

Technologia spawania w warunkach montażowych rurociągów ze stali L415MB metodą kombinowaną 141

Technology of welding under installation conditions of L415MB steel pipelines by combined process

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań własności i struktury połączeń rurowych wykonanych metodą kombinowaną GTAW i FCA, w warunkach montażowych. Pozytywne wyniki badań pozwoliły opracować instrukcję WPS. Technologia spawania wg tej instrukcji została wielokrotnie sprawdzona w warunkach budowy rurociągów gazowych. Otrzymane złącza spełniały kryteria akceptacji i miały wszystkie wymagane własności.

ABSTRACT

The research results of properties and structure of pipe connections under the conditions during installation carried out by GTAW and FCA combined processes were presented in the paper. Positive research results made it possible to draw up the WPS specification. The technology of welding applied according to this specification was repeatedly checked under installation conditions of gas pipelines. The resulted joints satisfied the criteria for acceptance, and they were characterised by all required properties.

Wstęp

Rosnące zużycie energii i wzrost zapotrzebowania na nośniki energii, a zwłaszcza na gaz ziemny, decyduje o rozwoju sieci rurociągów przemysłowych. Znaczne odległości dzielące źródła gazu ziemnego i ropy od miejsca ich zużycia, wymagają budowy tranzytowych rurociągów o bardzo dobrych parametrach eksploatacyjnych. O jakości sieci gazowej decyduje rodzaj materiałów przeznaczonych do jej budowy, a także zastosowana technologia spawania. Poprawność opracowanej technologii spawania musi zostać poddana procesowi uznania (wg norm grupy EN 288) lub kwalifikowania (wg norm grupy EN 15600). Pozytywny wynik wszystkich badań złącza próbnego wykonanego według wymogów tych norm pozwala opracować roboczą instrukcję technologiczną spawania WPS.

Celem opracowania było sprawdzenie możliwości uzyskania złącza spawanego o wysokich właściwościach wytrzymałościowych i plastycznych przy użyciu metod spawania, które dotychczas nie znalazły większego zastosowania przy spawaniu w warunkach budowy.

Założenia do opracowania technologii spawania

Opracowanie technologii spawania przeprowadzono w firmie Stalbud Tarnów Sp. z o.o., która - oprócz wykonywania budowlanych konstrukcji stalowych specjalizuje się w wytwarzaniu, montażu i naprawach urządzeń technicznych dla przemysłu chemicznego, wydobywczego i gazowniczego. Wykonawstwo prac spawalniczych na stacjach gazowych i tłoczniach wymaga dobrej organizacji, umiejętności i fachowości zarówno brygad bezpośrednio wykonujących zadanie, jak i nadzoru. Prawdziwym jednak wyzwaniem dla wykonującego prace spawalnicze jest połączenie tych obiektów rurociągami. Podczas budowy gazociągu wykonawca musi być przygotowany

na to, że warunki atmosferyczne i przeszkody terenowe będą miały wpływ na powstawanie błędów wykonawczych, a te z kolei mogą spowodować opóźnienie w wykonaniu prac.

Innym bardzo istotnym powodem utrudniającym prowadzenie prac, zwłaszcza remontowych, jest trudność usunięcia z gazociągu substancji palnych, co powoduje możliwość pojawienia się ognia bezpośrednio pod łukiem elektrycznym w czasie prac spawalniczych. Dlatego bardzo istotne jest wykonanie złączy spawanych przy użyciu metoda gwarantująca czystość metalurgiczną złącza, a więc dobrą jakość i niezawodność oraz krótki czas wykonania. Pierwsze próby spawania gazociągów metodą kombinowaną 141/136 przeprowadzono w roku 2004 w czasie remontu gazociągów DN 300, 400, 500 na Tłoczni Gazu Rembelszczyzna. Instrukcje technologiczne spawania WPS, dotyczące tego remontu, były opracowane na podstawie dwóch oddzielnych protokołów WPAR dla poszczególnych metod spawania 141 i 136. Kolejne próby wykorzystania metody kombinowanej potwierdziły jej przydatność w warunkach budowy, jednak wymagała ona formalnego opracowania i zbadania. Uznanie zostało przeprowadzone w roku 2006, zgodnie z wymaganiami określonymi w normach PN-EN 15614-1 oraz PN-EN 288-9 i obejmowało badanie spoiny wykonanej w warunkach budowy oraz naprawy spoiny przy pełnym przetopie i naprawy wewnętrznej.

