomie  $18 \text{ dcm}^3/\text{min}$ .

Wykonano serię prób spawania złączy teowych, zmieniając podstawowe parametry procesu spawania (tabl. III), uzyskując złącza spawane jednostronnie z pełnym i niepełnym przetopem oraz złącza spawane dwustronnie. Uchwyt metody MAG ustawiony został tak jak do wykonania spoiny pachwinowej w pozycji PB. Wiązka laserowa została ustawiona pod kątem  $10^\circ$  względem pionowo ustawionego środka złącza teowego, rysunek 4. We wszystkich przypadkach z wyjątkiem ostatniej próby zastosowano kierunek spawania, w którym prowadzącym źródłem ciepła była wiązka laserowa – kierunek spawania LA (*Laser Leading*).

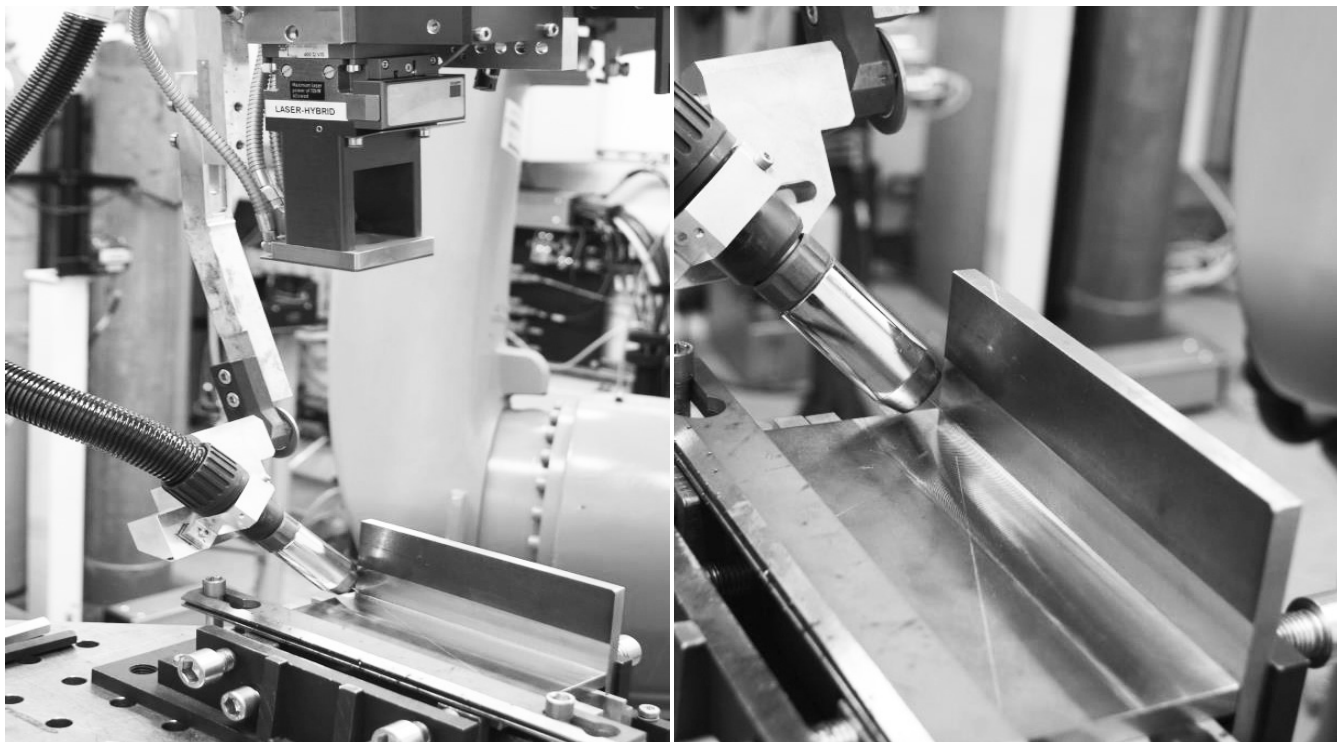
Widok przykładowych złączy spawanych jedno i dwustronnie przedstawiają rysunki 5 i 6.



