

BADANIA TECHNOLOGII SPAWANIA STALI 14MoV6-3 ZE STALĄ X10CrMoVNb9-1



**MGR INŻ. ROBERT
WERSTA**

Kierownik Działu Oceny
Zgodności
Urząd Dozoru Technicznego
O/Wrocław



**MGR INŻ. PAWEŁ
GRZEŚKOWIAK**

Główny Specjalista
ds. Badań Materiałowych
Dział Badań Laboratoryjnych
Urząd Dozoru Technicznego
O/Poznań



**MGR INŻ. ANDRZEJ
KLIMECKI**

Ekspert Urzędzeń
Ciśnieniowych
Dział Urzędzeń Ciśnieniowych
Urząd Dozoru Technicznego
O/Wrocław



**PROF. DR HAB. INŻ.
ANDRZEJ AMBROZIAK**

Zastępca Kierownika
Katedry Obróbki Plastycznej,
Spawalnictwa i Metrologii
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska

W artykule przedstawiono wyniki badań mechanicznych i badań struktury złącza spawanego stali 14MoV6-3 ze stalą X10CrMoVNb9-1. Przetop wykonano metodą 141 z zastosowaniem drutu DMV 83-IG, a wypełnienie metodą 111 elektrodą SL 22G. Przy doborze obróbki cieplnej uwzględniono wymagania norm stosowanych przy wytwarzaniu rurociągów, kotłów i zbiorników. Uzyskane wyniki badań nieniszczących i badania mechaniczne pokazały, że złącze spełnia wymagania normy stosowanej przy kwalifikowaniu technologii spawania PN-EN ISO 15614-1 [1].

Podczas remontów instalacji energetycznych, jak i wykonania nowych urządzeń coraz częściej zachodzi potrzeba wykonywania połączeń spawanych między stalami różniącymi się składem chemicznym i strukturą, dla których stosowane są różne parametry obróbki cieplnej. Materiały dodatkowe do spawania dobiera się zazwyczaj do stali o niższych własnościach wytrzymałościowych.

W takim przypadku obróbka cieplna wymaga kompromisu.

Dobrze to pokazuje połączenie stali 14MoV6-3 zakwalifikowanej do grupy 6.1 [1] ze stalą X10CrMoVNb9-1, należąca do grupy 6.4 [1].

• **Stal 14MoV6-3** po normalizowaniu i odpuszczaniu posiada strukturę ferrytyczno-perlityczną lub ferrytyczno-bainityczną. Stal ta należy do grupy stali chromowo-molibdenowo-wanadowych. Dobrą wytrzymałość na pełzanie zapewnia jej właściwa obróbka cieplna, w wyniku której powstają wysoko dyspersyjne wydzielenia węglików wanadu hamujące i opóźniające ruch dyslokacji w czasie pełzania. Po spawaniu pod wpływem obróbki cieplnej mogą w niektórych przypadkach powstawać pęknięcia wyżarzeniowe w SWC, dlatego zaleca się stosować dwustopniową obróbkę cieplną. Wyrzewanie pośrednie

w temperaturze 500°C przez 1 godzinę ma na celu relaksację naprężeń, a przejście z dużą prędkością grzania 400–480°C/h do właściwej temperatury wyżarzania 720°C ma zapobiegać pęknięciom [2]. Szczególnie dotyczy to spawania rur o grubości ścianki powyżej 40 mm.

• **Stal X10CrMoVNb9-1** (szerzej znana jako T/P91) zaliczana jest do grupy martenzytycznych z niewielką ilością ferrytu stopowego. Stosowana jest w stanie ulepszonym cieplnie przez hartowanie w powietrzu. Posiada strukturę martenzytu odpuszczonego z niewielką ilością ferrytu δ , poniżej 5%. Odporność na pełzanie, a także wysokie właściwości mechaniczne w temperaturze otoczenia uzyskiwane są między innymi umocnieniem wydzieleniowym azotkami i węglikoazotkami bogatymi w Nb i V o dużej dyspersji i równomiernie rozmieszczonymi w osnowie oraz węglnikami bogatymi w chrom typu $M_{23}C_6$ stabilizującymi podstrukturę. Po spawaniu tej stali zaleca się chłodzenie międzyoperacyjne do temperatury otoczenia, a następnie obróbkę cieplną w temperaturze 750°C przez 2 godziny w celu spowodowania przemiany martenzytycznej [2].

