

# Badania metalograficzne spoin wykonanych hybrydową metodą PTA-MAG

## Metallographic examination of welded joints produced by PTA-MAG hybrid process

### Streszczenie

W artykule scharakteryzowano innowacyjną metodę spawania hybrydowego będącą ekonomiczną alternatywą dla spawania hybrydowego Laser-MAG. W głównej części artykułu zaprezentowano wstępne wyniki badań metalograficznych spoin czołowych wykonywanych metodą wysokowydajnego spawania hybrydowego Plazma-MAG. Spawano stal niestopową S235JR. Omówiono budowę wykonanych nowatorską techniką złączy spawanych oraz przeprowadzono badania metalograficzne złączy, analizując budowę mikrostruktury oraz rozkłady twardości w charakterystycznych obszarach spoiny. Przedstawiono korzyści techniczne i ekonomiczne wynikające z zastosowania opisanego rozwiązania.

**Słowa kluczowe:** spawanie hybrydowe, spoiny czołowe, metalografia

### Abstract

This paper describes an innovative method for hybrid welding being economical alternative to Laser-MAG hybrid welding. In the main part of the article the preliminary results of metallographic testing of the welds (low alloy steel) have been presented. Metallographic studies of the joints were carried out, discussed the microstructure and hardness distributions in characteristic areas of the weld.

**Keywords:** hybrid welding, butt welds, metallography

## Wstęp

Zgodnie z definicją Międzynarodowego Instytutu Spawalniczego spawanie hybrydowe polega na połączeniu i jednoczesnym stosowaniu dwóch różnych pod względem źródła ciepła metod spawania. Połączenie spawania plazmowego i GMA (*Gas Metal Arc*) z pozoru nie spełnia tego warunku. Należy zwrócić uwagę, iż pomimo tego, że oba połączone źródła ciepła bazują na łuku elektrycznym, to jednak znacznie się od siebie różnią. Sposób nagrzewania materiału rodzimego

w metodach GMA ma charakter przewodnościowy, a łuk plazmowy o gęstości prądu umożliwiającej powstanie kanału parowego (ang. *keyhole*) przekazuje ciepło do materiału spawanego w głównej mierze poprzez bombardowanie elektronami anody, a poziom energii kinetycznej elektronów, zamienianej w energię cieplną na skutek zderzenia, zależy od wartości napięcia przyspieszającego. Dwa z pozoru podobne źródła energii spawania w różny sposób przekazują ciepło do materiału obrabianego.

**Dr hab. inż. Tomasz Chmielewski, prof. PW** – Politechnika Warszawska, **mgr inż. Jacek Szulc** – SupraElco Warszawa, **mgr inż. Zbigniew Pilat** – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Warszawa.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: t.chmielewski@wip.pw.edu.pl

## Spawanie hybrydowe

Ekonomiczne uwarunkowania rynkowe branży spawalniczej stymulują poszukiwanie nowych wysokowydajnych oraz charakteryzujących się wysoką jakością metod spawania przy jednocześnie spełnionym warunku umiarkowanych kosztów procesu. Konwencjonalne metody spawalnicze przy swej dużej różnorodności niestety nie są doskonałe, a ich indywidualne charakterystyczne cechy predysponują do określonych zastosowań. Zwykle gdy metoda spawania wyróżnia się jakąś specyficzną zaletą, to okupione to jest równie ważnym mankamentem. Przykładem może być wysoka jakość spoin wykonanych metodą TIG przy niskiej wydajności spawania (stapiania), bądź wysoka wydajność metod opartych na wiązkach energetycznych, kojarząca się niestety z ekstremalnie wysokimi kosztami przygotowania brzegów do spawania.

W spawalniczych systemach hybrydowych z reguły łączy się w parę metody o skrajnie różnych właściwościach, które nie występują jednocześnie w ramach jednej metody spawania. Takie podejście umożliwia uzyskanie wysokiej wydajności procesu spajania dzięki jednoczesnemu wykorzystaniu i wzmocnieniu zalet obu łączonych metod oraz minimalizowanie ograniczeń charakterystycznych dla zastosowanych metod wtedy gdy występują osobno.

