

Spawanie hybrydowe (laser + MAG) paneli ścian szczelnych kotłów energetycznych ze stali 7CrMoVTiB10-10

Hybrid laser welding (laser + MAG) of membrane walls panels of power boilers from 7CrMoVTiB10-10

Streszczenie

Problemy przy spawaniu łukiem krytym paneli ścian szczelnych z nowej bainitycznej stali 7CrMoVTiB10-10 przyczyniły się do poszukiwania innych technologii wytwarzania paneli z tej stali. Jedną z nowo opracowanych technologii jest spawanie hybrydowe laser + MAG. W pracy przedstawiono wyniki prób spawania paneli ścian szczelnych ze stali 7CrMoVTiB10-10 (T/P24) na nowym stanowisku w Centrum Innowacyjnych Technologii Laserych wyposażonym w dwa lasery o mocy 12 kW każdy.

Słowa kluczowe: ściany szczelne, spawanie hybrydowe

Abstract

Problems with the submerged arc welding membrane walls panels made from the new bainitic steel 7CrMoVTiB 10-10 contributed to the search for other production technology of the panels. One of the newly developed technology is the hybrid welding laser + MAG. This paper presents the results of tests of welding membrane walls panels made of 7CrMoVTiB10-10 (T/P24) in a new plant at the Center of Innovative Laser Technologies equipped with two lasers with power 12 kW each.

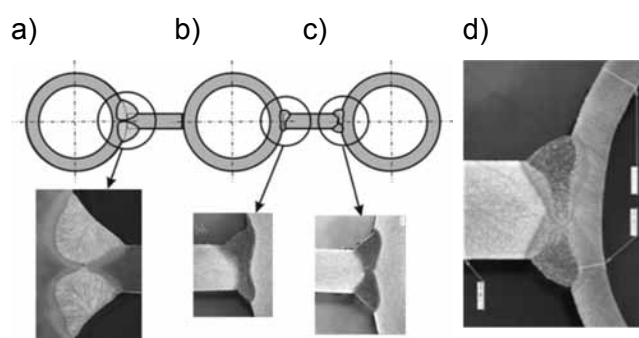
Keywords: membrane wall, hybrid welding

Wstęp

Spawanie hybrydowe laser + MAG jest unikatową w skali światowej technologią spawania ścian szczelnych kotłów energetycznych. Energoinstal SA do tej pory wykonał 2 kotły w Polsce oraz 6 kotłów w Europie przy zastosowaniu technologii hybrydowej oraz panele ścian szczelnych na remonty kilku kotłów w Polsce (np. w Opolu) i za granicą (Niemcy, Holandia, Rosja).

Technologia spawania hybrydowego paneli ścian szczelnych w stosunku do powszechnie stosowanej metody spawania łukiem krytym charakteryzuje się m.in. (rys. 1):

- kilkakrotnie mniejszą spoiną i mniejszą strefą wpływu ciepła HAZ,
- 5-krotnie mniejszym zużyciem drutu spawalniczego,
- większą prędkością spawania dochodzącą do 3 m/min,
- pełnym przetopem nawet przy różniących się grubościach ścianek rury (3 mm) i płaskownika (8 mm).



Rys. 1. Złącze rura – płaskownik ściany szczelnej ze stali 16Mo3 spawanej: a) dwustronnie łukiem krytym z prędkością 1 m/min; b) jednostronnie hybrydowo z prędkością 3 m/min; c) dwustronnie hybrydowo z prędkością 3 m/min, d) połączenie rury o grubości ścianki 3 mm i płaskownika o grubości 8 mm

Fig. 1. Plate-tube welded joint in the 16Mo3 steel membrane wall: a) double side weld made by SAW with welding speed of 1 m/min, b) single side weld made by hybrid welding with welding speed of 3 m/min, c) double side weld made by hybrid welding with welding speed of 3 m/min, d) joint of 3 mm thick tube and 8 mm plate

Dr inż. Wojciech Gawrysiuk – Energoinstal S.A.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: wgawrysiuk@energoinstal.pl

Mniejsze oddziaływanie cyklu cieplnego podczas spawania hybrydowego na geometrię i właściwości złączy spawanych związane jest jednocześnie z mniejszymi naprężeniami spawalniczymi, które są czynnikiem wpływającym na pękanie złączy spawanych i odkształcenia paneli po spawaniu (tzw. *banana effect*). Panele po spawaniu hybrydowym są proste i nie wymagają termicznego prostowania, jak ma to często miejsce po spawaniu łukiem krytym. Ponadto ułatwiony jest proces gięcia paneli, które nie mają umocnienia wynikającego z dużych spoin pachwinowych jak po łuku krytym.