Już na wstępie widać, jak odmienne wymagania są stawiane tym materiałom w czasie obróbki cieplnej po spawaniu, co utrudnia w pewnym stopniu opracowywanie technologii spawania pWPS, którą należy zbadać zgodnie z wymaganiami zawartymi w PN-EN ISO 15614-1 [3] przed zastosowaniem do wytwarzania, modernizacji czy napraw urządzeń.

WYBRANE WYMAGANIA NIEKTÓRYCH SPECYFIKACJI TECHNICZNYCH

Niektóre zalecenia i wytyczne pomagające w opracowaniu technologii spawania i wyboru parametrów obróbki cieplnej są zawarte w normach wyrobu dla poszczególnych grup urządzeń, np.: rurociągi PN-EN 13480 [4], zbiorniki PN-EN 13445 [5], kotły PN - EN 12952 [6]. Z uwagi na przeznaczenie w zastosowaniu badanej technologii zaleca się kierować wytycznymi określonymi w specyfikacji dla danej grupy urządzeń.

W przypadku badanej technologii będzie to **PN-EN 13480** [4] arkusz 4, w której określone są wymagania dla obróbki cieplnej po spawaniu. Określana jest też szybkość nagrzewania i chłodzenia powyżej 300°C, która nie powinna przekraczać 5500/W °C/h, jednak nie więcej niż 300°C/h, gdzie W oznacza grubość podaną w mm. W tabeli 1 pokazano wymagania zawarte w PN-EN 13480-4 [4] dla badanej kombinacji grup materiałowych.

Tabela 1. Zalecenia dla obróbki cieplnej po spawaniu złącza spawanego stali X10CrMoVNb9-1 z 14MoV6-3

Kombinacja materiału		Zalecany materiał pomocniczy do spawania	Obróbka cieplna po spawaniu		
Grupa materiału	Grupa materiału		Grubość [mm]	Czas wytrzymania [min]	Temperatura [o C]
6.4 X10CrMoVNb9-1	6.1 14MoV6-3	Podobna jak dla grupy materiałowej 6.1	< 12 12- 60 >60	30 2,5w nim 60 90 + w	od 710 do 730

W – grubość spawanych elementów

Podobne wymagania stawiane są przez pozostałe specyfikacje branżowe, jednak występują tu pewne różnice. Na przykład w normie **PN-EN 12952-5** [6] temperatura wyżarzania dla kombinacji materiałów z szóstej grupy materiałowej to 740÷780°C, a w **PN-EN 13445-4** [5] zaleca się 730÷770°C.

Co do prędkości nagrzewania wymagania są identyczne w obu przypadkach:

- 220°C/h dla grubości części $e < 25$ mm,
- 5500/e °C/h dla grubości części z zakresu $25\text{mm} < e < 100$ mm,
- 55°C/h dla grubości części $e > 100$ mm.

Należy też zwrócić uwagę na mocne zawężenie parametrów technologicznych spawania stali do pracy w podwyższonych temperaturach, czyli temperatur podgrzewania wstępnego, monitorowania temperatury międzyścięgowej w czasie spawania i ilości wprowadzonego ciepła.

Ogólne postanowienia dotyczące **nagrzewania wstępnego** zawarte są w PN-EN 1011-1 [7], a pomiar nagrzewania i monitorowania temperatury międzyścięgowej określa norma PN-EN ISO 13916 [8].

ZASTOSOWANE MATERIAŁY, PARAMETRY SPAWANIA I OBRÓBKIE CIEPLNEJ

Przy opracowywaniu pWPS, na podstawie którego zostało wykonane złącze próbne, uwzględniono wytyczne z tabeli nr 1. Materiał dodatkowy zarówno do wykonania przetopu metodą 141, jak i wypełnienia metodą 111 został dobrany o składzie podobnym do materiału podstawowego w gatunku 14MoV6-3 (tabela 2). Parametry spawania tych materiałów przedstawiono w tabeli nr 3. Spawanie zostało wykonane w pozycji H-L045.