Dobór metod i materiałów dodatkowych

Najpopularniejszą metodą spawania podczas budowy rurociągów w terenie jest spawanie elektrodami otulonymi. Do spawania rurociągów o mniejszych średnicach stosuje się zazwyczaj elektrody w otulinie zasadowej lub rutyłowej. Wielkośrednicowe rurociągi dalekiego zasięgu spawa się przede wszystkim elektrodami o otulinie celulozowej, ze względu na możliwość skrócenia czasu operacji spawania, dzięki możliwości spawania „z góry na dół”. Spawanie elektrodą otuloną, zwłaszcza w pozycji przymusowej, wymaga od spawacza dużych umiejętności i odpowiedniej praktyki zawodowej, a w proces wykonania musi się wliczyć, oprócz spawania operacje

usuwania żuźli spawalniczych i czyszczenie złącza przed położeniem kolejnego ściegu, co znacznie wydłuża proces. Technika spawania elektrodą celulozową również nie należy do najprostszych, zwłaszcza, jeżeli chodzi o wykonanie przetopu i warstwy gorącej, która musi być położona w bardzo krótkim czasie po położeniu pierwszego ściegu. Skrócenie czasu spawania ze względu na kierunek spawania nie jest jednak w stanie zrekomensować czasu potrzebnego do wyszkolenia i nabycia odpowiedniej praktyki podczas spawania tą metodą. Wymienione aspekty spowodowały, że przystępując do opracowania technologii spawania rurociągów, przydatnej w warunkach budowy, należało dobrać takie metody spawania, aby uzyskać odpowiednio dobre złącze w możliwie krótkim czasie, wykonane przez spawacza o relatywnie krótkiej praktyce spawalniczej. Kolejnym krokiem były przeprowadzone praktyczne próby, mające na celu dobór odpowiednich materiałów dodatkowych do spawania. Materiały te musiały spełniać wymagania wytrzymałościowe określone w normach przedmiotowych i nie mogły stwarzać dodatkowych trudności podczas wykonywania złączy spawanych w pozycjach przymusowych.

Dobór materiału podstawowego na złącze próbne

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 lipca 2001 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe (D.U. Nr 97 z 11 września 2001 r., poz.1055) w § 11 mówi: Gazociąg stalowy powinien być wykonany z rur stalowych dla mediów palnych, zgodnie z wymaganiami określonymi w Polskich Normach. Rury stalowe do budowy gazociągu powinny charakteryzować się wymaganymi wartościami udarność, określonymi w odrębnych przepisach, i potwierdzonymi badaniami w przewidzianych temperaturach roboczych. Normą spełniającą te wymagania jest norma EN 10208-2+AC:1996, która w roku 1999 uzyskała status Polskiej Normy.

Normy europejskie EN 10208 dzielą rury na dwie klasy: A i B. Podział ten zależy od składu chemicznego i własności wytrzymałościowych materiału rury. Rury wykonuje się z blach lub taśm ze stali niskostopowych (%): (C max: 0,16C; Si max: 0,55Si; Mn max: 1,9Mn) często z mikrododatkami Nb i Ti, które mogą być normalizowane w procesie obróbki cieplnej lub walcowania (oznaczone literą N), jak również obrabiane cieplno-plastycznie (termomechanicznie) w procesie walcowania (oznaczone literą M), a także ulepszone cieplnie (oznaczone literą Q).

Złącze próbne wykonano z rury o średnicy 406 x 12,0 w gatunku L415MB o równoważniku węgla 0,38%.

Charakterystyka wybranych metod: 141 (GTAW) i 136 (FCA)

W procesie spawania łukowego elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej GTAW połączenie spawane otrzymuje się przez stopienie materiału spawanego i materiału dodatkowego ciepłem łuku elektrycznego jarzącego się między nietopliwą elektrodą a spawanym przedmiotem w osłonie gazu obojętnego lub redukującego. Jest to najczystszy z wszystkich procesów spawania łukowego, porównywany z metalurgicznego punktu widzenia do mikroodlewnia łukowego w osłonach obojętnych.