Rys. 3. Stanowisko do spawania hybrydowego HLAW (wiązka laserowa – MAG) złączy teowych  
Fig. 3. The position of the hybrid welding HLAW (laser beam – MAG) T-joints

Tablica III. Parametry spawania hybrydowego HLAW (wiązka laserowa – MAG) złączy teowych  
Table III. Parameters HLAW hybrid welding (laser beam – MAG) T-joints

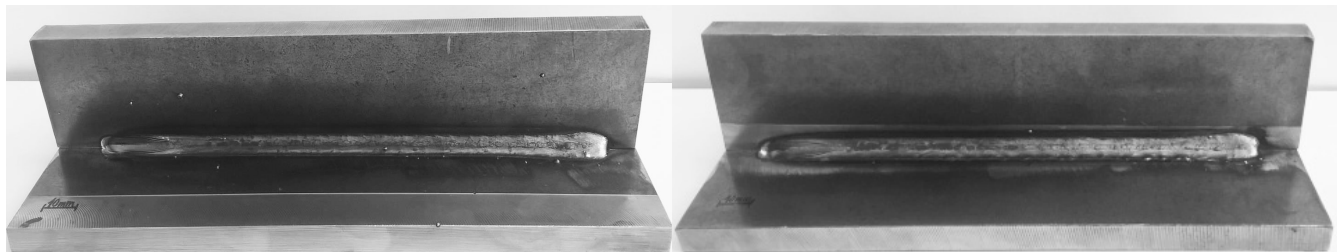
Nr złącza	Moc wiązki P [kW]	Natężenie prądu spawania I [A]	Konfiguracja	Ocena złącza
1	8,5	280	LA	Wysoka jakość, nieznaczne przesunięcie kątowe blach
2	7	295	LA, dwustronnie	Wysoka jakość
3	7	295	LA, dwustronnie	Wysoka jakość
4	7	290	LA	Wysoka jakość
5	8,5	290	LA	Niska jakość, przetop na wskroś z wyciekami ciekłego metalu na całej długości złącza
6	7,6	290	LA	Niska jakość, przetop na wskroś z wyciekami ciekłego metalu w początkowej i końcowej części złącza, duża ilość rozprysków
7	7,6	290	AL	Niska jakość, przetop na wskroś z wyciekami ciekłego metalu w środkowej i końcowej części złącza, duża ilość rozprysków



**Rys. 4.** Widok złącza teowego przygotowanego do procesu spawania HLAW (wiązka laserowa – MAG)  
**Fig. 4.** View T-joint prepared for the welding process HLAW (laser beam - MAG)



**Rys. 5.** Złącze teowe spawane jednostronnie techniką LA  
**Fig. 5.** T-joint one-sided welding technique LA

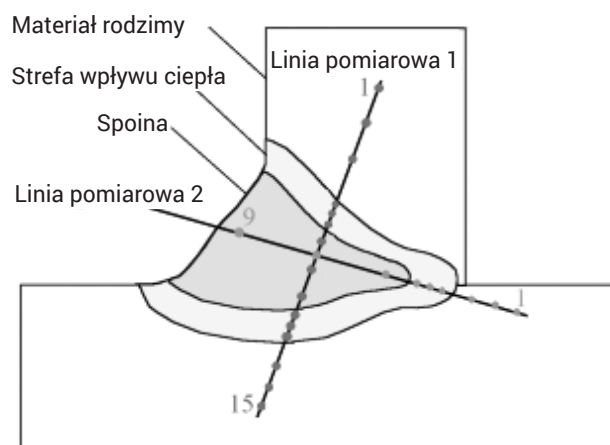


**Rys. 6.** Złącze teowe spawane dwustronnie techniką LA  
**Fig. 6.** T-joint welded double-sided welding technique LA

### Badania złączy spawanych

Uzyskane złącza próbne poddano badaniom wizualnym na podstawie wymagań PN-EN ISO 17637:2011, a następnie badaniom niszczącym w zakresie:

- badaniom metalograficznym makroskopowym na mikroskopie świetlnym stereoskopowym Olympus SZX9, próbki do badań trawiono odczynnikiem Adlera;
- badaniom metalograficznym mikroskopowy na mikroskopie świetlnym NIKON ECLIPSE MA100, próbki do badań trawiono Nitaliem;
- pomiarowi twardości sposobem Vickersa na urządzeniu WILSON WOLPERT 430 zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 9015-1, rysunek 7.



