

# Analiza technologii spawania laserowego materiałów trudnospawalnych

## Analysis of the laser welding technology of poorly weldable materials

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nieniszczących, metalograficznych oraz pomiarów mikrotwardości złączy korpusu z żeliwa sferoidalnego spawanego laserowo. Na podstawie badań stwierdzono, że techniki spawania laserowego mogą być z powodzeniem stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, ponieważ mogą zapewnić wysokie wymagania stawiane konstrukcjom spawanym, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności. Udowodniono, że proces spawania żeliwa, które jest materiałem powszechnie uznawanym za trudnospawalne, przy odpowiednim doborze metody oraz parametrów spawania laserowego, można realizować. Potwierdzono tym samym przydatność techniki spawania laserowego z materiałem dodatkowym o wysokiej zawartości niklu, nadającego spoinie plastyczność, przy jednoczesnym obniżeniu twardości, ograniczeniu występowania pęknięć i porowatości w złączach. Stwierdzono słuszność zastosowania gazu osłonowego helu, który dzięki swoim właściwościom ochronnym pozwala uzyskać najlepszą jakość spoin dla materiałów trudnospawalnych. Mikrostruktura materiału rodzimego składa się z ferrytu, perlitu oraz wydzielenia grafitu kulkowego. Mikrostruktura złącza spawanego potwierdziła występowanie kruchych martenzytycznych obszarów w strefie wtopienia i strefie wpływu ciepła. Prowadzi to do uzyskania wysokiej twardości materiału, przy jednoczesnym spadku udatności.

### Abstract

The results of non-destructive testing, metallographic, and microhardness measurements of housing joints made of ductile iron joined by laser-welding have been presented in the paper. Based on extensive research it has been discovered, that the laser welding technique can be successfully used in the automotive industry, and thanks to its unique properties, are able to provide the high demands of welded constructions, while maintaining high efficiency of the process. It has been proven, that the process of welding of cast iron, which is a material commonly considered to be difficult weldable, with the appropriate selection of method and laser welding parameters can be easily performed. Thus it was confirmed the usefulness of laser welding techniques with filler material, enriched with a high content of nickel, which causes plasticity of the weld, while reducing hardness, cracks and porosity in the joints. It was also discovered that using helium as the shielding gas improves the laser welding process, because its competitive protective properties, allows to obtain the best quality of welds for materials which weldability is difficult. Microstructure of base material consists of ferrite, perlite and secreted nodular graphite, while the microstructure of the joints confirmed the presence of brittle martensitic areas inside fusion zone and heat affected zone.

### Wstęp

Zastosowanie technologii laserowych ze względu na bardzo konkurencyjne właściwości emitowanej wiązki laserowej jest dość powszechne. Lasery

znalazły powszechne zastosowanie w tak różnych dziedzinach jak medycyna, fizyka, motoryzacja, rolnictwo, wojsko, inżynieria materiałowa, telekomunikacja i wiele innych.

Technologiczna obróbka materiałów jest jednym z głównych zastosowań technik laserowych. Operacje technologiczne realizowane za pomocą promieniowania laserowego można nazwać zaawansowanymi, ze względu na ich wysoką precyzję i bezkontaktową obróbkę. Chęć stosowania laserów wynika z możliwości

**Mgr inż. Andrzej Ignasiak, dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, prof. PWr.** – Politechnika Wrocławska.

uzyskania wysokiej koncentracji energii wiązki laserowej. Techniki laserowe wykorzystywane są tym intensywniej, im wyższe są wymagania stawiane konstrukcjom i im wyższej wydajności żąda się przy produkcji tych konstrukcji. W wielu przypadkach laser jest jedynym możliwym do zastosowania narzędziem w procesach spawania, cięcia, znakowania i mikroobróbki [1÷3].