Powyższe właściwości procesu spawania hybrydowego paneli ścian szczelnych i doświadczenia firmy Energoinstal zdobyte przy spawaniu paneli ze stali P235GH, 13CrMo4-5, 16Mo3, 10CrMo9-10 dały początek próbom technologicznym spawania stali T/P24, przeznaczonej na kotły o parametrach nadkrytycznych. Materiał T/P24 (tabl. I) został opracowany i wprowadzony na rynek przez firmę Vallourec Mannesmann jako odpowiedź na japońską stal T23 [1, 2], a firma Bohler Thyssen opracowała materiał dodatkowy do jego spawania. Zarówno producent materiału podstawowego, jak i dodatkowego przedstawiają w licznych publikacjach [3+5], że stal T/P24 jest materiałem łatwo spawalnym i niewymagającym podgrzewania wstępnego oraz obróbki cieplnej po spawaniu dla grubości do 10 mm. Ze względu na stosunkowo wysoką temperaturę pracy, do 565°C, oraz niskie koszty wytworzenia paneli ścian szczelnych związane z brakiem czasochłonnej i kosztownej obróbki cieplnej w procesie produkcji i montażu, stal 7CrMiVTiB10-10 stała się wiodącym materiałem stosowanym na panele ścian szczelnych. W Niemczech wybudowano wiele kotłów, gdzie zastosowano stal T/P24, m.in.: w Neurath, Walsum, Dalten, Karlsruhe, Marburg, Hamm, a w Polsce w EC Łagisza.

Tablica I. Skład chemiczny nowych stali niskostopowych dla energetyki: 7CrMoVTiB10-10 (T/P24), % wag. [5]

Table. I. Chemical composition of new low-alloyed steel for power industry: 7CrMoVTiB 10-10 (T/P24), % wag. [5]

C	Cr	Mo	V	Ti	B	N
0,08	2,4	1,0	0,25	0,07	≤ 0,07	≤ 0,012

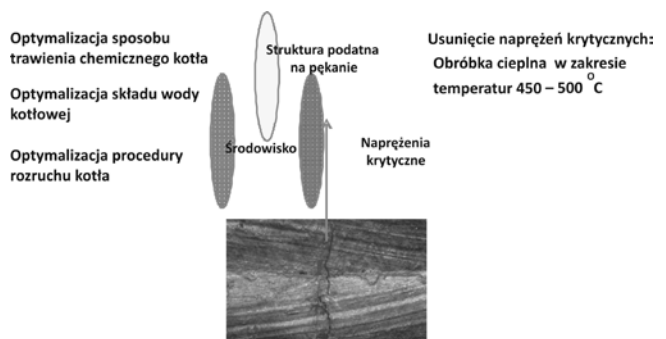
Powszechna opinia o dobrej spawalności stali T/P24 zaczęła ulegać modyfikacji od 2007 r. z powodu pęknięć, które uwidoczniły się nawet przez kilka tygodni (miesiący) po wytworzeniu paneli. Obecnie producenci kotłów stosują wiele zabiegów ograniczających pękanie ścian szczelnych z T/P24 m.in. przez [6+8]:

- podgrzewanie wstępne do temp. min. 100°C,
- zwiększenie energii liniowej w wyniku dalszego zmniejszania prędkości spawania łukiem krytym poniżej 0,7 m/min,

- spawanie z pełnym przetopem,
- zastosowanie zaraz po zakończeniu procesu spawania podgrzewania paneli do ok. 300°C, okrywanie ceramicznymi matami izolacyjnymi celem zmniejszenia szybkości chłodzenia, a tym samym ograniczenia udziału wodoru i martenzytu w strukturze spoiny oraz zmniejszenia naprężeń spawalniczych,
- obróbkę cieplną ścian po spawaniu,
- stosowanie materiału dodatkowego do spawania jak do stali P22 (10CrMo9-10) (np. drutu CM2).