Materiał podstawowy przed spawaniem został podgrzany do temperatury 250°C, a temperatura międzyścięgowa utrzymywana była w zakresie 250÷300°C. Po spawaniu złącze zostało ostudzone do temperatury otoczenia z prędkością 100°C/h i wytrzymane przez 4 godziny w temperaturze 30°C. Następnie nagrzano złącze z prędkością 150°C/h do temperatury 730°C i wytrzymano przez 90 min. Po wyżarzaniu ostudzono próbkę z prędkością 100°C/h do temperatury otoczenia. Cały cykl cieplny spawania i obróbki cieplnej pokazano na rys. 1.

Tabela 2. Skład chemiczny materiałów dodatkowych zastosowanych do wykonania złącza

Gatunek materiału dodatkowego/stali	Zawartość pierwiastka, %										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al
WMoVSi: ISO 21952 DMV 83-IG *	0,09	0,91	0,58	0,009	0,004	0,45	0,24	0,86	0,348	-	-
E Z B 3 2 H5: ISO 3580-A SL 22 G* Ø2,5; Ø 3,2	0,07 0,06	0,78 0,74	0,57 0,58	0,016 0,014	0,004 0,007	0,59 0,49	-	0,47 0,46	0,24 0,27	-	-
14MoV6-3: PN-EN 10216 [9]	0,10÷0,15	0,40÷0,70	0,15÷0,35	max 0,025	max 0,010	0,30÷0,60	max 0,30	0,50÷0,70	0,22÷0,28	max 0,30	max 0,040
X10CrMoVNb9-1: PN-EN 10216 [9]	0,08÷0,12	0,30÷0,60	0,20÷0,50	max 0,020	max 0,005	8,0÷ 9,5	max 0,40	-	0,18÷0,25	max 0,30	max 0,02
Nb- 0,06÷0,10; Ti- max 0,01 N-0,03÷0,07											

*skład ze świadectwa jakości 3.1 wystawionego dla materiału dodatkowego

Poniżej zamieszczono wyniki analizy składu chemicznego spawanych materiałów. Analizę wykonano za pomocą iskrowego spektrometru emisyjnego. Wyniki zestawione w poniższych tabelach są średnią z trzech pomiarów.

Tabela 3. Skład chemiczny stali X10CrMoVNb9-1 (P91), [%] masy

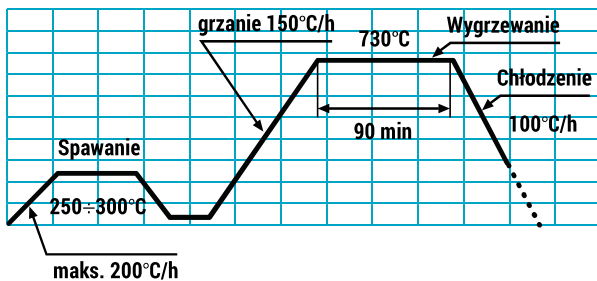
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	N
0,12	0,27	0,51	0,014	0,003	8,58	0,89	0,18	0,06	0,05

Tabela 4. Skład chemiczny stali 13MoV4-5, [%] masy

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Cu	Ni
0,14	0,22	0,61	0,008	0,014	0,52	0,56	0,24	0,13	0,09

Tabela 5. Parametry spawania złącza X10CrMoVNb9-1 z 14MoV6-3

Ścieg	Metoda spawania	Wymiar spoiwa [mm]	Natężenia [A]	Napięcie [V]	Rodzaj prądu/ biegunowość	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	141	Ø2,4	111	10	DC(-)	1,43
2-3	111	Ø2,5	80	21	DC(+)	0,54
4	111	Ø2,5	80	21	DC(+)	0,72
5-7	111	Ø3,2	118	23,5	DC(+)	1,1
8	111	Ø3,2	118	23,5	DC(+)	0,98
9-10	111	Ø3,2	118	23,5	DC(+)	1,25
11-12	111	Ø3,2	118	23,5	DC(+)	1,1
13	111	Ø3,2	118	23,5	DC(+)	1,04
14-16	111	Ø3,2	118	23,5	DC(+)	1,03



Rys. 1. Obróbka cieplna złącza X10CrMoVNb9-1 z 14MoV6-3

WYNIKI BADAŃ

Przed wykonaniem badań niszczących złącze zostało ocenione w zakresie badań nieniszczących z zastosowaniem następujących metod: badania wizualne VT, magnetyczno-proszkowe MT, radiograficzne RT. Nie stwierdzono niezgodności. Wszystkie badania nieniszczące dały wynik pozytywny.