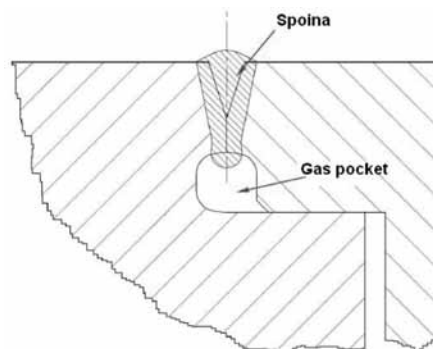
Spawanie laserowe polega na stapianiu brzegów łączonych przedmiotów w wyniku doprowadzenia do tego obszaru skoncentrowanej wiązki światła. W miejscu zogniskowania wiązki laserowej następuje intensywne, miejscowe nagrzanie, stopienie i częściowe odparowanie materiału. Dzięki wyjątkowym właściwościom promieniowania laserowego, takim jak: mały kąt rozbieżności wiązki, monochromatyczność oraz spójność, istnieje możliwość silnego skupienia promieniowania i osiągnięcia koncentracji energii dochodzącej nawet do  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> w określonym obszarze [4].

Spawanie laserowe stanowi jedno z głównych zastosowań laserów w technologicznej obróbce materiałów. Stało się tak na przestrzeni dwóch ostatnich dziesięcioleci ze względu na jego właściwości: małą ilość i wysoką precyzję wprowadzanego ciepła do materiału, a także uniwersalność i łatwość automatyzacji. Łączyć można większość metali i ich stopów oraz tworzywa sztuczne, wykonując różnorodne typy złączy w dowolnej pozycji. Poziom gęstości mocy i jakości wiązki, jakie współcześnie oferują dostępne na rynku specjalistyczne i uniwersalne urządzenia, pozwala efektywnie i z dużą wydajnością łączyć elementy wielkogabarytowych konstrukcji o grubości ścianki dochodzącej do kilkudziesięciu milimetrów, jak i stosować lasery do spawania i mikroobróbki elementów o grubości setnych części milimetra. Spawanie laserowe pod względem wydajności i precyzji może konkurować zarówno z takimi metodami łączenia, jak spawanie łukowe w osłonach gazowych i zgrzewanie, jak i z nowoczesnymi metodami spawania elektronowego i plazmowego. W wielu przypadkach może być również uzupełnieniem wymienionych metod spawalniczych [1÷4].

Żeliwo sferoidalne otrzymuje się w procesie odlewania żeliwa szarego, przez proces modyfikacji, przy małym stężeniu fosforu i siarki. Modyfikatorami są magnez lub cer, które sprawiają, że grafit wydziela się w osnowie w postaci kulistej. Kąpiel odlewane go metalu zawiera z reguły 3,2÷4,5% węgla oraz 1,8÷2,8% krzemu. Żeliwo kuliste charakteryzuje się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi, przy zachowaniu również odpowiedniej ciągliwości. Mikrostruktura osnowy może być ferrytyczna, ferrytyczno-perlityczna oraz perlityczna, jednak po obróbce cieplnej jest możliwość otrzymania bainitu lub martenzytu [5].

## Metodyka badań, materiał do badań

Celem badań jest analiza technologii spawania laserowego połączeń żeliwnego korpusu z pokrywką.



Rys. 1. Schemat złącza. Ukosowanie na Y

Fig. 1. Weld scheme. Y-beveled weld

Próby spawalnicze przeprowadzono wg przyjętej technologii spawania:

- łączone elementy o symetrii obrotowej,
- połączenia jednoimienne z żeliwa sferoidalnego GJS-600-3,
- spoina ukosowana na Y,
- laser z ośrodkiem gazowym CO<sub>2</sub> firmy EMAG, model ELC 250Duo,
- technika spawania z głębokim wtopieniem,
- stały zakres parametrów spawania,
- spawanie z materiałem dodatkowym: drut spawalniczy Ni-Rod44 (44% nikiel),
- gaz osłonowy: hel (wysoka czystość mini. 99,996%),
- nadmuch gazu: dysza boczna, gaz kierowany przed wiązkę promieniowania laserowego.