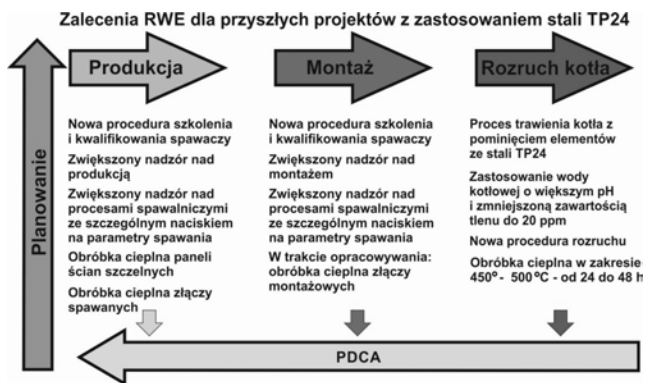
Główny inwestor/użytkownik bloków energetycznych w Neurath wprowadził specjalne sposoby ratowania kotłów ze stali TP/24 (rys. 2), takie jak [9]:

- redukcja naprężeń przez obróbkę cieplną kotła po montażu w temp. 450+500°C przez 24+48 h. Podgrzewanie przeprowadzono z wykorzystaniem przenośnych palników olejowych umieszczonych na różnych poziomach w komorze spalania. Doszła do tego konwersja wylotowych gazów spalinowych i przepływ ciepłego powietrza w całej części ciśnieniowej, tak aby wyrównać rozszerzalność cieplną między powierzchnią grzewczą a rurociągami łączącymi;
- optymalizacja trawienia. Aby zredukować wpływ trawienia na powstawanie defektów, obszary wykonane ze stali T24 nie zostały wytrawione (ok. 25% całej powierzchni grzewczej);
- optymalizacja składu chemicznego wody w procesie uruchamiania. W tym celu ustalono wyższy wskaźnik pH, a zawartość O₂ w wodzie zasilającej obniżono do 20 ppm. System przygotowania wody zasilającej został wyposażony w zewnętrzny przenośny system uzdatniania w celu zapewnienia wystarczającej ilości wody z bardzo niską zawartością tlenu;
- optymalizacja procedury uruchamiania kotła, polegająca na stopniowym wzroście i utrzymaniu temperatury układu do momentu, kiedy temperatura pary na wylocie parownika nie wzrosła powyżej 300°C. Rozruch kotła wspomagany był przy użyciu dodatkowego generatora pary, który stabilizował i utrzymywał odpowiednią temperaturę, układu zwłaszcza w czasie przerw w pracy palników.



Rys. 2. Sposoby ratowania przez RWE nowych kotłów ze stali T/P24 (dwóch bloków po 1100 MW w Neurath)

Fig. 2. Methods of RWE for regeneration new boilers of T/P24 (two blocks of 1100 MW in Neurath)



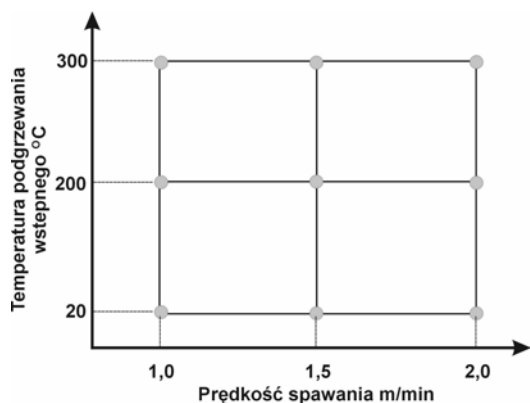
Rys. 3. Zalecenia RWE dla przyszłych projektów z zastosowaniem stali T/P24 [9]

Fig. 3. Recommendations of RWE for further Project with the use of T/P24 steel [9]

Doświadczenia zdobyte podczas uruchamiania 2 bloków w elektrowni Neurath umożliwiły opracowanie wytycznych dotyczących zarówno produkcji, jak i montażu oraz rozruchu kotłów ze stali TP24 (rys. 3).

Próby spawania hybrydowego

Próby technologiczne spawania hybrydowego wykonano zgodnie z planem eksperymentu (rys. 4) zakładającym wykonanie 9 wariantów spawania tj. 3 kombinacji prędkości spawania i 3 różnych warunków podgrzewania wstępnego. W planie założono wykonanie prób spawania elementów paneli ścian szczelnych o długości 8 m (rura-płaskownik-rura-płaskownik-rura) bez podgrzewania wstępnego (20°C) i z podgrzewaniem wstępnym 200°C i 300°C. Do prób wykorzystano rury o średnicy 51 mm i grubości ścianki 6,5 mm oraz płaskownik o szerokości 30 mm i grubości 6 mm. Jako materiał dodatkowy zastosowano drut elektrodowy Union I P24 o średnicy 0,8 mm i gaz osłonowy M21 (82% Ar i 18% CO₂). Próby wykonano przy użyciu lasera dyskowego Trudisc 1203 o mocy 12 kW i urządzenia spawalniczego Phoenix 451.