Obecnie w hybrydowych systemach spawalniczych najczęstsze zastosowanie znajduje Laser współpracujący z łukowymi metodami spawania w osłonie gazów, najczęściej MAG, MIG, TIG. Korzyści ze stosowania hybrydy Laser-GMA polegają na połączeniu charakterystycznych dla lasera: wysokiej wydajności stapiania, dużej głębokości wtopienia oraz niskiego udziału spoiwa w stopiwie, ze stosunkowo wysoką tolerancją na jakość przygotowanych do spawania brzegów charakterystyczną dla metod łukowych. Poza licznymi zaletami opisanej hybrydy trudno pominąć bardzo wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne systemów laserowych, które w pewnym stopniu niwelują ekonomiczne korzyści spawania hybrydowego [1, 2, 5÷7, 10].

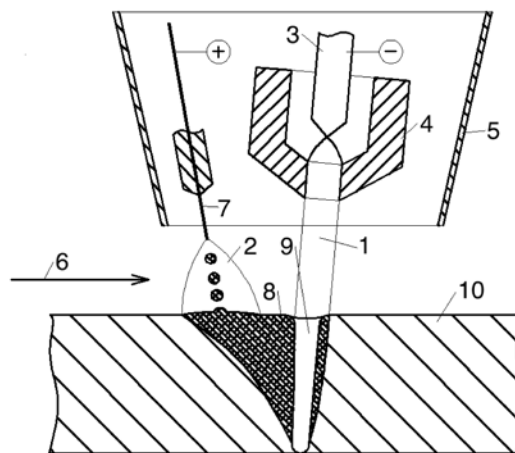
Generalnie, metody spawania hybrydowego umożliwiają wykonanie połączenia z łagodnym cyklem cieplnym i zmniejszają wymagania wobec przygotowania szczeliny rowka spawalniczego w stosunku do metod wiązkowych. Metody spawania hybrydowego charakteryzuje wysoka prędkość spawania w porównaniu do procesów wchodzących w skład hybrydy, gdy pracują oddzielnie.

## Hybrydowy system spawania łukowego PTA-GMA

Niskotemperaturowa plazma znajduje częste zastosowanie w napawaniu modyfikacyjnym i regeneracyjnym powierzchni części maszyn [3÷4, 9] oraz jest

stosowana w technice z otwartym kanałem parowym do spawania grubych elementów konstrukcyjnych. Spawanie plazmowe kojarzy się z wysoką wydajnością spawania, jednak wymaga precyzyjnego i kosztownego przygotowania brzegów, a wymaganie to w warunkach przemysłowych jest często niewykonalne, zwłaszcza podczas spawania konstrukcji wielkogabarytowych. Sposobem na rozwiązanie problemów ze stosowaniem w przemyśle spawania plazmowego w kontekście tolerancji geometrycznej brzegów przygotowanych do spawania może być spawanie hybrydowe Plazma-GMA. Połączenie zalet obu metod prowadzi do uzyskania wysokiej wydajności spawania przy obniżeniu (w stosunku do metod wiązkowych) wymagań związanych z precyzyjnym przygotowaniem brzegów.

Zastosowany w pracy hybrydowy system spawania Plazma-GMA oparty jest na specjalnej konstrukcji plazmotronie zintegrowanym z uchwytem elektrodowym GMA, będącym przedmiotem patentu firmy Plasma Laser Technologies z Izraela. Innowacyjność rozwiązania konstrukcyjnego polega na tym, że łuk plazmowy oraz łuk GMA oddzielone są od siebie kurtyną magnetyczną wymuszającą przepływ prądu łuku plazmowego i GMA przez materiał spawany. W innym przypadku następowaloby wzajemne znoszenie strumieni elektronów ze względu na przeciwną polaryzację. Na rysunku 1 pokazano schemat budowy plazmotronu hybrydowego szerzej opisanego w [8].