Do procesu łączenia materiałów wykorzystano laser molekularny z ośrodkiem aktywnym CO<sub>2</sub> firmy EMAG, model ELC 250Duo. Użyteczna moc lasera wynosi 0,8÷4,0 kW. W laserze molekularnym ośrodkiem czynnym jest mieszanina gazów: dwutlenku węgla, azotu, wodoru i helu. Cząsteczki dwutlenku węgla pełnią rolę cząsteczek czynnych, natomiast poziomy laserowe odpowiadają energiom drgań cząsteczki CO<sub>2</sub>. Wzbudzenie cząsteczek CO<sub>2</sub> do górnego poziomu energetycznego zachodzi na skutek zderzeń z powstającymi przy wyładowaniach elektrycznych rozpędzonymi elektronami oraz ze wzbudzonymi cząstkami N<sub>2</sub>.

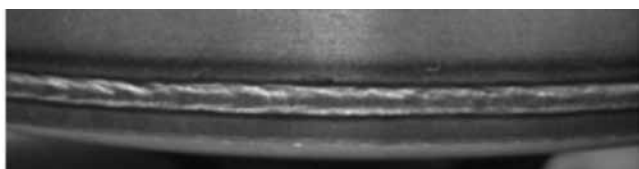
W projektowaniu złącza została uwzględniona szczelina *gas pocket* pomiędzy spawanymi elementami, która umożliwia swobodny odpływ gazów, ograniczając ryzyko wystąpienia porów (rys. 1).

Opracowano technologię spawania z materiałem dodatkowym, którego ingerencja w strukturę złącza jest wymagana w celu zapewnienia jego odpowiednich właściwości mechanicznych. Zdecydowano się na drut Ni-Rod44, opracowany do automatycznego i pół-automatycznego spawania żeliwa sferoidalnego. Dzięki swoim właściwościom: wydłużenie A = 35% oraz R<sub>m</sub> = 690 MPa, wynikającym z wysokiej zawartości niklu (44% Ni, 11% Mn, 1,5% C, 45% Fe), drut pozwala uzyskiwać poprawne połączenia w materiałach trudnospawalnych [6]. Stosowanie drutu Ni-Rod44 ma polepszyć plastyczność spoiny, obniżyć jej twardość oraz wyeliminować pęknięcia i porowatość w złączach.



**Rys. 2.** Właściwa pozycja wiązki laserowej i drutu spawalniczego względem spawanych materiałów

**Fig. 2.** Correct position of laser beam and filler metal wire relatively to welding materials surface



**Rys. 3.** Poprawny kształt złącza

**Fig. 3.** Correct shape of weld

Kolejnym etapem badań było sprawdzenie poprawności ustawienia wiązki laserowej względem szczeliny i odpowiedniej pozycji materiału dodatkowego (rys. 2).

Zalecane parametry spawania wyznaczono w wyniku prób spawalniczych (rys. 3, tabl. I).

Ocenę makrostruktury połączeń spawanych wykonano okiem nieuzbrojonym oraz z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego i kamery cyfrowej Nikon DS-Fi1. Do zbadania mikrostruktury złącza użyto mikroskopu świetlnego Nikon Eclipse MA200, stosując powiększenia do 500x. Dokumentację fotograficzną wykonano za pomocą kamery cyfrowej Nikon DS-L2. Mikro-twardość mierzono za pomocą cyfrowego twardościomierza firmy Buehler, model MicroMet 5104.