Rys. 4. Plan spawania hybrydowego ścian szczelnych z T/P24

Fig. 4. Welding plan for hybrid welding of membrane walls of T/P 24 steel

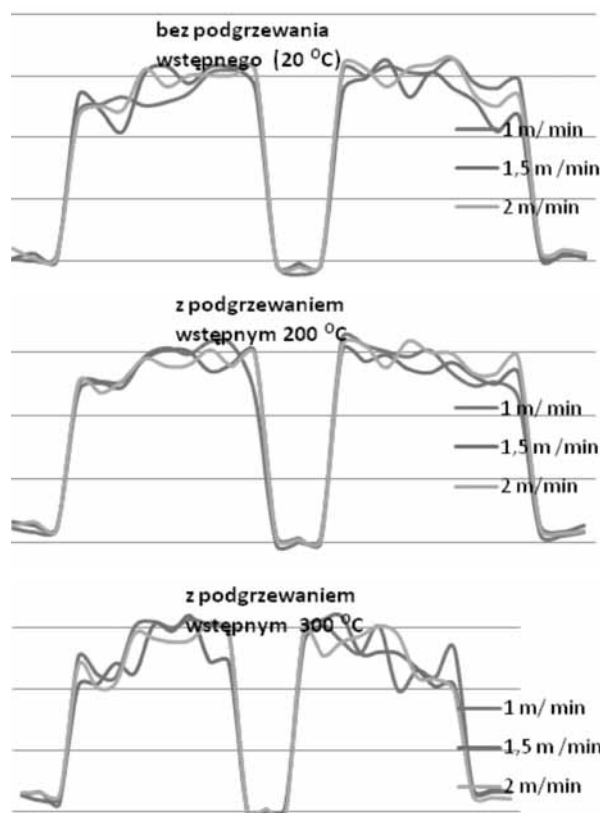
Próby wykonano przy prędkościach spawania: 1,0; 1,5 i 2,0 m/min. Proces podgrzewania wstępnego zrealizowano przy współpracy z firmą LMS z wykorzystaniem elementów grzejnych umieszczonych we wszystkich spawanych rurach i na całej ich długości (rys. 5).

Elementy grzejne zostały umieszczone wewnątrz spawanych rur przed rozpoczęciem procesu spawania i pozostały w nich w czasie oraz po zakończeniu procesu spawania. Temperatura podgrzewania wstępnego była monitorowana przy użyciu termopar i termometru stykowego. Po wykonaniu spawania złącza spawane poddano badaniom wizualnym (VT) wg PN-EN 13018:2004P, magnetyczno-proszkowemu MT wg PN-EN ISO 17638:2010 oraz badaniom makroskopowym i pomiarom twardości HV10 (rys. 6).



Rys. 5. Sposób podgrzewania wstępnego w trakcie prób spawania wraz z systemem kontroli pomiaru temperatury

Fig. 5. Method of preheating during welding (a) and temperature control system (b)



Rys. 6. Wyniki pomiaru twardości złączy spawanych metodą hybrydową (laser + 135) ze stali T/P24 dla różnych kombinacji prędkości spawania i temperatury podgrzewania wstępnego zgodnie z planem eksperymentu

Fig. 6. Hardness distribution in hybrid (laser + 135) welded joints for various welding speed and preheating temperature acc. to research schedule

Podczas badań VT i MT 9 połączeń wykonanych w różnych kombinacjach prędkości spawania i podgrzewania wstępnego nie stwierdzono niezgodności spawalniczych poniżej poziomu jakości B wg PN-EN ISO 5817.

Pomiary twardości wykazały, że średnia twardość płaskownika wynosi 204 HV10, a rury 217 HV10.

W złączach wykonanych bez podgrzewania wstępnego twardość HV10 przy różnych prędkościach spawania wynosiła:

- 1 m/min – w strefie wpływu ciepła (HAZ) w granicach 321÷356 HV, a w spoinie 321÷358 HV;
- 1,5 m/min – HAZ 305÷363 HV, spoina 333÷358 HV;
- 2 m/min – HAZ 325÷359 HV, spoina 341÷364 HV.