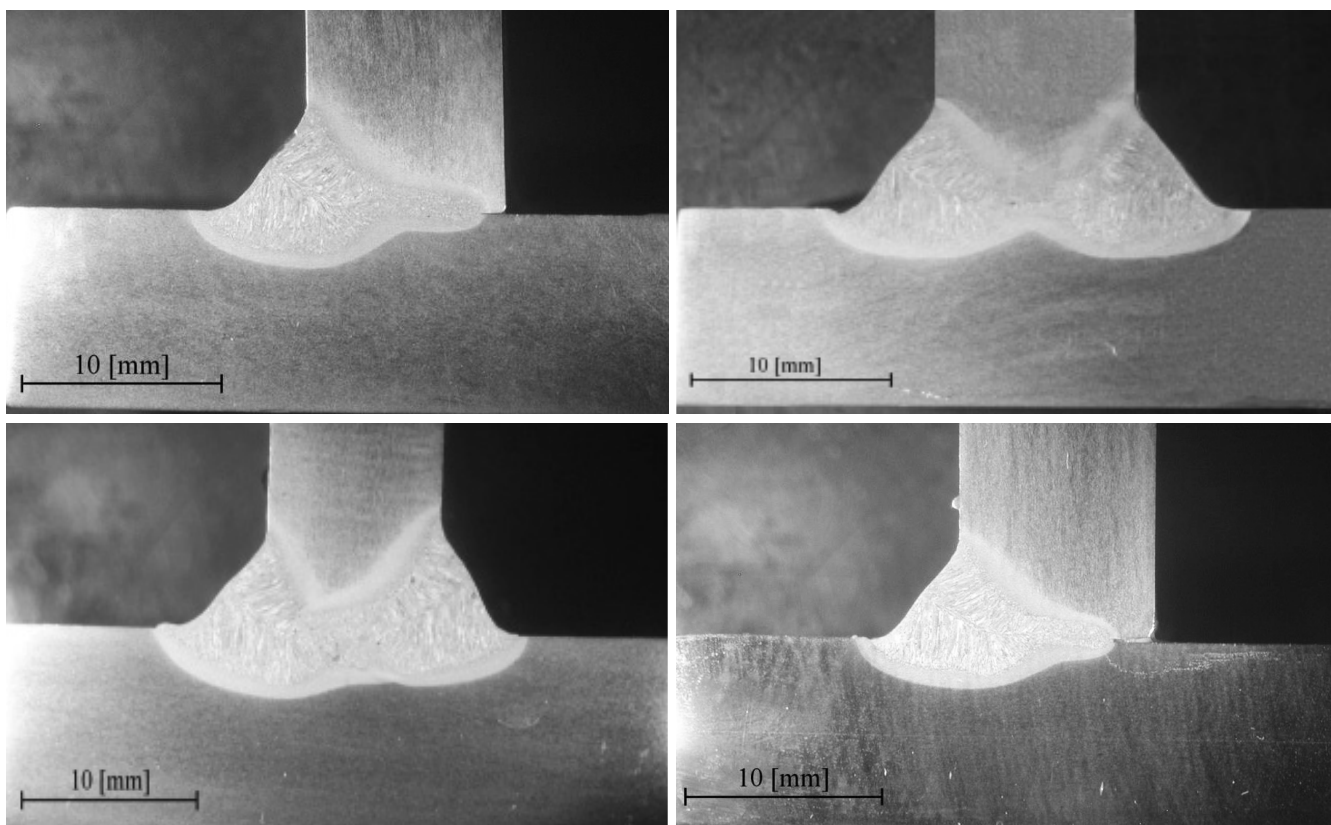
**Rys. 7.** Schemat linii pomiarowych badań twardości złączy spawanych  
**Fig. 7.** Schematic of measuring lines hardness testing of welded joints