**Tablica I.** Parametry spawania  
**Table I.** Welding parameters

Charakterystyki	Wartość
Drut	Ni-Rod44
Średnica drutu, mm	0,9
Moc lasera, W	3100
Posuw drutu, m/min	3,7
Posuw detalu, mm/min	1800
Gaz osłonowy	Hel
Przepływ gazu, l/min	20
Ogniskowa, mm	250
Pozycja ogniska, mm	0
Moc overlap, W	2200
Overlap, stopnie	5
Długość spoiny, mm	360
Wygaszenie, stopnie	10

## Wyniki badań i ich dyskusja

Analiza składu chemicznego została przeprowadzona za pomocą metody spektralnej z wykorzystaniem mikroanalizatora rentgenowskiego OXFORD Link ISIS-300. Badania tą metodą polegają na uzyskaniu i analizie widma energii, jaką emitują, pochłaniają lub rozpraszają dane atomy, jądra itp.

Pobrano po trzy próbki zarówno z materiału korpusu, jak i pokrywki (tabl. II). Próbki wycinano co 120°, aby sprawdzić, czy rozkład pierwiastków w każdej części jest równomierny.

Analiza spektralna wykazała, że skład chemiczny elementów, z których zostały pobrane próbki, odpowiada tym, które są podane przez producenta dla ww. materiałów. Zaobserwowano również właściwy rozkład pierwiastków, mający niewątpliwie wpływ na właściwe prowadzenie procesu spawania laserowego, ze względu na skład chemiczny łączonych materiałów.

Po przeprowadzonym procesie spawania przeprowadzono badania wizualne złączy (nieuzbrojonym okiem). Podstawowe kryteria odbioru połączeń spawanych ujęte są w normie dla złączy spawanych wiązką promieniowania laserowego PN-EN ISO 13919-1 (2002).

Kolejnym etapem sprawdzającym wykonane złącza były badania penetracyjne. Zasada działania oparta jest na zjawisku kapilarności cieczy o wysokiej zwilżalności, wnikającej w szczeliny powierzchniowe badanego materiału. Zarówno kontrola wizualna, jak i badania penetracyjne wskazywały na poprawność wykonania połączeń.

Drugą część badań stanowiła kontrola metalograficzna, która ma na celu ujawnienie rzeczywistej struktury badanego połączenia. Na rysunku 4 przedstawiono miejsce pobrania próbek.

W celu przygotowania rejestru spawalniczego poszczególnych cech połączenia spawanego, zdecydowano się wykonać badania makroskopowe dla dwóch



**Rys. 4.** Miejsce wycięcia próbek

**Fig. 4.** Example of sampling place

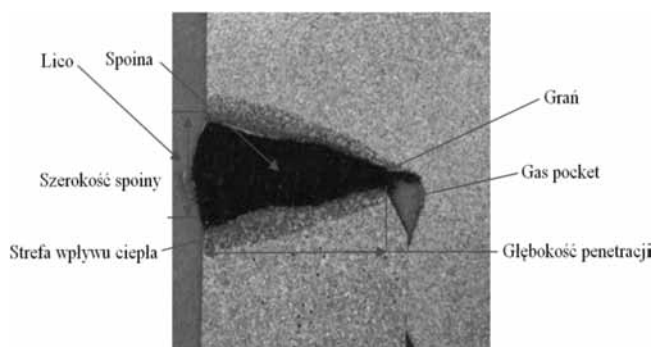
**Tablica II.** Skład chemiczny łączonych elementów  
**Table II.** Chemical composition of welded parts

Rodzaj stali	Próbka [stopnie]	Skład chemiczny, % wag.								
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Al.	
GJS-600-3 Korpus	120	3,51	0,22	2,09	0,027	0,012	0,035	0,37	0,005	
	260	3,52	0,22	2,12	0,029	0,011	0,042	0,41	0,005	
	360	3,54	0,21	2,14	0,027	0,013	0,038	0,40	0,004	
GJS-600-3 Pokrywka	120	3,65	0,23	2,22	0,041	0,009	0,040	0,29	0,007	
	260	3,64	0,25	2,24	0,038	0,008	0,041	0,32	0,006	
	360	3,66	0,22	2,19	0,037	0,009	0,039	0,32	0,005	