Twardość HV10 przy podgrzewaniu wstępnym do ok. 200°C wynosiła dla różnych prędkości spawania:

- 1 m/min – HAZ 319÷361 HV, spoina 333÷353 HV;
- 1,5 m/min – HAZ 335÷352 HV, spoina 337÷352 HV;
- 2 m/min – HAZ 318÷356 HV, spoina 339÷359 HV.

Twardość złączy wykonanych z podgrzewaniem wstępnym do ok. 300°C i spawanych z prędkością 1,0; 1,5 i 2 m/min wynosiła odpowiednio:

- 1 m/min – HAZ 309÷352 HV, spoina 329÷355 HV;
- 1,5 m/min – HAZ 295÷359 HV, spoina 313÷352 HV;
- 2 m/min – HAZ 302÷352 HV, spoina 301÷354 HV.

Po zakończeniu prób spawania elementów paneli ścian szczelnych oraz pozytywnych badaniach VT, MT wykonano panel testowy 7-rurowy długości 14 m. Przed spawaniem zastosowano podgrzewanie wstępne do 100°C, które prowadzono w taki sam sposób jak w trakcie prób technologicznych. Panel poddano badaniom VT i MT. Po upływie 2 miesięcy na panelu testowym ponownie wykonano badania VT i MT oraz badania makro- i mikroskopowe, a także pomiar twardości (tabl. II). Ponadto na panelu zostało wykonane gięcie o 90° na promieniu 250 mm (rys. 7). Miejsce gięcia od strony zewnętrznej (rozciąganej) i wewnętrznej (ściskanej) oraz obszary przyległe poddano badaniom VT i MT.

Tablica II. Wyniki pomiaru twardości HV10 panelu testowego
Table II. Hardness HV10 measurements results

Miejsce badania	Wartość twardości HV10			Średnia
	1	2	3	
MR płaskownik	214	209	208	210
MR rura	217	213	222	217
HAZ płaskownik góra	374	363	362	366
HAZ płaskownik dół	272	296	316	295
Spoina góra	353	346	345	348
Spoina dół	326	325	330	327
HAZ rura góra	313	329	314	319
HAZ rura dół	315	282	291	296



Rys 7. Panel testowy 7-rurowy długości 14 m po gięciu 90° na promieniu 250 mm

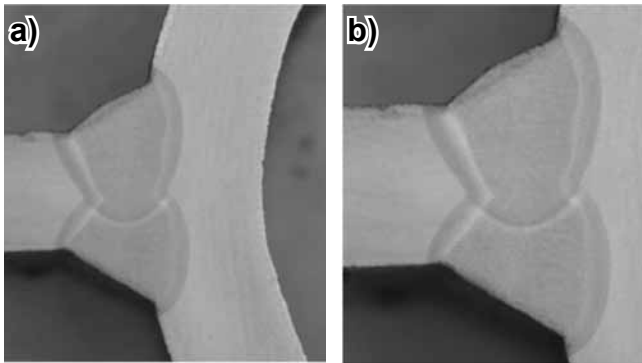
Fig. 7. Testing - 14 m long membrane wall after bending to angle of 90° with radial of 250 mm

Po wykonaniu badań VT i MT na wszystkich etapach nie stwierdzono pęknięć i innych niezgodności spawalniczych wg PN-EN ISO 5817.

Pomiary twardości wykazały, że średnia twardość płaskownika wynosi 210 HV10, rury 217 HV10, w strefie wpływu ciepła średnia twardość mieści się w zakresie 295÷376 HV10 a w spoinie wynosi 327÷348 HV10.