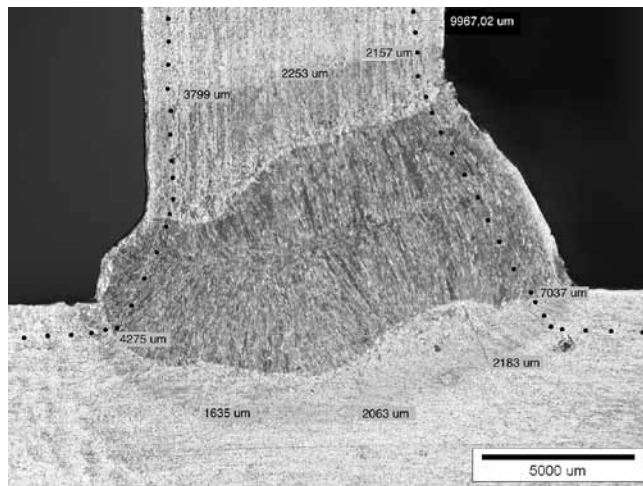


**Rys. 1.** Schemat budowy plazmotronu hybrydowego: 1 – łuk plazmowy, 2 – łuk GMA, 3 – katoda plazmotronu, 4 – dysza plazmowa, 5 – wspólna dysza gazu osłonowego, 6 – kierunek spawania, 7 – drut elektrodowy GMA, 8 – ciecz metaliczna, 9 – kanał parowy, 10 – materiał podstawowy

**Fig. 1.** Schematic diagram of the hybrid plasmatron: 1 – plasma arc, 2 – GMA arc, 3 – plasmatron cathode, 4 – plasma nozzle, 5 – common shielding gas nozzle, 6 – welding direction, 7 – GMA wire electrode, 8 – liquid metal, 9 – plasma keyhole, 10 – substrate material

Łuk plazmowy zasilany jest prądem o natężeniu umożliwiającym uruchomienie efektu kanału parowego (ang. *keyhole*), będącego wynikiem wysokiej temperatury i ciśnienia strumienia plazmy, co powoduje gwałtowne parowanie spawanego materiału. Parametry procesu dobierane są tak, by głębokość kanału parowego była porównywalna z grubością spawanego

elementu, a jego średnica obejmowała oba brzozy spawanych materiałów. W ten sposób uzyskiwane jest bardzo głębokie penetrowanie fazą ciekłą spawanego materiału. W efekcie intensywnego parowania metalu oraz minimalnego, ale jednak odstępu brzozy spawanych przedmiotów, lico spoiny powstającej za przemieszczającym się łukiem plazmowym byłoby wklęsłe, gdyż do jego wypełnienia brakowałoby masy. Za łukiem plazmowym przemieszcza się łuk GMA swobodnie jarzący się w przestrzeni pomiędzy elektrodami, a masa topionego spoiwa służy do uformowania lica spoiny. Łuk GMA oddziałuje na jeziorko spawalnicze tuż za łukiem plazmowym, jeszcze przed skryształizowaniem cieczy powstałej na skutek działania plazmy. Okno technologiczne opisanej hybrydy jest bardzo wąskie i dla utrzymania stabilności procesu wymaga wysokiej precyzji ruchu roboczego; ze względu na wymienione uwarunkowania proces ten jest zwykle robotyzowany.

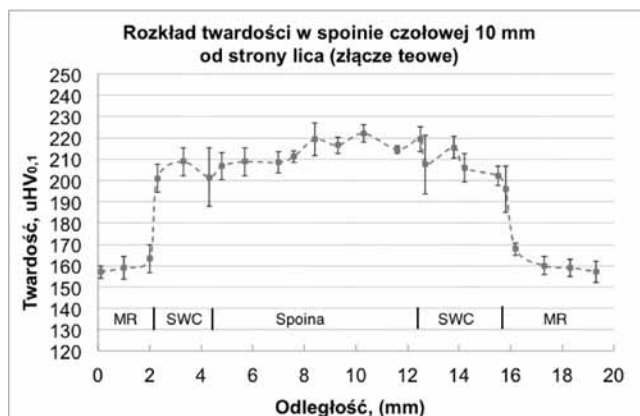


**Rys. 2.** Mikrostruktura z pomiarami wielkości obszarów charakterystycznych spoiny czołowej 10 mm – złącze teowe  
**Fig. 2.** Microstructure with measurement of specific areas of butt weld 10 mm – T joint