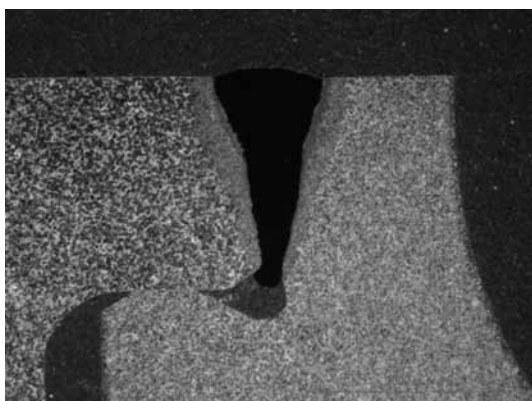
próbek A i B (rys. 5÷7, tabl. III). Dla obydwu złączy otrzymano wyniki, mieszczące się w przyjętej tolerancji wymiarowo-kształtowej, pozwalające uznać spoiny za poprawnie wykonane.

Na podstawie wyników badań mikrostruktury (rys. 8 i 9) stwierdzono, że budowa mikrostrukturalna połączenia spawanego charakteryzuje się następującymi strefami:

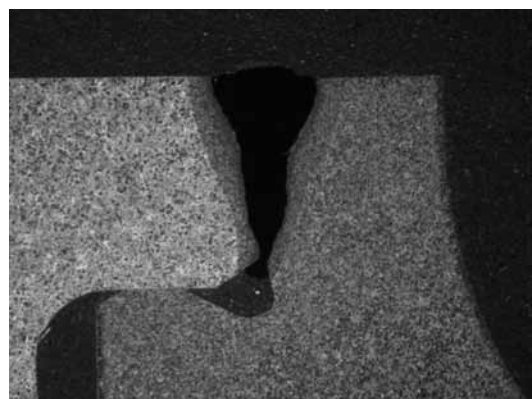
- spoina: struktura austenityczna,
- strefa wtopienia: gruboiglasty martenzyt, austenit szczytkowy oraz wydzielienia grafitu kulkowego,



Rys. 5. Makrostruktura przykładowej spoiny  
Fig. 5. Example of weld macrostructure



Rys. 6. Makrostruktura połączenia żeliwnej pokrywki z żeliwnym korpusem. Próbka A. Trawione 2% nitałem  
Fig. 6. Macrostructure of weld of cast iron cover and cast iron housing. Specimen A, Etching by 2% Nital



Rys. 7. Makrostruktura połączenia żeliwnej pokrywki z żeliwnym korpusem. Próbka B. Trawione 2% nitałem  
Fig. 7. Macrostructure of weld of cast iron cover and cast iron housing. Specimen B, Etching by 2% Nital

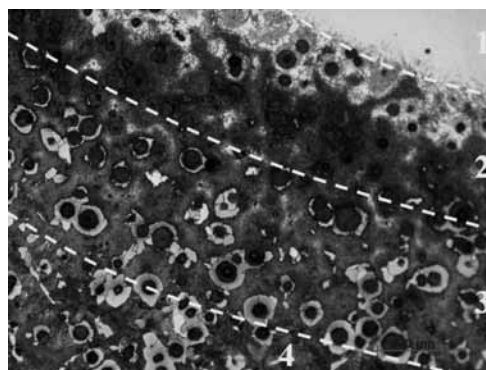
- strefa wpływu ciepła: średnioiglasty martenzyt, wydzielenia grafitu kulkowego oraz niewielka ilość ferrytu zlokalizowana wokół wydzieleni grafitu,
- materiał rodzimy: ferryt, perlit oraz wydzielienia grafitu kulkowego.

Mikrotwardość zbadano metodą Vickersa HV0.5 zgodnie z PN-EN ISO 6507-1:1999 przy obciążeniu 500 g.