Podstawowymi ograniczeniami procesu spawania metodą GTAW są mała wydajność spawania i znaczny wpływ zmian składu chemicznego spawanych materiałów, a zwłaszcza zawartości węgla i zanieczyszczeń na głębokość przetopienia oraz stosunkowo mała grubość złączy możliwych do spawania jednostronnego w jednym przejściu.

Należy jednak zastanowić się nad tym, czy rzeczywiście małą wydajność spawania należy zaliczyć do wad tej metody.

Jeziorko spawalnicze powstaje w wyniku nadtopienia brzegu metalu rodzimego oraz przejścia kropli ciekłego metalu z drutu elektrodowego. Wymiary jeziorka są ściśle związane z parametrami spawania, głównie mocą źródła ciepła i szybkością jego ruchu. Kształt jeziorka spawalniczego bardzo silnie zależy od szybkości spawania. Przy spawaniu z małymi prędkościami kształt jest eliptyczny, natomiast przy dużych prędkościach wyraźnie - wydłużony i ostro zakończony w osi spoiny.

Wiadomym jest, że struktura spoiny znacząco wpływa na jej właściwości mechaniczne, a szczególnie plastyczność. Powstanie drobnych ziaren w spoinie ma dwie zasadnicze korzyści: zmniejsza podatność spawanego metalu do pęknięcia na gorąco oraz zwiększa ciągliwość i udarność spoin, szczególnie w przypadku stali węglowych i stali nierdzewnych.

Polepszenie własności lanego metalu spoiny, otrzymane w rezultacie rozdrobnienia struktury, nie zawsze jest w stanie zapobiec pęknięciom wywołanym przez zwiększone naprężenia rozciągające, a szczególnie w tych przypadkach, kiedy spawany metal zawiera znaczne ilości domieszek sprzyjających segregacji. Dlatego podczas spawania stali węglowych, nisko i średniostopowych obniża się szybkość chłodzenia stosując wstępne podgrzewanie, zmniejszając wielkość naprężeń rozciągających. W takich przypadkach, kiedy rozdrobnienie struktury osiągnąć się bez podwyższania szybkości chłodzenia, mechaniczne własności spoin i ich odporność na powstawanie pęknięć znacznie wzrastają [1].

Dodatkowo, stosując spawanie prądem pulsacyjnym można w efektywny sposób regulować kształt i rozmiary jeziorka spawalniczego oraz szerokość SWC, a także wpłynąć na krystalizację stopiwa – spoina nie jest przegrzana, co w konsekwencji zwiększa prędkość krzepnięcia i powoduje rozdrobnienie ziarna.

Bilansując wydajność procesu spawania metodą GTAW, należy pamiętać również o tym, że czyszczenie ściegu po spawaniu przed położeniem kolejnego jest bardzo proste i nie wymaga szczególnych zabiegów zastosowania urządzeń mechanicznych.

Reasumując, można stwierdzić, że dzięki odpowiedniej wiedzy spawalniczej można wykorzystać pewne zjawiska występujące w spoinie podczas i zaraz po spawaniu, a wówczas efekty powszechnie uważane za ograniczenia stają się naszymi sprzymierzeńcami w osiągnięciu dobrych własności spawanego ściegu i ostatecznie bilansują się po stronie korzyści.

Spawanie łukowe metodą 136, drutem z rdzeniem proszkowym topnikowym lub metalicznym w osłonie gazowej, zwane potocznie spawaniem drutem proszkowym w osłonie gazowej FCA (Flux Cored Arc), polega na stopieniu brzegów łączonych przedmiotów i drutu proszkowego ciepłem łuku spawalniczego jarzącego się w osłonie gazowej między metalową osłoną rurkową ciągłego drutu elektrodowego mieszczącą rdzeń proszkowy a spawanym przedmiotem.

Jako gaz ochronny stosuje się prawie wyłącznie gazy aktywne chemicznie: czysty CO₂ lub mieszanki Ar + CO₂ i Ar + O₂.