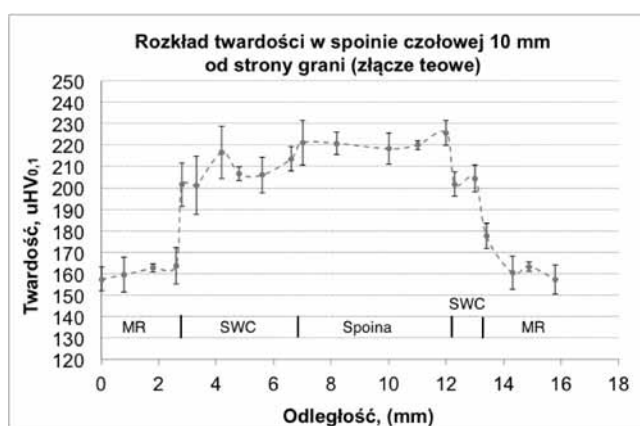
## Badania metalograficzne

Badaniom poddano wybrane złącza spawane ze spoinami czołowymi. Materiał podstawowy to stal niestopowa S235JR o grubości 10 i 12 mm. Spawanie prowadzono w sposób zrobotyzowany. Wszystkie złącza wykonano w pozycji podolnej bez podgrzewania. Zgłady preparowano przez szlifowanie papierem ściernym o gradacji od 100 do 2500, następnie polerowano wodną zawiesiną  $Al_2O_3$ , po czym trawiono 30% nitaliem. Mikrostrukturę badanych złączy fotografowano na mikroskopie stereoskopowym Olympus, stosując powiększenie 6x. Pomiary charakterystycznych wielkości geometrycznych wykonano, stosując oprogramowanie Olympus Analysis.

Na rysunku 2 przedstawiono obraz mikrostruktury spoiny czołowej złącza teowego (linie punktów od strony lica i grani oznaczają miejsca pomiaru twardości), a na rysunkach 3 i 4 rozkład twardości złącza wykonanego w poniżej przedstawionych warunkach. Grubość blach 10 mm + 10 mm, bez ukosowania, odstęp 1,5 mm; natężenie prądu spawania - plazma – 200 A, MAG – 540 A; napięcie łuku MAG – 30 V; prędkość spawania – 0,52 m/min; posuw drutu elektrodowego – 12 m/min. We wszystkich scharakteryzowanych poniżej spoinach odnotowano wąską Strefę Wpływu Ciepła, o szerokości ok. 2 mm, co wskazuje na stosunkowo małą ilość ciepła wprowadzoną do złącza podczas spawania. Taka sytuacja jest bardzo korzystna z punktu widzenia poziomu naprężeń własnych złącza oraz odkształceń cieplnych. Przedstawione poniżej rozkłady twardości wskazują, że nie występuje nadmierne utwardzenie SWC, mimo iż nie stosowano podgrzewania wstępnego.

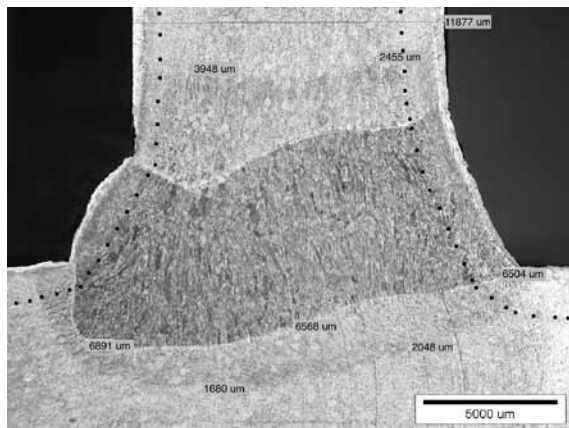


**Rys. 3.** Rozkład twardości w spoinie czołowej 10 mm od strony lica – złącze teowe  
**Fig. 3.** Hardness distribution in butt weld 10 mm – bead side