## Analiza wyników badań

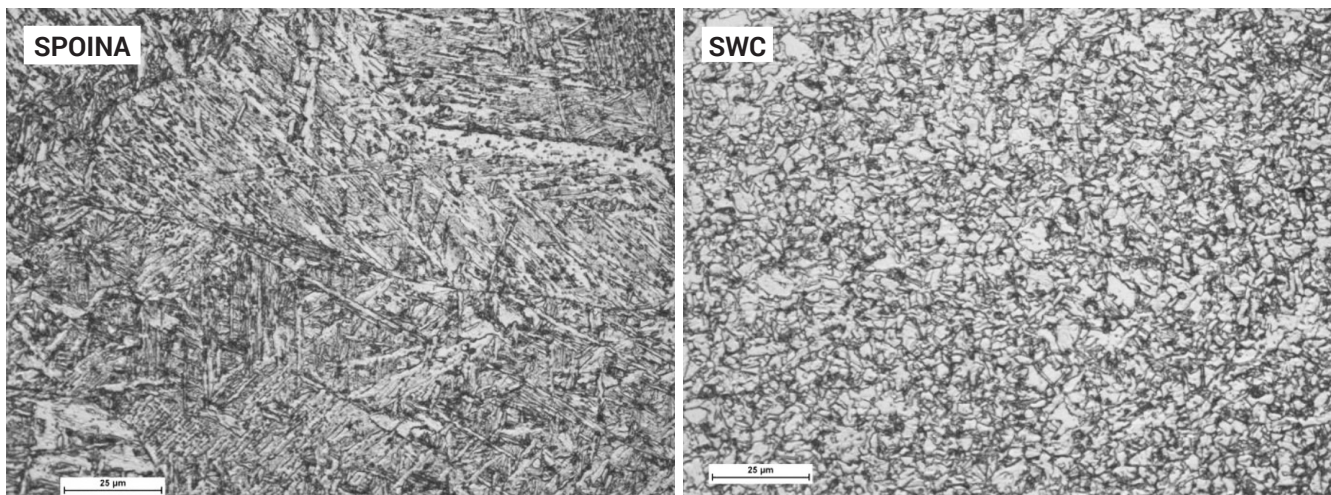
Przeprowadzone badania wizualne pozwoliły na wyeliminowanie złączy, które charakteryzowały się brakiem przetopu bądź wyciekami od strony grani i nie spełniały wymagań jakościowych (złącza nr 5÷7, tabl. III). Przeprowadzone badania makroskopowe wykazały, że złącza nr 1÷4 nie posiadają niezgodności spawalniczych i charakteryzują się poprawną geometrią, rysunek 8.

Badania mikroskopowe złączy wykazały zmiany mikrostruktury w obszarze spoiny i strefy wpływu ciepła względem mikrostruktury materiału rodzimego. W obszarze spoiny,