Tablica III. Rejestr spawalniczy cech złącza spawanego korpusu żeliwnego spawanego technikami laserowymi

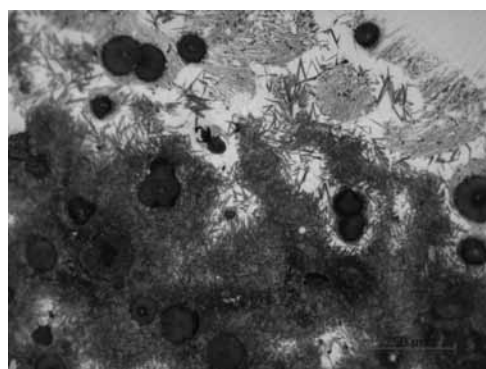
Table III. Welding register of laser welded joint features of cast iron housing

Cecha	Zakres	A90°	A270°	B90°	B270°
Położenie spoiny	Centryczne	OK	OK	OK	OK
Głębokość wtopienia	100% (Y3.0)	OK	OK	OK	OK
Szerokość lica spoiny	1.20 – 2.20 mm	OK	OK	OK	OK
Nadlew od strony lica	Max. 1.00 mm	OK	OK	OK	OK
Szerokość grani spoiny	Min. 0.20 mm	OK	OK	OK	OK
Nadlew od strony grani	Max. 1.00 mm	OK	OK	OK	OK
Porowatość	Max. 0.30 mm	OK	OK	OK	OK
Niepełne wypełnienie rowka	Nie dopuszcza się	OK	OK	OK	OK
Wklęsłość grani	Nie dopuszcza się	OK	OK	OK	OK
Pęknięcia w spoinie	Nie dopuszcza się	OK	OK	OK	OK



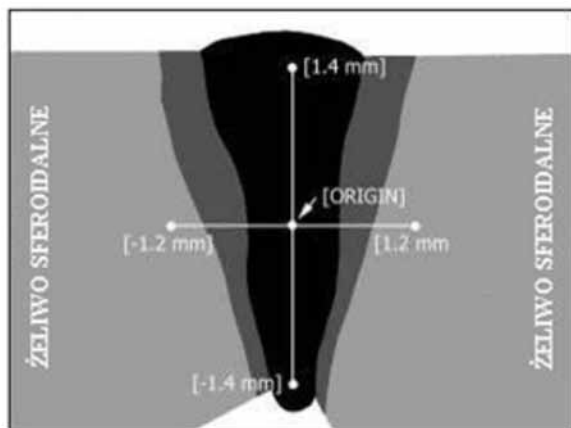
Rys. 8. Mikrostruktura obszaru z pogranicza spoiny (1), strefy wtopienia (2), strefy wpływu ciepła (3) oraz materiału rodzimego (4). Trawione 2% nitałem, pow. 200x

Fig. 8. Microstructure of weld (1), fusion zone (2), heat affected zone (3) and base metal (4). Etching by 2% Nital, Magn. 200x



Rys. 9. Mikrostruktura w strefie wtopienia. Widoczny średnio i drobnoiglasty martenzyt, austenit szczytkowy oraz wydzielienia grafitu kulkowego. Trawione 2% nitałem, pow. 500x

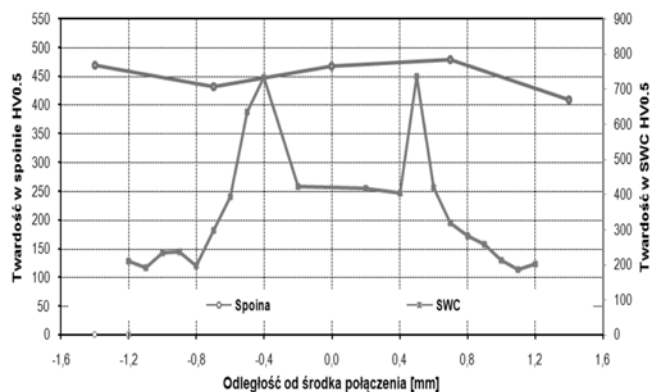
Fig. 9. Microstructure of fusion zone. The middle and fine needle-shaped martensite, retained austenite and modular graphite visible. Etching by 2% Nital, Magn. 500x