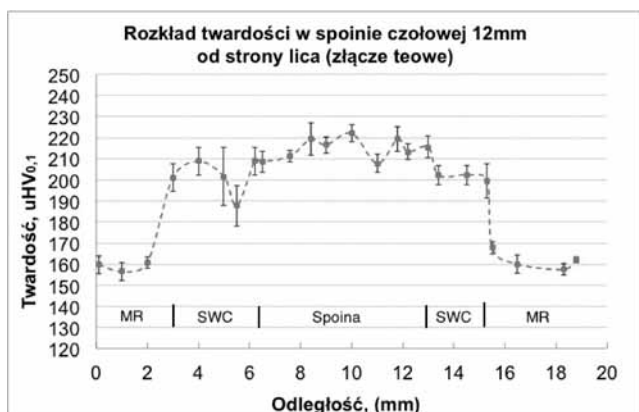
**Rys. 4.** Rozkład twardości w spoinie czołowej 10 mm od strony grani – złącze teowe  
**Fig. 4.** Hardness distribution in butt weld 10 mm – root side

Na rysunku 5 przedstawiono obraz mikrostruktury – spoiny czołowej złącza teowego (linie punktów od strony lica i grani oznaczają miejsca pomiaru twardości), a na rysunkach 6 i 7 rozkład twardości w złączu, wykonanym w poniżej przedstawionych warunkach. Grubość blach 12 mm + 12 mm, ukosowanie 15°, próg 2 mm bez odstęp; natężenie prądu spawania – plazma – 200 A, MAG – 535 A; napięcie łuku MAG – 29 V; prędkość spawania – 0,52 m/min; posuw drutu elektrodowego – 12 m/min.



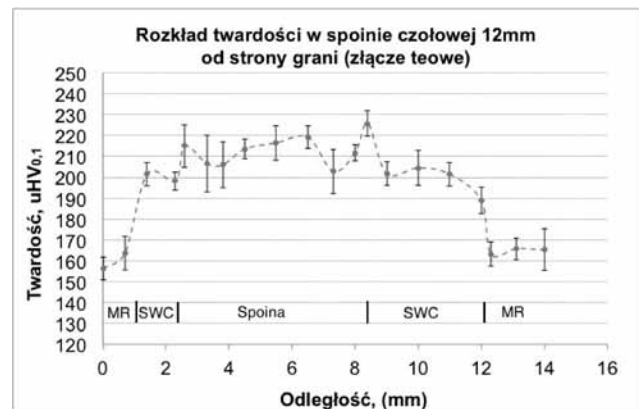
**Rys. 5.** Mikrostruktura z pomiarami wielkości obszarów charakterystycznych spoiny czołowej 12 mm – złącze teowe

**Fig. 5.** Microstructure with measurement of specific areas of butt weld 12 mm – T joint



**Rys. 6.** Rozkład twardości w spoinie czołowej 12 mm od strony lica – złącze teowe

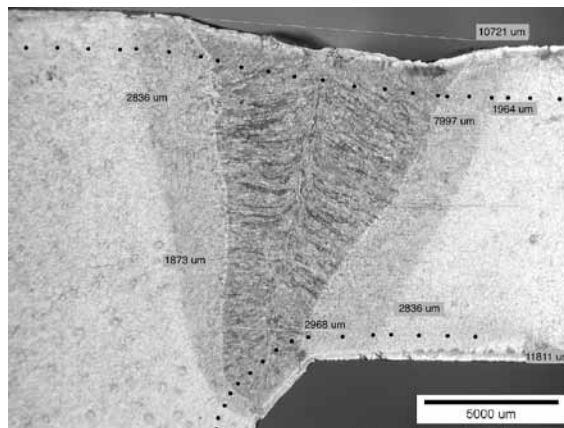
**Fig. 6.** Hardness distribution in butt weld 12 mm – bead side