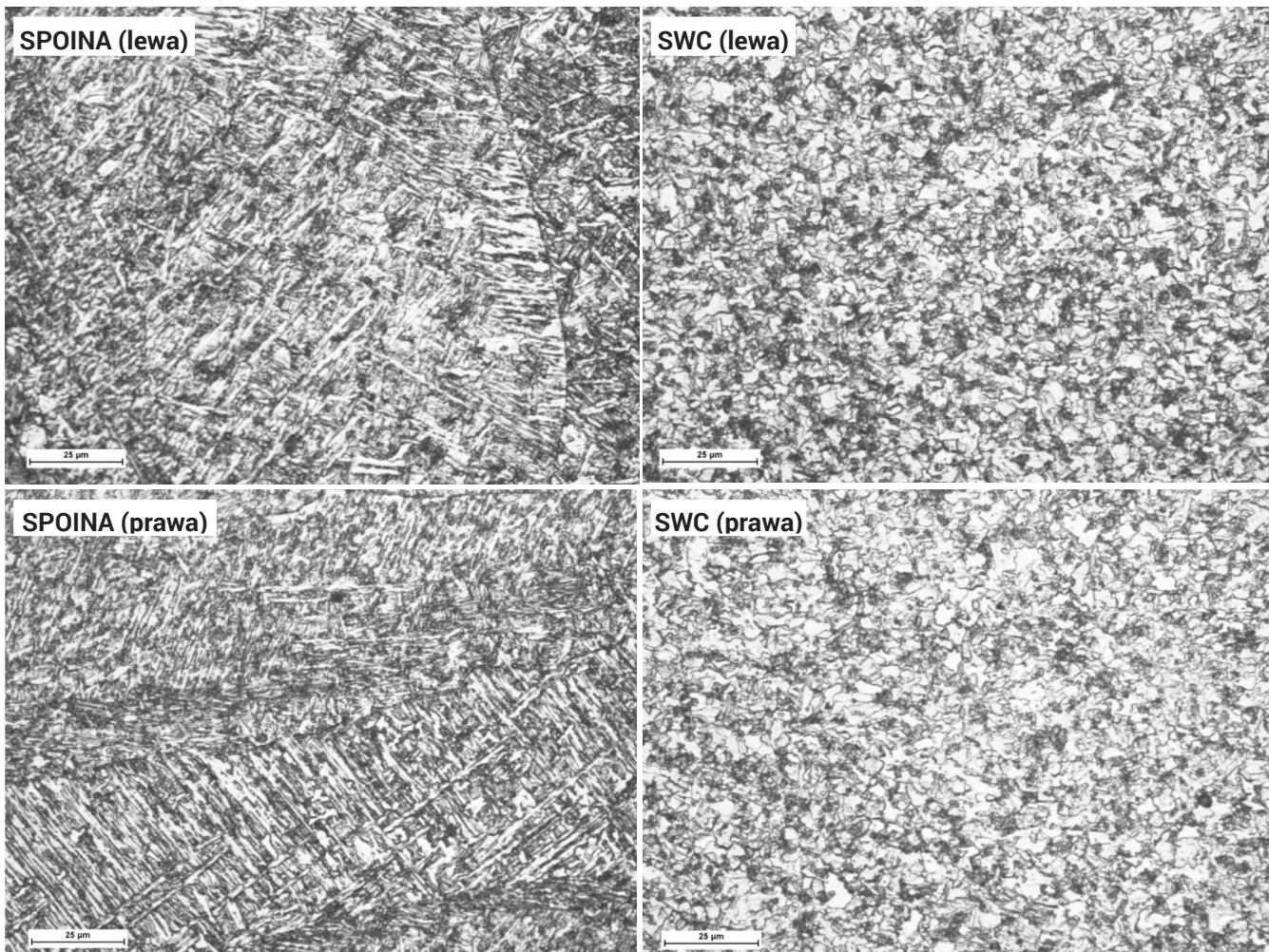
jak i strefy wpływu ciepła każdego z badanych złączy zniwelowany został uzyskany w procesie produkcji blach efekt odkształcenia plastycznego w postaci wydłużonych w kierunku walcowania ziarn. W obszarze spoin występuje struktura dendrytyczna, składająca się z płytek bainitu i ferrytu wytworzonych z ziarn austenitu pierwotnego. Strefa wpływu ciepła każdego z badanych złączy charakteryzuje się drobnoziarnistą mikrostrukturą z widoczną przewagą ferrytu, rysunki 9 i 10. Zarówno w obszarze spoin, jak i strefy wpływu ciepła każdego z badanych złączy widoczne są wydzielenia twardej azotków, rysunek 11.



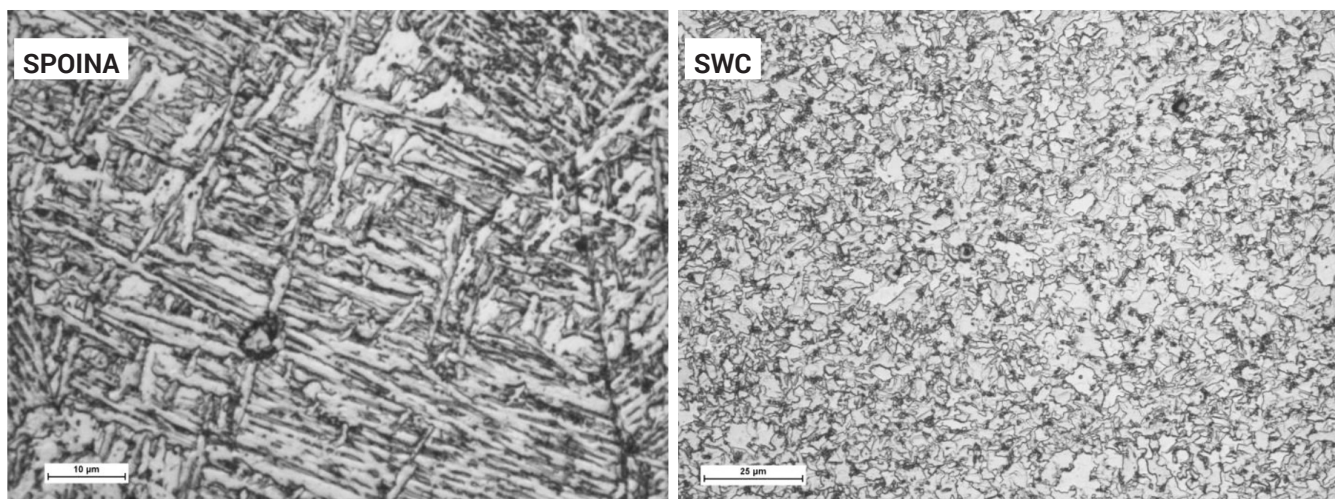
Rys. 8. Makrostruktura złączy teowych w kolejności: 1÷4, (tabl. III)  
Fig. 8. Macrostructure T-joint welded in order: 1÷4, (tabl. III)