Rdzeń topnikowy drutów proszkowych spełnia rolę podobną do otuliny elektrod otulonych i topnika do spawania łukiem krytym, a także tworzy warstwę żuźla, która szybko krzepnąc kształtuje i doskonale podpira w pozycjach przymusowych jeziorko spoiny, nawet o dużej objętości. Dodatkowo uzyskuje się wydajność spawania, dzięki ciągłemu podawaniu drutu elektrodowego. Szerokość i głębokość przetopienia zależny od rodzaju i średnicy drutu oraz parametrów prądowych procesu. Szerszy łuk spawalniczy drutu proszkowego zapewnia większą tolerancję dokładności prowadzenia palnika wzdłuż linii spawania i mniejsze zagrożenie wystąpienia przyklejeń w złączu w stosunku do spawania GMAW drutem pełnym. Łuk spawalniczy podczas spawania drutami proszkowymi w osłonie gazowej jest widzialny i bardzo elastyczny.

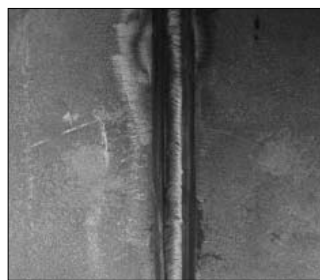
Druty proszkowe podczas spawania charakteryzują się lepszymi

własnościami, zwłaszcza mniejszym rozpryskiem, niż druty pełne. Własności stopiwa wykonanego drutami proszkowymi mogą być, w zależności od rodzaju drutów, tak dobre jak własności stopiwa wykonanego elektrodami otulonymi. Dotyczy to zwłaszcza udarności stopiwa w normalnej i ujemnej temperaturze. Druty proszkowe stapiane w osłonach pozwalają na spawanie na otwartym powietrzu, podczas gdy drutami pełnymi i samoosłonowymi nie zawsze można spawać na otwartym powietrzu, zwłaszcza w warunkach wietrznej pogody [2].

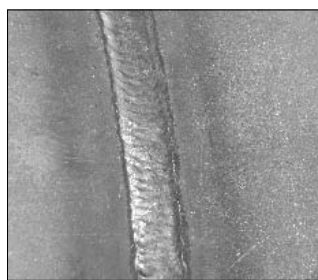
Reasumując: zastosowanie do spawania drutu proszkowego osłonowego przynosi bardzo wiele korzyści: daje możliwość regulacji składu chemicznego stopiwa, szerokości ściegu oraz głębokości wtopienia poprzez dobór odpowiednich ilości składników mieszaniny gazów osłonowych. Uzyskana spoina ma odpowiednio wysokie własności wytrzymałościowe i plastyczne. Jednak główną zaletą zastosowania tej metody spawania jest duża prędkość spawania, czyli skrócenie czasu wykonywania złącza spawanego.

Wykonanie złącza próbnego

Spawanie złącza próbnego przeprowadzono na podstawie wstępnej instrukcji spawania pWPS. Wykonano je w warunkach montażowych w wykopie. Warstwa przetopowa i ścieg nr 2 został wykonany metodą 141, dwa ściegi wypełniające i lico – metodą 136. Do centrowania złącza użyto centrownika zewnętrznego, który został ściągnięty po wykonaniu spoin szczepnych. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wygląd spoiny po spawaniu. Można zaobserwować praktycznie całkowity brak odprysków i podtopień.



Rys. 1. Wygląd spoiny po zakończeniu spawania metodą 141



Rys. 2. Wygląd lica spoiny po spawaniu metodą 136

Całkowity czas wykonania złącza próbnego w wykopie wyniósł 80 min., a czas wykonania poszczególnych ściegów był następujący:

- warstwa graniowa wraz z wycinaniem spoin szczepnych, (metoda 141) – 30 min;
- warstwa druga (metoda 141) – 15 min;
- ścieg nr 3 (metoda 136) – 10 min;
- ścieg nr 4 (metoda 136) – 13 min;
- wykonanie lica (metoda 136) – 12 min.

Dla porównania wykonanie takiego samego złącza z rury o średnicy 406,4 x 12 mm elektrodami otulonymi wg Katalogu Nakładów Rzeczowych trwa 5,58 roboczogodziny.

Po wykonaniu spoiny przystąpiono do wykonania napraw przy pełnym przetopie oraz naprawy wewnętrznej w miejscach określonych w normie EN 288-9. Po zakończeniu spawania, złącze próbne poddano badaniom określonym w normach EN 288-9 i EN 15614-1, dodatkowo wykonano badania mikroskopowe w celu oceny otrzymanej struktury złącza.