**Rys. 7.** Rozkład twardości w spoinie czołowej 12 mm od strony grani – złącze teowe

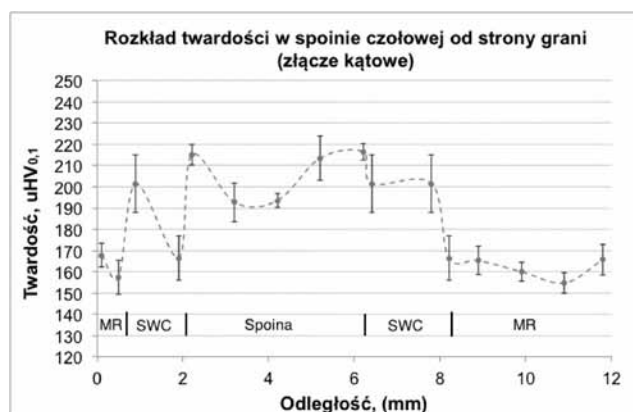
**Fig. 7.** Hardness distribution in butt weld 12 mm – root side

Na rysunku 8 przedstawiono obraz mikrostruktury spoiny czołowej złącza kąтового (linie punktów od strony lica i grani oznaczają miejsca pomiaru twardości), a na rysunkach 9 i 10 rozkład twardości. Złącze wykonano w poniżej przedstawionych warunkach. Grubość blach 12 mm + 12 mm, ukosowanie 15°, próg 2 mm bez odstęp; natężenie prądu spawania – plazma – 200 A; MAG 540 A; napięcie łuku MAG – 30 V; prędkość spawania – 0,52 m/min; posuw drutu elektrodowego – 12 m/min.



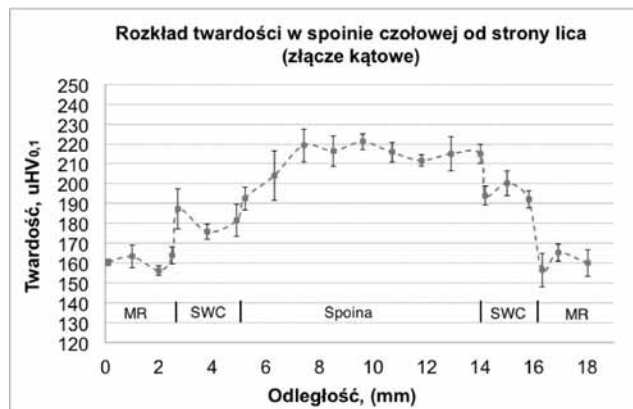
**Rys. 8.** Mikrostruktura z pomiarami wielkości obszarów charakterystycznych spoiny czołowej 12 mm złącze kątowe

**Fig. 8.** Microstructure with measurement of specific areas of butt weld 12 mm



**Rys. 9.** Rozkład twardości w spoinie czołowej 12 mm od strony grani – złącze kątowe

**Fig. 9.** Hardness distribution in butt weld 12 mm – root side



**Rys. 10.** Rozkład twardości w spoinie czołowej 12 mm od strony lica – złącze kątowe

**Fig. 10.** Hardness distribution in butt weld 12 mm – bead side

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań spawania hybrydowego Plasma-GMA stali niestopowej, które wskazują na możliwość spawania grubych elementów spoinami jednościegowymi przy ograniczonej konieczności ukosowania, do grubości blach 10 mm bez ukosowania, powyżej ukosowanie 15°. Charakterystyczną cechą opisanych spoin jest mały udział spoiwa w stopiwie oraz bardzo wąska SWC, uwzględniając grubość spawanych blach. Pomiar twardości w obszarach cha-

rakterystycznych wskazują, że nie występuje nadmierne utwardzenie SWC, mimo iż nie stosowano podgrzewania wstępnego. Opisana metoda może stanowić tańszą alternatywę dla hybrydowych systemów spawalniczych Laser-GMA. Głównymi obszarami potencjalnego zastosowania spawania hybrydowego Plasma-GMA są: przemysł stoczniowy, przemysł maszyn i urządzeń górniczych, konstrukcje w dziedzinie energetyki, tabor kolejowy oraz duże konstrukcje motoryzacyjne.