Dla przybliżenia kryteriów i wymagań, jakie ma spełnić złącze, przedstawiono w tabeli 6 wybrane właściwości mechaniczne rur w gatunku 14MoV6-3 i X10CrMoVNb9-1.

Tabela 6. Wybrane wymagane właściwości mechaniczne badanych rur

Oznaczenie stali	Katalog własności	Re [MPa]	Rm [MPa]	KV – (T)* [J]	KV – (L)* [J]
X10CrMoVNb9-1	PN-EN 10216-2 [9]	450	630–830	27	40
14MoV6-3		320	460–610	27	40

* KV [J] w temperaturze 20°C, (T) – próbki poprzeczne, (L) – próbki wzdłużne
Dla złącza spawanego przyjęto minimalną wytrzymałość Rm = 460 MPa zgodnie z pkt 7.4.2 normy PN-EN ISO 15614-1 [2]. W tabeli 7 przedstawiono uzyskane wyniki. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 4136 [7].

Tabela 7. Wytrzymałość złącza spawanego Ø 273x20 14MoV6-3 z X10CrMoVNb9-1

Nr próbki	Wytrzymałość Rm [MPa]	Średnia Rm [MPa]	Miejsce zerwania	Ocena
1	564	557±14	Poza spoiną w materiale podstawowym 14MoV6-3	pozytywna
2	551			

Praca łamania złącza nie powinna być mniejsza od wartości, jakie gwarantują normy dotyczące materiału podstawowego. Dla spawanych próbek z rur badanie pracy łamania wykonuje się na próbkach pobranych z kierunku wzdłużnego (L), więc przyjęto jako kryterium min. KV – (L) ≥ 40 J w temperaturze + 20°C. Badania wykonane zostały zgodnie z PN-EN ISO 148-1 [9], a próbki do badań zostały przygotowane zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 6507-1 [8]. Uzyskane wyniki pracy łamania złącza przedstawiono na rys. 2.

Przeprowadzone pomiary wykazały, że praca łamania strefy wpływu ciepła (SWC) od strony stali 14MoV6-3 wynosiła 194 J, natomiast praca łamania SWC od strony stali X10CrMoVNb9-1 była równa 127 J.

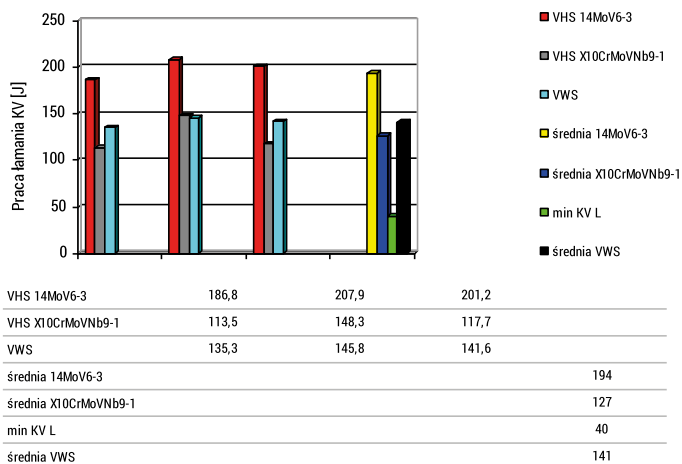
Energia łamania spoiny wynosiła >40 J. Wyniki pracy łamania (rys. 2) w złączu pokazują, że zostały prawidłowo dobrane parametry obróbki cieplnej złącza.