Rys. 10. Schemat rozkładu mikrotwardości  
Fig. 10. Microhardness distribution shane

Tablica IV. Wyniki badania mikrotwardości – próbka A  
Table IV. Microhardness measurement results – specimen A

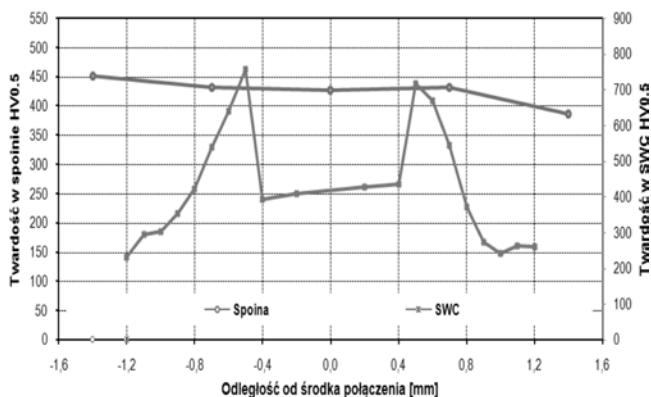
-1,40	470
-0,70	433
0,00	468
0,70	480
1,40	409
<b>MAX</b>	<b>480</b>
<b>Dystans</b>	
-1,20	210
-1,10	192
-1,00	235
-0,90	237
-0,80	196
-0,70	299
-0,60	393
-0,50	635
-0,40	733
-0,20	424
0,20	417
0,40	403
0,50	736
0,60	421
0,70	320
0,80	282
0,90	258
1,00	214
1,10	186
1,20	202
<b>MAX</b>	<b>736</b>



Rys. 11. Rozkład mikrotwardości – próbka A  
Fig. 11. Microhardness distribution – specimen A

Tablica V. Wyniki badania mikrotwardości – próbka B  
Table V. Microhardness measurement results – specimen B

-1,40	451
-0,70	432
0,00	428
0,70	432
1,40	386
<b>MAX</b>	<b>451</b>
<b>Dystans</b>	
-1,20	231
-1,10	295
-1,00	303
-0,90	353
-0,80	424
-0,70	539
-0,60	642
-0,50	759
-0,40	393
-0,20	410
0,20	428
0,40	436
0,50	719
0,60	670
0,70	545
0,80	371
0,90	274
1,00	243
1,10	263
1,20	260
<b>MAX</b>	<b>759</b>



Rys. 12. Rozkład mikrotwardości – próbka B  
Fig. 12. Microhardness distribution – specimen B

Pomiary mikrotwardości zostały wykonane w punktach, których rozmieszczenie w przekroju złącza przedstawiono na rysunku 10. Pierwszym etapem było zbadanie rozkładu twardości wzdłuż spoiny, wykonano pięć odcisków kolejno w punktach -1,4; -0,7; 0; 0,7; 1,4. Następnym krokiem było wykonanie kolejno dwudziestu odcisków w poprzek spoiny w jej środkowej części, aby zbadać kruchość podhartowanych stref wpływu ciepła. Punktem startowym był punkt -1,20, a punktem końcowym 1,20. Wyniki zostały zaprezentowane w tablicach IV i V oraz na rysunkach 11 i 12 przedstawiających rozkłady mikrotwardości dla każdej próbki.