Analiza wyników badań

Warunkiem wystawienia przez jednostkę inspekcyjną protokołów uznania oraz kwalifikowania technologii spawania (WPAR, WPQR) jest uzyskanie pozytywnych wyników wszystkich nakazanych w odpowiednim arkuszu normy badań. Poniżej przedstawiono analizę

Tablica I. Analiza wyników badań wizualnych, penetracyjnych i radiograficznych

Rodzaj badania	Wymagany poziom	Stwierdzona niezgodność / poziom jakości	Ocena	Uwagi
Badania wizualne	B	515 – wklęsnięcie w grani – B 5041 – miejscowy wyciek – B	pozytywna	1
Badania penetracyjne	1(2x)	nie stwierdzono	pozytywna	2
Badania radiograficzne	B	2011 – pęcherz kulisty – B 515 – wklęsnięcie w grani – B 3041 – wtrącenie wolframu – B 5041 – miejscowy wyciek – B	pozytywna	3

Uwagi: 1: ocena spoiny wg normy PN-EN ISO 15614-1 p. 7.5 oraz PN-EN 288-9 p. 7.3.2 tabl. II;

2: wg normy PN-EN 12062 zał. A tabl. A2 poziom akceptacji 1 wg PN-EN 1289 odpowiada poziomowi jakości B wg PN-EN 25817 (EN ISO 5817);

3: wg normy PN-EN 12062 zał. A tabl. A5 poziom akceptacji 1 wg PN-EN 12517 odpowiada poziomowi jakości B wg PN-EN 25817 (EN ISO 5817), stwierdzone niezgodności spełniają kryteria akceptacji PN-EN 288-9 p. 7.3.2 tabl. II.

Tablica II. Analiza wyników próby rozciągania

Rodzaj badania	Wymagany poziom R_m min [N/mm ²]	Uzyskany wynik R_m [N/mm ²]	Miejsce zerwania	Ocena	Uwagi
Rozciąganie	520	643	poza spoiną	pozytywna	-
Rozciąganie	520	626	poza spoiną	pozytywna	-

Tablica III. Analiza wyników próby zginania

Rodzaj badania	Powierzchnia rozciągania	Kąt zginania	Ocena powierzchni	Ocena	Uwagi
Zginanie	2 próbki - lico	180°	bez wad	pozytywna	-
Zginanie	2 próbki - grań	180°	bez wad	pozytywna	-

Tablica IV. Analiza wyników badania twardości

Miejsce badania twardości HV 10	Maksymalny poziom wg PN EN 288-9 (środowisko kwaśne)	Maksymalny poziom wg PN EN ISO 15614-1 p.7.4.6 tabl.2	Najwyższy wynik w skali HV ²⁾	Miejsce występowania ³⁾	Ocena
Materiał rodzimy	275 ¹⁾	380	221	NW	pozytywna
SWC lico	300	380	233	SPP	pozytywna
SWC grań	250	380	240	SPP/NZ	pozytywna
Spoina lico	275	380	227	NZ	pozytywna
Spoina grań	250	380	250	NW	pozytywna

Uwagi: 1: ze względu na brak wymagań w normie przedmiotowej określono wg wymagań normy NACE MR 0175;

2: wpisane do tabeli najwyższe wyniki obejmują również spoiny naprawiane od wewnątrz oraz z pełnym przetopem;

3: NW– naprawa wewnętrzna; NZ– naprawa z pełnym przetopem; SPP– spoina wykonana „po raz pierwszy” (bez naprawy).

otrzymanych wyników, uwzględniając rodzaj badania oraz przyporządkowane im wymagania. Analizę przeprowadzono na podstawie sprawozdania z badań złącza próbnego.

Badania makroskopowe i mikroskopowe

Po wykonaniu badań własności mechanicznych przeprowadzono analizę wizualną próbek zginanych i udarnościowych. Próbki zginane miały kąt zgięcia 180°C i nie wykazywały żadnych naderwań. Próbki udarnościowe z SWC miały wysoki poziom udarności i przełom całkowicie plastyczny. Pozytywne wyniki miały również próbki udarnościowe z naciętym karbem w osi spoiny. Przełom tych próbek zawierał również pewien udział przełomu kruchego. Przykład wyglądu próbek zginanych i próbki udarnościowej z SWC pokazano na rysunkach 3 i 4.