*Badania sfinansowano z projektu EUREKA nr E!PL-IL/05/02/2013 dofinansowanego przez NCBiR.*

## Literatura

- [1] Adamiec J., Adamiec P., Więcek M.: Spawanie hybrydowe paneli ścian szczelnych za pomocą lasera światłowodowego, *Przegląd Spawalnictwa* 10/2007, vol. 79, s. 49-52, 2007.
- [2] Adamiec J., Gawrysiuk W., Więcek M.: Spawanie rur ożebrowanych laserem światłowodowym, *Przegląd Spawalnictwa* 11/2009, vol. 81, s. 82-86, 2009.
- [3] Bober M., Senkara J.: Badania porównawcze napawanych plazmowo warstw niklowych z węglkami Ti i Cr, *Przegląd Spawalnictwa* 9/2011, vol. 83, s. 32-37, 2011.
- [4] Jakubowski J., Wysocki P., Senkara J.: Selektywne regeneracyjne napawanie plazmowe warstw Ni-WC na tytanowe topatki sprężarki silnika lotniczego, *Przegląd Spawalnictwa* 9/2011, vol. 83, s. 38-42, 2011.
- [5] Pilarczyk J., Banasik M., Dworak J., Stano S.: Spawanie hybrydowe z wykorzystaniem wiązki laserowej i łuku elektrycznego, *Przegląd Spawalnictwa* 10/2007, vol. 79, s. 44-48, 2007.
- [6] Pilarczyk J., Banasik M., Stano S., Dworak J.: Wykorzystanie laserów w badaniach i praktyce w centrum technologii laserowych, *Przegląd Spawalnictwa* 10/2008, vol. 80, s. 65-72, 2008.
- [7] Pilarczyk J., Banasik M., Stano S., Dworak J.: Spajanie laserowe z materiałem dodatkowym i mechanicznym układem śledzenia złącza, *Przegląd Spawalnictwa* 12/2011, vol. 83.
- [8] Szulc J., Piłat Z.: Super-Heavy Duty (SHD) Super-MIG – Technologia spawania hybrydowego „Plazma-MIG/MAG”, *Spajanie materiałów konstrukcyjnych*, 2/2014, s. 12-14, 2014.
- [9] Włosiński W., Chmielewski T.: Plasma-hardfaced chromium protective coatings-effect of ceramic reinforcement on their wettability by glass, *Contributions of Surface Engineering to Modern Manufacturing and Remanufacturing* 1, s. 48-53, 2002.
- [10] Wojno T., Kędzia J., Mirski Z., Reiner J.: Hybrydowe spawanie stali 41Cr4 z wykorzystaniem promieniowania laserowego i nagrzewania indukcyjnego, *Przegląd Spawalnictwa* 7/2013, vol. 85, s. 40-47, 2013.



**W dniach od 14 do 16 października 2014 roku**

**Instytut Spawalnictwa w Gliwicach**

**organizuje**

**56. Konferencję Naukowo-Techniczną**

**pod hasłem: „Spawalnictwo - zawsze można więcej”.**

**Konferencja odbędzie się równocześnie**

**z Międzynarodowymi Targami Spawalniczymi ExpoWELDING 2014**

**w Centrum Targowo-Konferencyjnym Expo Silesia w Sosnowcu.**

Konferencja wraz z targami spawalniczymi jest najważniejszym wydarzeniem w branży spawalniczej w tym roku w Polsce. Konferencja jest objęta patronatem Ministerstwa Gospodarki i Polskiej Akademii Nauk. W trzydniowym spotkaniu weźmie udział ok. 300 specjalistów, naukowców i praktyków w dziedzinie spawalnictwa i technologii pokrewnych.