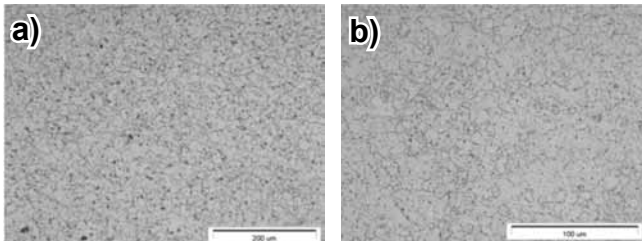
Metodyka badań metalograficznych

Badania metalograficzne złącza pochodzącego z panelu testowego przeprowadzono na powierzchni próbki wyciętej prostopadle do kierunku spawania, która była szlifowana na papierach ściernych i polerowana pastami diamentowymi. Tak przygotowany zgład był trawiony w 5% roztworze kwasu azotowego (nitalu). Do badań makrostruktury wykorzystano mikroskop metalograficzny stereoskopowy Olympus SZX9. Badania prowadzono w polu ciemnym przy powiększeniach do 50x. Badania mikrostruktury przy powiększeniach do 1000x przeprowadzono w polu jasnym na mikroskopie świetlnym Olympus GX71, natomiast do większych powiększeń wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Hitachi S 4200, który jest dodatkowo wyposażony w układ do mikroanalizy składu chemicznego EDS. Badania na mikroskopie skaningowym wykonano w technice rejestracji elektronów sprężystości rozproszonych (SE). Technika ta umożliwia analizę morfologii struktury. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 8÷13.



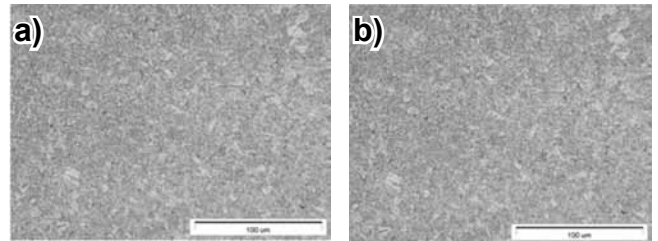
Rys. 8. Obraz makroskopowy złącza ze stali 7CrMoVtiB10-10: a) pow. 10x, b) pow. 20x, traw. nital 5%

Fig. 8. Macroscopic image of 7CrMoVtiB10-10 steel joint: a) magn. 10x, b) magn. 20x, etching: 5% nital



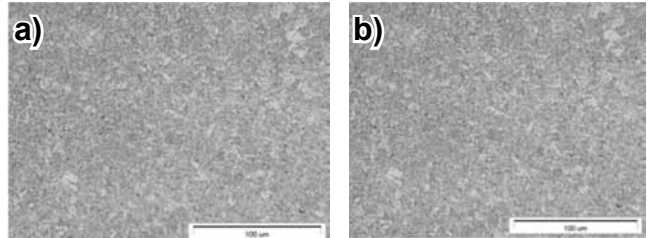
Rys. 9. Struktura ferrytyczno-bainityczna materiału rodzimego: a) płaskownika, b) rury. Mikroskop świetlny, pow. 500x, traw. nital 5%

Fig. 9. Ferritic-bainitic microstructure of base metal: a) plate, b) tube, light microscope, magn. 500x, etching: 5% nital



Rys. 10. Struktura bainityczno-martenzytyczna strefy wpływu ciepła: a) płaskownika, b) rury. Mikroskop świetlny, pow. 500x, traw. nital 5%

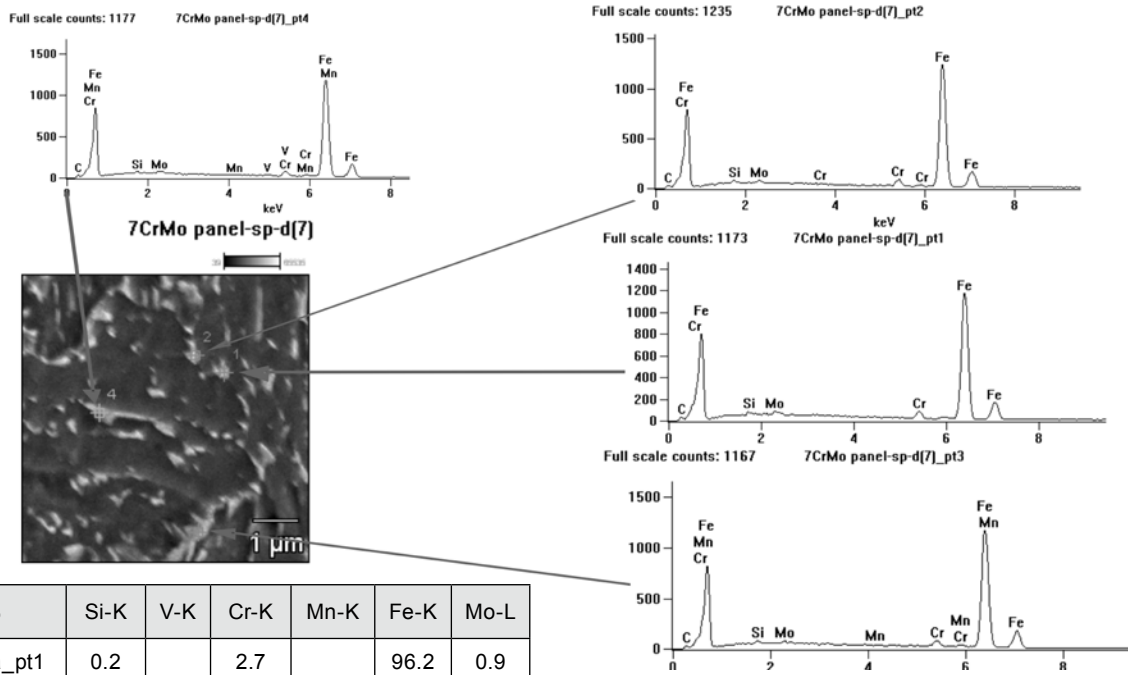
Fig. 10. Bainitic-martensitic microstructure of HAZ: a) plate, b) tube, light microscope, magn. 500x, etching: 5% nital