## Podsumowanie

Wyniki badań pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Analiza składu chemicznego wykazała, że udział procentowy poszczególnych pierwiastków odpowiada wartościom, które podane są w normach dla żeliwa sferoidalnego GJS-600-3. Zaobserwowano również właściwy rozkład pierwiastków w całej objętości materiału, mający wpływ na poprawne prowadzenie procesu spawania laserowego pod względem składu chemicznego łączonych materiałów.
- Badania wizualne, penetracyjne, rozkłady mikrotwardości oraz obrazy makro- i mikroskopowe pozwalają jednoznacznie stwierdzić poprawność i powtarzalność wykonywania złączy żeliwnych za pomocą technik laserowych. Słabą stroną połączenia może być podwyższona twardość występująca w spoinie dochodząca do 480 HV oraz bardzo wysoka twardość w strefie wpływu ciepła aż do 750 HV.
- Badania mikrostruktury ujawniły następujące strefy złącza:

- spoina: struktura austenityczna,
- strefa wtopienia: gruboiglasty martenzyt, austenit szczątkowy oraz wydzielenia grafitu kulkowego,
- strefa wpływu ciepła: średnioiglasty martenzyt, wydzielenia grafitu kulkowego oraz niewielka ilość ferrytu zlokalizowana wokół wydzieleni grafitu,
- materiał rodzimy: ferryt, perlit oraz wydzielenia grafitu kulkowego.
- Mikrostruktura połączenia spawanego potwierdziła występowanie martenzytycznych obszarów w strefie wtopienia i strefie wpływu ciepła. Prowadzi to do uzyskania wysokiej twardości materiału, przy jednoczesnym spadku udarnośći.
- Udowodniono, że proces spawania żeliwa, które jest materiałem powszechnie uznawanym za trudnospalalne, przy odpowiednim doborze metody oraz parametrów spawania laserowego, można z powodzeniem realizować.

## Literatura

- [1] Klimpel A.: Technologie laserowe w spawalnictwie, Wyd. Polit. Śląskiej, Gliwice, 2011.
- [2] Kusiński J.: Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków, 2000.
- [3] Józwicki R.: Technika laserowa i jej zastosowania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009.
- [4] Poradnik Inżyniera Spawalnictwo – Tom II, WNT (pod red. J. Pilarczyka), Warszawa, 2005.
- [5] Dobrzański L.: Metalowe Materiały Inżynierskie, WNT, Warszawa, 2004.
- [6] Internet: [www.specialmetalswelding.com](http://www.specialmetalswelding.com), 04.05.2011.

# Kwalifikowanie spawaczy stali wg wymagań PN-EN 287 1:2011 i norm międzynarodowych

*Dr inż. Ryszard Pakos*

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

## Streszczenie

W artykule zaprezentowano aktualne wymagania przy egzaminowaniu spawaczy wykonujących konstrukcje stalowe w oparciu o wytyczne europejskiej normy PN-EN 287-1:2011. Przedstawiono również kolejną wersję normy międzynarodowej ISO/DIS 9606-1:2010, mającej w niedalekiej przyszłości zastąpić PN-EN 287-1. Norma ta wprowadza zasadnicze zmiany w niektórych zapisach, zmieniające dotychczasowy system kwalifikowania spawaczy. Do najistotniejszych nowości tej normy zaliczane są

następujące warunki: kwalifikacja w oparciu o materiał dodatkowy zastosowany do spawania złącza egzaminacyjnego a nie jak obecnie – materiał podstawowy, spoiny czołowe nie kwalifikują spoin pachwinowych i odwrotnie, kwalifikowaniu podlega sposób przechodzenia metalu w łuku w metodach spawania 131, 135 i 138 oraz zakres temperatury podgrzania wstępnego. Wprowadzono dodatkowe oznaczenia dla materiałów dodatkowych (elektrody otulone) powiązane z normą EN-ISO 2560.

*Referat wygłoszony podczas XI Szczecińskiego Seminarium Spawalniczego w Szczecinie 6 września 2012. Tekst artykułu opublikowano w numerze 7/2012 Przeglądu Spawalnictwa.*