Potwierdzają to również wyniki badania twardości złącza (rys. 3). Twardość badanego złącza była poniżej kryterium akceptowalności wymaganej dla tej grupy materiałowej 350HV. Badania twardości wykonano zgodnie z PN-EN ISO 9015-1 [10] i PN-EN ISO 6507-1 [11].

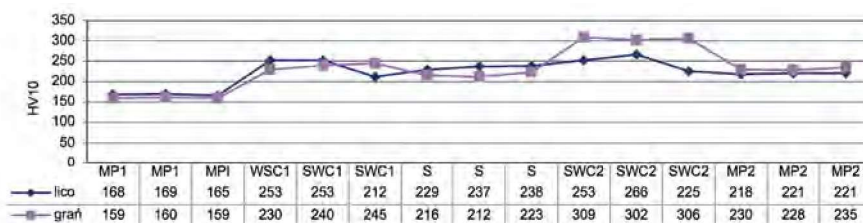
Próba zginania wykazała, że na wszystkich próbkach zgiętych do kąta 180° nie pojawiło się naderwanie większe niż 3 mm. Badanie wykonano na próbkach SBB zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5173 [13].

Wykonano badania metalograficzne makroskopowe (rys. 4), które nie wykazały niedopuszczalnych niezgodności spawalniczych.

W spawanych złączach mieszanych między stalami niskostopowymi a stalami wysokostopowymi zawierającymi 9÷12% Cr może wystąpić dyfuzja węgla podczas obróbki cieplnej, jak również ich pracy w podwyższonych temperaturach. Dyfuzja ta, zwana reaktywną, polega na przemieszczaniu się węgla z obszarów o mniejszej zawartości chromu do obszarów o większej zawartości tego pierwiastka, gdzie tworzy on węgliki [2]. Na podstawie obserwacji makroskopowych nie można tego stwierdzić, dlatego do programu badań wprowadzono badania mikroskopowe.



Rys. 2. Praca łamania złącza 14MoV6-3 z X10CrMoVNb9-1 w temperaturze 20°C



Rys. 3. Rozkład twardości na powierzchni zglądu poprzecznego złącza spawanego 14MoV6-3 - (MP1) z X10CrMoVNb9-1 - (MP2)

Badaniom mikroskopowym poddano wszystkie charakterystyczne obszary złącza na przekroju poprzecznym. Próbkę po wyszlifowaniu i wypolerowaniu po stronie X10CrMoVNb9-1 trawiono odczynnikiem Mi5Fe (Vilella) wg PN-61/H-04503, a po stronie 14MoV6-3 trawiono Mi1Fe (Nital 4%) wg PN-61/H-04503. Obserwacji powierzchni zglądów dokonano na mikroskopie świetlnym (LM) Olympus GX71 przy powiększeniach optycznych od 200x do 1000x oraz na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM), LEO 1450-05-19.



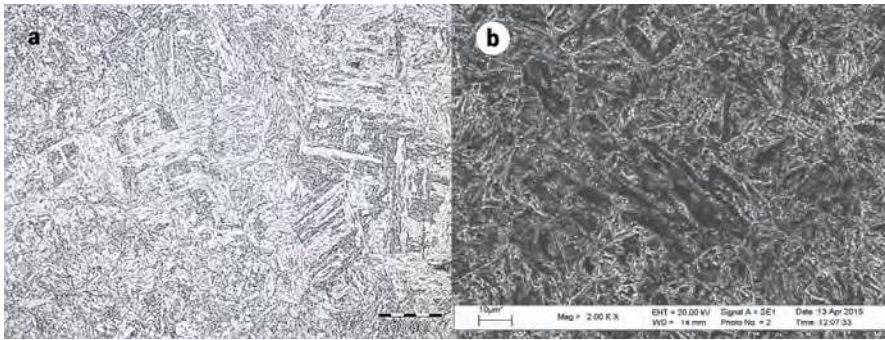
Rys. 4. Widok zglądu makro złącza spawanego stali X10CrMoVNb9-1 + 14MoV6-3

Stal P91 charakteryzowała się mikrostrukturą martenzytu odpuszczonego z wydzieleniami węglików (rys. 5). W stanie dostawy w stali P91 obserwuje się wydzielenia VX i NbX głównie wewnątrz ziaren oraz węgliki M23C6 po granicach listew, podziarn i na granicach ziaren byłego austenitu. W pobliżu linii wtopienia obserwowano mikrostrukturę martenzytu odpuszczonego z wyraźnie zaznaczonymi granicami ziaren byłego austenitu. Obszar ten ze względu na oddziaływanie temperatury cechował się dużym ziarnem. W tym obszarze obserwowano również liczne wydzielenia, z tym że względna ilość węglików po granicach ziaren byłego austenitu była większa w porównaniu do materiału rodzimego.