Rys. 11. Struktura martenzytyczno-bainityczna spoiny: a) górnej, b) dolnej. Mikroskop świetlny, pow. 500x, traw. nital 5%

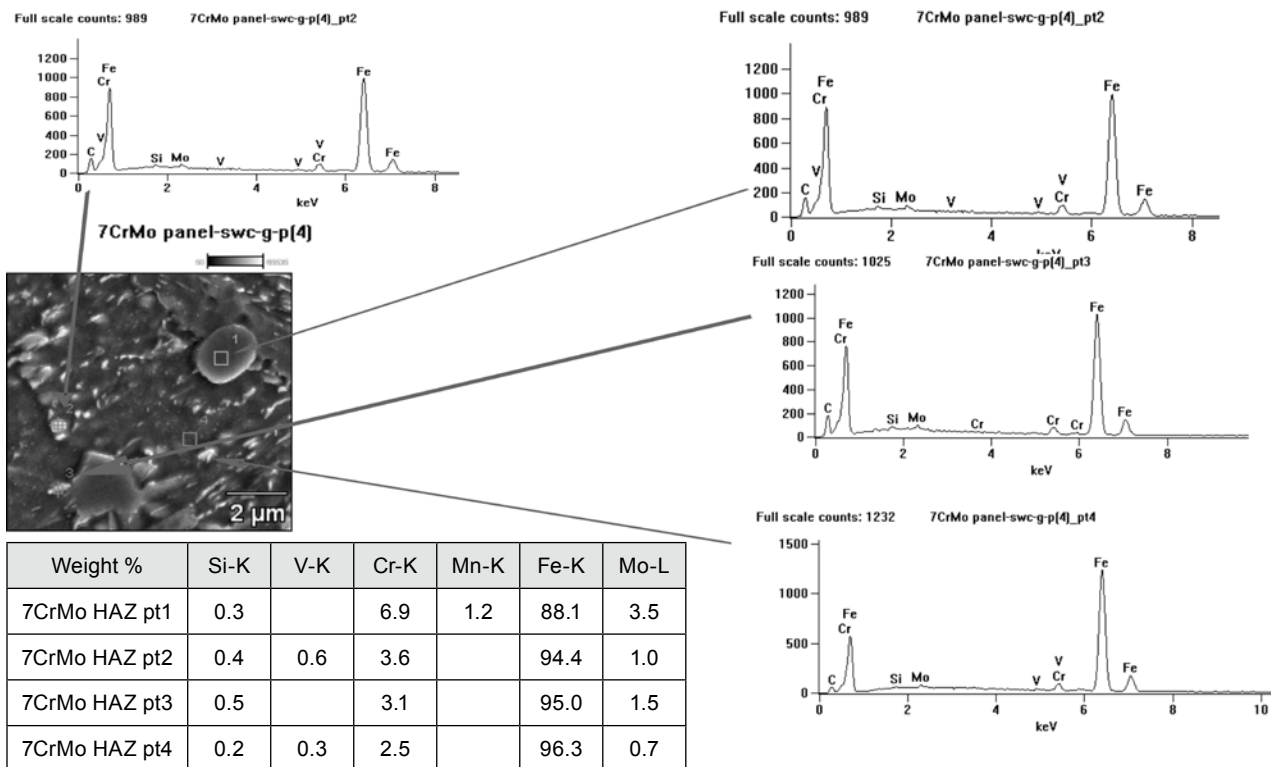
Fig. 11. Bainitic-martensitic microstructure of upper and lower weld, light microscope, magn. 500x, etching: 5% nital