Badania makroskopowe zglądów poprzecznych spoin nie wykazały żadnych wad. Na rysunku 5 przedstawiono wygląd spoiny bez naprawy, na rysunku 6 – makro spoiny z poprawką wykonaną od

Tablica V. Analiza wyników badania udarności

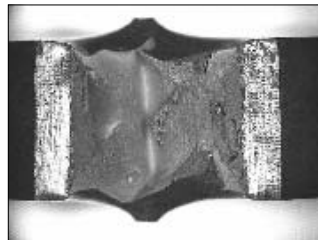
Miejsce nacięcia karbu V na próbce	Dopuszczalna min. wartość KV [J] wg wymogów UDT	Dopuszczalna min. wartość KV [J] wg wymogów Dyr.97/23/UE	Temperatura próby [°C]	Uzyskana wartość KV [J]	Ocena
Badanie wg wymagań PN-EN ISO 15614-1					
Spoina - VWT	27	27	-30	39, 39, 35	pozytywna
SWC - VHT	27		-30	184, 94, 84	pozytywna
Spoina - VWT	40		0	65, 84, 76	pozytywna
SWC - VHT	40		0	235, 196, 184	pozytywna
Badanie wg wymagań PN-EN 288-9					
Spoina - VWT	27	27	-30	39, 39, 35	pozytywna
SWC - VHT	27		-30	184, 94, 84	pozytywna
Spoina - VWT	40		0	65, 84, 76	pozytywna
SWC - VHT	40		0	235, 196, 184	pozytywna
Badanie wg wymagań PN-EN 288-9 – naprawa przy pełnym przetopie					
Spoina - VWT	40	27	0	98, 76, 91	pozytywna
SWC - VHT	40		0	137, 257, 204	pozytywna

strony wewnętrznej, natomiast na rysunku 7 – spoinę z poprawką wykonaną z pełnym przetopem.

Na rysunkach 6–13 przedstawiono mikrostrukturę różnych obszarów złącza spawanego. W strukturze spoiny (rys. 8) występuje ok. 80% ferrytu drobnopłytkowego i 20% ferrytu ziarnistego.

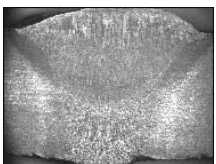


Rys. 3. Widok próbek po zginaniu od strony lica (FBB) i od strony grani (RBB)

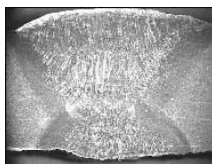


Rys. 4. Widok przelomu próbek z karbem w SWC (temp. -30°C)

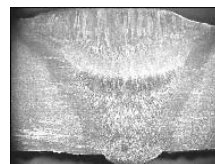
Taka struktura zapewnia duże własności plastyczne, co potwierdziły badania udarności. Struktura strefy wpływu ciepła (rys. 10–12) jest typowa dla stali L415MB.



Rys. 5. Widok zglądu spoiny z widoczną linią wtopienia, ściegami oraz SWC



Rys. 6. Widok zglądu spoiny naprawianej od wewnątrz



Rys. 7. Widok zglądu spoiny naprawianej przy pełnym przetopie

W SWC w pobliżu linii wtopienia występuje struktura Widmanstattena z drobnymi płytkami ferrytu (rys. 10). Obszar normalizowania (rys. 11) ma ziarno drobniejsze, niż materiał rodzimy poza SWC (rys. 13). Nagrzanie materiału do zakresu temperatur A_{c1} i A_{c3} powoduje powstanie obszaru niepełnej normalizacji. Na skutek nagrzania dochodzi do austenizacji perlitu obecnego w strukturze materiału rodzimego, nie wywołuje to jednak pełnej przemiany ferrytu, którego forma pozostaje identyczna jak w materiale rodzimym. Podczas chłodzenia austenit (powstały z perlitu) ulega przemianie na drobnoziarnistą mieszaninę fer-



Rys. 8. Mikrostruktura spoiny (środek spoiny)



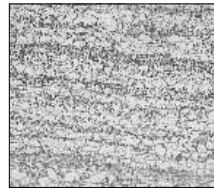
Rys. 9. Mikrostruktura spoiny (w pobliżu linii wtopienia)



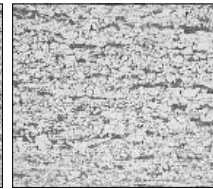
Rys. 10. Mikrostruktura gruboziarnistego obszaru SWC (ferryt Widmanstattena)