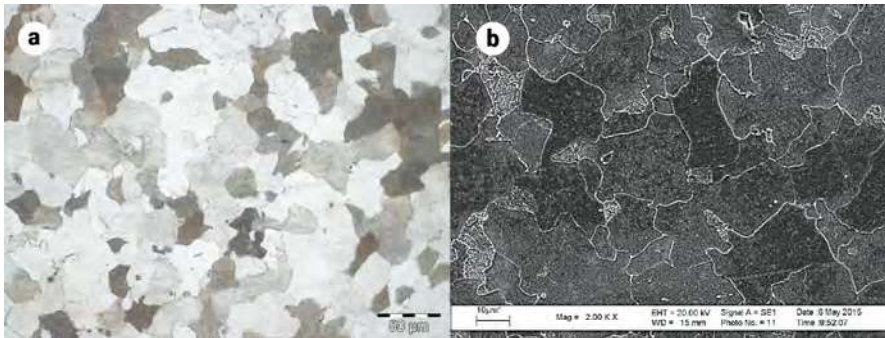
Stal 14MoV6-3 miała mikrostrukturę ferrytyczno-bainityczną (rys. 6). Dominującą fazą w strukturze był ferryt quasi-polygonalny. Wielkość ziarna ferrytu określono na 7/8. W mikrostrukturze obserwowano zaawansowany rozpad obszarów bainitycznych. Widoczna była sferoidyzacja węglików w bainicie. Miejscami o obecności bainitu w strukturze świadczyło charakterystyczne ułożenie węglików, po granicach ziaren ferrytu obserwowano pojedyncze wydzielenia. W pobliżu linii wtopienia zarówno od strony lica, jak i grani obserwowano gruboziarnistą mikrostrukturę bainityczno-ferrytyczną. W miarę oddalania się od linii wtopienia mikrostruktura SWC zmieniała się od drobnoziarnistej struktury bainityczno-ferrytycznej do drobnoziarnistej struktury odpowiadającej materiałowi rodzimemu. Wielkość ziarna w tym obszarze określono na 9/10.

W spoinie obserwowano dwa typy struktury wynikające z zastosowanego materiału dodatkowego do spawania. Od strony grani w spoinie widoczna była drobnoziarnista struktura bainityczno-ferrytyczna, natomiast od strony lica obserwowano strukturę bainityczno-ferrytyczną z ferrytem otaczającym w postaci siatki ziarna bainitu wydłużonego w kierunku odprowadzania ciepła.

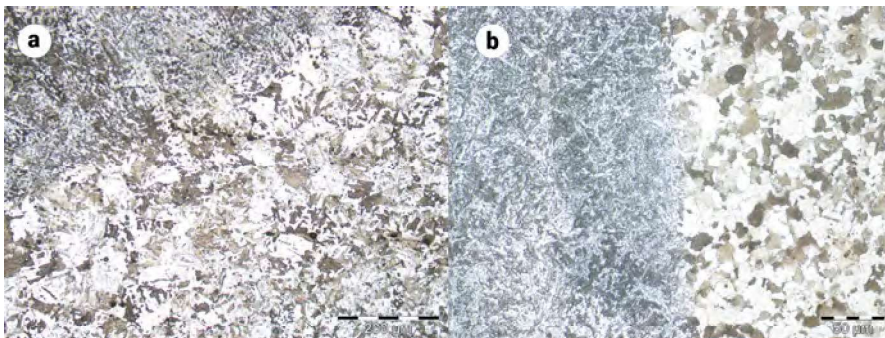
Spoina od strony lica ma strukturę dendrytyczną i wyraźnie widoczne kryształy kolumnowe (rys. 10), a w środku grubości w strefie oddziaływania cykli cieplnych, pochodzących od układania kolejnych ściegów, wskutek czego ziarno jest rozdrobnione, nastąpiła utrata pierwotnego charakteru struktury w wyniku przekroczenia temperatury Ac3 (rys. 11). W obszarze grani spoiny występuje zrekrytalizowana struktura drobnoziarnista (rys. 12).