W badanych złączach nie ujawniono pęknięć lub innych niezgodności spawalniczych. Struktura złącza jest zbudowana z typowych obszarów, tj. materiału rodzimego o budowie ferrytyczno-bainitycznej, strefy wpływu ciepła o strukturze bainityczno-martenzytycznej z wydzieleniami węglików oraz martenzytyczno-bainitycznego obszaru spoiny z wydzieleniami drobnych węglików.



Rys. 12. Wynik punktowej mikroanalizy składu chemicznego EDS z obszaru spoiny

Fig. 12. Results of EDS chemical composition analysis in weld



Rys. 13. Wynik punktowej mikroanalizy składu chemicznego EDS z obszaru HAZ

Fig. 13. Results of EDS chemical composition analysis in HAZ

Podsumowanie

Przeprowadzone z powodzeniem próby spawania hybrydowego (laser + MAG) potwierdziły możliwość wykorzystania tej technologii do wytwarzania bez pęknięć paneli ścian szczelnych ze stali T/P24. Na podstawie pomiarów twardości elementów paneli ścian szczelnych stwierdzono znikomy wpływ zarówno podgrzewania wstępnego w zakresie $20\div 300^{\circ}\text{C}$, jak i prędkości spawania od 1 m/min do 2 m/min na twardość połączeń spawanych tą metodą. Dlatego też wykonany panel testowy długości 14 m został przed spawaniem podgrzany wstępnie jedynie do 100°C w celu pozbycia się wilgoci. Brak pęknięć na panelu testowym po spawaniu hybrydowym i po jego gięciu

o kąt 90° na promieniu 250 mm wynika przede wszystkim ze specyfiki spawania hybrydowego i związane jest to ze znacznie mniejszymi naprężeniami powstającymi w czasie procesu spawania w porównaniu do spawania łukiem krytym. Zastosowany proces podgrzewania wstępnego zapewnia równomierne podgrzewanie rur na całym obwodzie i długości, nie wprowadzając dodatkowych naprężeń, jak ma to miejsce w podczas podgrzewania wstępnego z zastosowaniem palników płomieniowych grzebieniowych. Przeprowadzone próby spawania i wykonane badania umożliwiły opracowanie technologii spawania i uzyskanie kwalifikowanej technologii WPQR spawania ścian szczelnych kotłów przemysłowych ze stali 7CrMoVTiB 10-10 w Energoinstalu SA.

Literatura

- [1] Brózda J.: Stale energetyczne nowej generacji stosowane na urządzenia energetyki o parametrach nadkrytycznych i ich spawanie. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 5/2006.
- [2] Brózda J.: Stale żarowytrzymałe nowej generacji, ich spawalność i właściwości złączy spawanych, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 1/2004.
- [3] Arndt J. i in: The T23 / T24 Book – New Grades for Waterwalls and Superheaters Vallourec & Mannesmann Tubes, 1998.
- [4] Heuser H.: Filler metals for welding of T/P23 and T/P24. Konferencja Naukowo-Techniczna, Rudy Raciborskie 2009.
- [5] VdTUV Werkstoffblatt, WB 533, 06.2008, Warmfester Stahl 7CrMoVTiB10-10, Werkstoff- Nr. 1.7378.
- [6] Gawrysiuk W., Więcek M., Adamiec J.: Spawanie ścian szczelnych ze stali w gatunku T/P24 (7CrMoVTiB10-10). Fakty i mity. Materiały z XVII Międzynarodowej Konferencji „Spawanie w energetyce”, Turawa 2010.
- [7] Zeman M., Łomozik M., Brózda J.: Problemy spawania stali T24 przeznaczonej na ściany szczelne kotłów energetycznych. II Konferencja spawalnicza „Powerwelding 2011”.
- [8] Dobrzański J., Zieliński A., Pasternak J., Hernas A.: Doświadczenia z zastosowania nowych stali do wytwarzania elementów kotłów na parametry nadkrytyczne. Prace IMŻ 1, 2010.
- [9] Nowack R., Goette C., Heckmann S.: Quality management AT RWE Rusing T24 boiler material as an example. VGB PowerTech 11/2011.