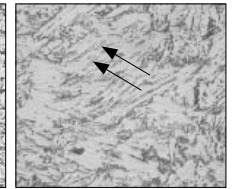
Rys. 11. Mikrostruktura SWC w obszarze normalizacji (drobne ziarna ferrytu i perlitu)



Rys. 12. Mikrostruktura SWC, obszar niepełnej normalizacji (niepełnego przekryształowania)



Rys. 13. Mikrostruktura materiału rodzimego stali L415MB. Widoczne różne wielkości ziaren ferrytu



Rys. 14. Mikrostruktura SWC, z widocznym polem wysp M-A (zaznaczonym strzałką)

rytu i perlitu, w wyniku czego w strukturze tego obszaru występuje ferryt o dwóch wyraźnie zróżnicowanych wielkościach ziarna (rys. 12).

Na rysunku 13 przedstawiono mikrostrukturę materiału rodzimego stali L415MB; widoczny jest perlit oraz nierównomierne i spłaszczone ziarna ferrytu, co jest dowodem prawidłowo przeprowadzonej obróbki cieplno-plastycznej w procesie wytwarzania stali.

Charakterystycznym składnikiem strukturalnym występującym w SWC jak również w spoinie, w stalach z mikrododatkami, w określonych warunkach chłodzenia są wyspy martenzytyczno-austenityczne M-A. Ich wygląd pokazano na rysunku 14. Mechanizm ich powstawania opisano w pracach [1–4]. Powstają one w stalach o granicy plastyczności powyżej 445 MPa, zawierających Nb, V i Mo. Granica plastyczności stali L415MB wg normy EN 10208 powinna się zawierać pomiędzy 415 a 565 MPa, a według atestu materiałowego R_p materiału podstawowego badanej rury wynosi 489–498 MPa. Stal ta ma również w swoim składzie wymienione wyżej składniki, czyli niob, wanad i molibden, które sprzyjają powstawaniu wysp M-A. Obecność wysp M-A obniża własności plastyczne (udarność). Jednak w tym przypadku, z uwagi na bardzo wąską strefę gruboziarnistą z wyspami M-A, ich obecność nie wpłynęła na istotne obniżenie udarności.

Podsumowanie

- Wszystkie przeprowadzone badania nieniszczące i niszczące złącza próbnego dały wyniki pozytywne. Otrzymanie takich wyników jest podstawą do wystawienia Protokołu Uznania Technologii Spawania WPAR wg EN 288-9 oraz Protokołu Kwalifikowania Technologii Spawania WPQR według EN 15614-1. Protokoły te stanowią podstawę do opracowywania Instrukcji Technologicznych Spawania WPS.
- Opracowana technologia spawania w warunkach montażowych rurociągów ze stali L415MB metodą łączoną 141/136 pozwoliła na wykorzystanie wszystkich zalet poszczególnych metod spawania. Otrzymano metalurgicznie czysty, łatwy do wykonania przetop oraz odpowiednio wytrzymałe wypełnienie i poprawne lico. Można zatem przyjąć, że spoiny wykonywane według tej technologii, (z zachowaniem wszystkich rygorów technologicznych określonych w instrukcji WPS), są odpowiednio wytrzymałe i zachowują dużą plastyczność nawet w obniżonej temperaturze, pomimo obecności w strukturze SWC wysp M-A.
- Uzyskano znaczne skrócenie czasu wykonywania złącza spawanego rury o średnicy 406x12 do 80 min. Taki czas wykonania złącza w warunkach montażowych, nie jest możliwy do osiągnięcia podczas spawaniu innymi metodami zapewniającymi małą zawartość wodoru.
- Stosowanie tej metody jest szczególnie przydatne do spawania większych średnic, ale sprawdza się praktycznie od średnic nominalnych powyżej 100 mm i grubości ścianki rury od 8 mm.

LITERATURA

- [1] **Tasak E.:** Metalurgia spawania, w druku Wydawnictwo AGH.
- [2] **Węgrzyn J.:** Fizyka i metalurgia spawania, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1990.
- [3] **Tasak E.:** Spawalność stali, Fobit Kraków 2002.
- [4] **Tasak E., Ziewiec A.:** Struktury złączy spawanych stali niskowęglowych i niskostopowych, Przegląd Spawalnictwa (w druku).