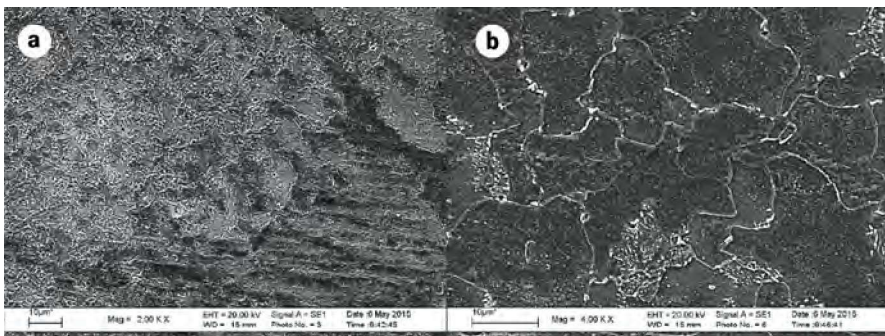
Rys. 5. Mikrostruktura materiału podstawowego X10CrMoVNb9-1: LM (a), SEM (b)



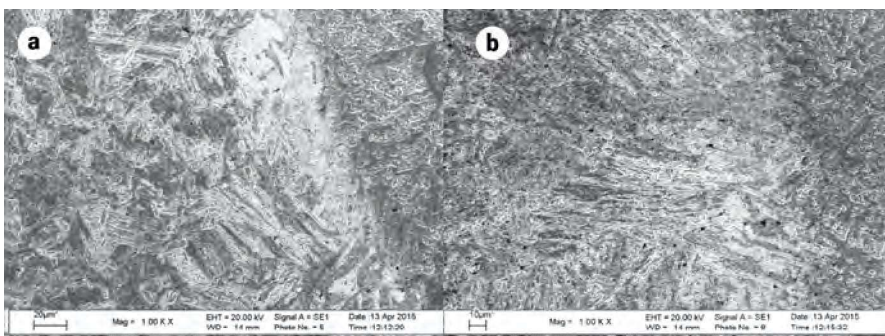
Rys. 6. Mikrostruktura materiału podstawowego 14MoV6-3: LM (a), SEM (b)



Rys. 7. LM. Mikrostruktura LW / SWC 14MoV6-3: od strony lica (a), środek grubości złącza (b)



Rys. 8. SEM. Mikrostruktura LW / SWC 14MoV6-3: od strony lica (a), środek grubości złącza (b)



Rys. 9. SEM. SWC / LW mikrostruktura SWC stali X10CrMoVNb9-1 przy linii wtopienia złącza strona przy licy spoiny (a), w środku grubości (b)



Rys. 10. LM. Spoina od strony licy. Struktura dendrytyczna. Widoczne wyraźne kryształy kolumnowe

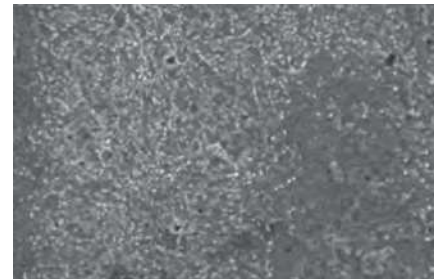


Rys. 11. LM. Spoina w środku grubości. Strefa oddziaływania cykli ciepłych pochodzących od układania kolejnych ściegów. Utrata pierwotnego charakteru struktury



Rys. 12. LM. Spoina w obszarze grani. Strefa oddziaływania cykli ciepłych pochodzących od układania kolejnych ściegów. Zrekrytalizowana struktura drobnoziarnista, ferryt-bainit + węgliki