Rys. 9. Mikrostruktura teowego złącza spawanego jednostronnie  
Fig. 9. Microstructure T-joint welded one sided



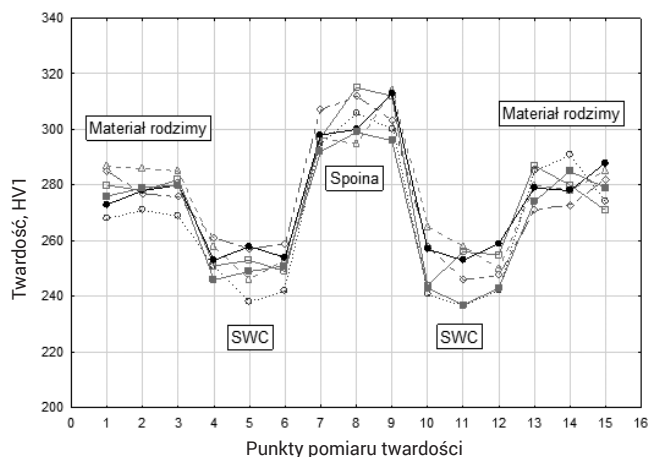
Rys. 10. Mikrostruktura teowego złącza spawanego dwustronnie  
 Fig. 10. Microstructure T-joint welded double-sided



Rys. 11. Wydzielenia azotków w mikrostrukturze złącza spawanego hybrydowo (laser – MAG)  
 Fig. 11. The separation of nitrides in a welded joint hybrid (laser – MAG)

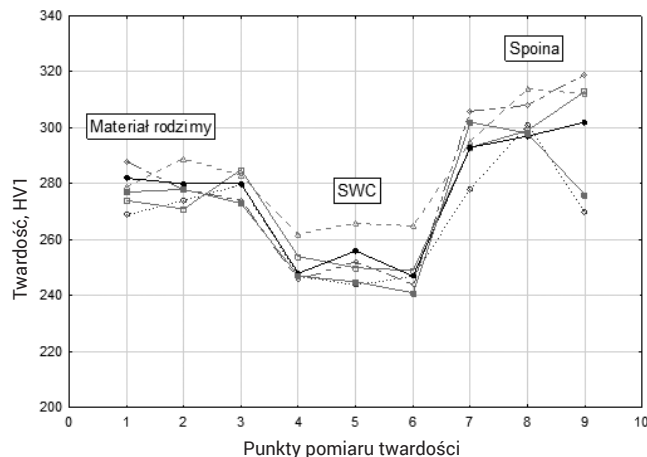
Badania twardości wykazały, iż cykl cieplny spawania hybrydowego HLAW przekłada się na zwiększenie twardości w obszarze spoiny oraz obniżenie twardości w obszarze strefy wpływu ciepła względem materiału rodzimego. Twardość materiału rodzimego wynosi ok. 280 HV1, twardość w obszarze spoin – w granicach 295÷315 HV1, natomiast twardość w obszarze strefy wpływu ciepła

– w granicach 235÷260 HV1. Zwiększona twardość w obszarze spoin jest wynikiem wpływu dodatków stopowych spoiwa zwiększających hartowność. Z kolei obniżenie twardości strefy wpływu ciepła jest wynikiem utraty własności nabytych w czasie procesu walcowania termomechanicznego, rysunki 12 i 13, w wyniku oddziaływania cyklu cieplnego spawania.