Dodatkowo wykonane obserwacje struktur ujawniły wydzielenia drobnodispersyjnych węglików wydzielonych po granicach ziaren w SWC od strony stali X10CrMoVNb9-1 (rys. 13) powstających w wyniku dyfuzji reaktywnej węgla podczas spawania i wyżarzania. W opracowaniu [15] nie stwierdzono ujemnego wpływu tego zjawiska, zachodzącego w bardzo wąskim obszarze, na własności plastyczne złącza, jak również na udarność SWC stali P91 będącej odpowiednikiem X10CrMoVNb9-1



Rys. 13. SEM. Drobnodispersyjne węgliki po granicach ziaren po stronie SWC, X10CrMoVNb9-1. Powiększenie 3000x

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych można stwierdzić, jak poniżej.

Zaproponowane materiały dodatkowe: DMV 83-IG użyte do wykonania przetopu oraz SL22G do wypełnienia zostały dobrane prawidłowo.

Przeprowadzony proces podgrzewania, utrzymania temperatury międzysciegowej podczas spawania, a następnie cały proces wyżarzania złącza był prawidłowy i zgodny z wymaganiami zawartymi w PN-EN 13480-4 [4].

Kwalifikowana technologia spawania spełnia wymagania PN-EN ISO 15614-1[3].

Od strony materiału niskostopowego 14MoV6-3 nie obserwowano strefy odwęglonej, natomiast po stronie materiału wyżej stopowego X10CrMoVNb9-1 widoczna była strefa wzbogacona w węgliki.

UWAGI KOŃCOWE I ZALECENIA

- Dla kompleksowego i pełnego określenia rodzaju wydzieleni węglików w obszarze SWC/LW od strony X10CrMoVNb9-1 powinno się przeprowadzić badania z zastosowaniem mikroskopu transmisyjnego TEM.
- Dla kompleksowej oceny trwałości złącza pracującego powyżej temperatury granicznej badania powinno się uzupełnić o wyznaczenie $R_z/100000/t$.

Literatura:

1. PN-CR ISO 15608:2013 Raport techniczny. Wytyczne systemu podziału materiałów metalowych na grupy.
2. Bruzda J., Stale konstrukcyjne i ich spawalność. Instytut Spawalnictwa, Gliwice 2007.
3. PN-EN ISO 15614-1:2017, Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Badanie technologii spawania. Część 1: spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu.
4. PN-EN 13480-4: 2017-10 Rurociągi przemysłowe metalowe. Część 4: Wykonanie i montaż.
5. PN-EN 13445-4:2011 Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe. Część 4: Wytwarzanie.
6. PN-EN 12952-5:2011 Kotły wodnorurowe i urządzenia pomocnicze. Część 5: Wytwarzanie i budowa części ciśnieniowej kotłów.
7. PN-EN 1011-1:2009 Spawanie – Zalecenia dotyczące spawania metali. Część 1: Ogólne wytyczne dotyczące spawania łukowego.
8. PN-EN ISO 13916:2009 Spawalnictwo – Spawanie – Wytyczne pomiaru temperatury podgrzewania, temperatury międzysciegowej i temperatury utrzymania.
9. PN-EN 10216-2+A1:2020-05 Rury stalowe bez szwu do zastosowań ciśnieniowych – Warunki dostawy. Część 2: Rury ze stali niestopowych i stopowych z określeniem właściwości w temperaturze podwyższonej.
10. PN-EN ISO 4136:2013-05 Badania niszczące złączy spawanych metali. Próba rozciągania próbek poprzecznych.
11. PN-EN ISO 9016:2013-05 Badania niszczące złączy spawanych metali. Badanie udatności. Usytuowanie próbek, kierunek karbu i badanie.
12. PN-EN ISO 148-1:2017-02 Metale. Próba udatności sposobem Charpy'ego. Część 1: Metoda badania.
13. PN-EN ISO 9015-1: 2011 Spawalnictwo. Badania niszczące złączy spawanych metali. Badanie twardości. Część 1: Badania twardości złączy spawanych łukowo.
14. PN-EN ISO 6507-1:2018-05 Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badań.
15. Bruzda J., Zeman M., Szubryt M., Złącza niejednorodne z nowych stali do pracy w podwyższonych temperaturach. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 4/2009.