**Rys. 12.** Rozkład twardości HV1 w badanych złączach (linia pomiarowa 1, rys. 7)

**Fig. 12.** HV1 hardness distribution in the examined joints (measurement line 1, Fig. 7)



**Rys. 13.** Rozkład twardości HV1 w badanych złączach (linia pomiarowa 2, rys. 7)

**Fig. 13.** HV1 hardness distribution in the examined joints (measurement line 2, Fig. 7)

## Podsumowanie

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Uzyskanie spoiny czołowej z pełnym przetopem w złączu teowym blach o grubości 10 mm w jednym przejściu spawowym metodą HLAW jest utrudnione w wyniku powstającej podczas spawania dużej objętości ciekłego jeziora i tendencji do pojawiania się wycieków od strony grani spoiny.
- Spawanie hybrydowe jednostronne z niepełnym przetopem złączy teowych ze stali S700MC o grubości 10 mm umożliwia uzyskanie wysokiej jakości spoin o głębokości wtopienia 8 mm. Parametrami decydującymi o głębokości wtopienia spoin w złączach teowych spawanych hybrydowo jest moc wiązki laserowej oraz jej kąt pochylenia względem płaszczyzny poziomej blachy.
- Złącza teowe spawane dwustronnie technologią HLAW wykazują najlepszą jakość spośród badanych złączy. Spawanie dwustronne umożliwia uzyskanie pełnego przetopu przy zastosowaniu niższej mocy wiązki laserowej, co ułatwia stabilizację procesu. Ponadto, niweluje ono nieznaczne odkształcenia kątowe, mogące wystąpić w przypadku spawania jednostronnego.
- Materiał rodzimy wykazuje strukturę bainityczno-ferrytyczną o nieregularnej wielkości ziarn, wydłużonych w kierunku walcowania termomechanicznego. W obszarze spoiny występuje struktura dendrytyczna, składająca się z płytek ferrytu i bainitu. W strefie wpływu ciepła dochodzi do ujednorodnienia struktury pod względem wielkości ziarna.
- W obszarze spoiny następuje wzrost twardości do 320 HV1 w stosunku do twardości materiału rodzimego (280 HV1). W obszarze SWC w wyniku oddziaływania cyklu cieplnego dochodzi do utraty własności nabytych podczas procesu walcowania termomechanicznego w wyniku czego twardość spada do poziomu 250 HV1.

## Literatura

- [1] Grajcar A., Róžański M.: Spawalność wysokowytrzymałych stali wielofazowych AHSS, Przegląd Spawalnictwa nr 3/2014, s. 22–27
- [2] Stano S.: Spawanie laserowe blach o zróżnicowanej grubości przeznaczonych na półfabrykaty karoserii samochodowych typu tailored blanks, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 2/2005, s. 24–28
- [3] Górka J.: Weldability of thermomechanically treated steels having a high yield point, Archives of Metallurgy and Materials, Volume 60, Issue 1/2015, pp. 469–475
- [4] Lisiecki A.: Diode laser welding of high yield steel. Proc. of SPIE Vol. 8703, Laser Technology 2012: Applications of Lasers, 87030S (January 22, 2013), DOI: 10.1117/12.2013429
- [5] Górka J.: Study of structural changes in S700MC steel thermomechanically treated under the influence of simulated welding thermal cycles, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, Vol. 22, October 2015, pp. 497–502
- [6] Grajcar A., Róžański M., Stano S.: Effect of heat input on microstructure and hardness distribution of laser welded Si-Al TRIP-type steel, Advances Material Science Engineering. 2014, Article ID 658947, pp. 1–8
- [7] Brózda J.: Nowoczesne stale konstrukcyjne i ich spawalność. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2009
- [8] Górka J.: Własności i struktura złączy spawanych stali obrabianej termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013
- [9] Y. Naito, S. Katayama, and A. Matsunawa.: Keyhole behaviour and liquid flow in molten pool during laser-arc hybrid welding, LAMP 2002 Proceedings, Volume 4831, pp. 357.
- [10] C. Bagger and F. Olsen.: Comparison of plasma, metal inactive gas (MIG) and tungsten inactive gas (TIG) processes for laser hybrid welding, Proceedings of ICALEO 2003, Jacksonville, FL, Oct. 13–17, 2003, pp. 11–20.
- [11] N.J. Orozco.: Fully integrated hybrid-laser welding control process, Processes for Laser Hybrid Welding, Proceedings of ICALEO 2003, Jacksonville, FL, Oct. 13–17, 2003, pp. 31–40.
- [12] Murakami T., Shin M. H., Nakata K.: Effect of welding direction on weld bead formation in high power fiber laser and MAG arc hybrid welding, Transactions of JWRI 2/2010.