

Spawanie produkcyjne odlewu staliwnego żaroodpornego GX40NiCrNb35-45

Production welding of a heat-resistant cast steel GX40NiCrNb35-45

Streszczenie

W pracy przedstawiono przykładowe wyniki badań kwalifikowania technologii spawania produkcyjnego odlewu staliwnego żaroodpornego w gatunku GX40NiCrNb35-45 przy użyciu materiału dodatkowego w gatunku WZ 35 45 Zr wg PN-EN ISO 14343. Badanie kwalifikowania technologii spawania wykonano zgodnie z PN-EN ISO 11970. Złącze próbne wykonano metodą 141 i następnie przeprowadzono badania nieniszczące oraz niszczące określające własności mechaniczne złącza. Wykonane badania pozwoliły spełnić wymagania zawarte w PN-EN ISO 11970 i były podstawą do wystawienia protokołu kwalifikowania technologii spawania.

Słowa kluczowe: kwalifikowanie technologii spawania; stalwo żaroodporne; spawanie TIG

Abstract

The paper presents the results of qualification of production welding procedures for heat-resistant cast steel in grade GX40NiCrNb35-45 with used filler material in grade WZ 35 45 Zr (PN-EN ISO 14343). Qualification of welding technology was made in accordance to PN-EN ISO 11970. Test welded joint was made using 141 method and non-destructive and destructive testing were performed in order to determine the mechanical properties of the welded joint. Completed tests met the requirements of PN-EN ISO 11970 and were the basis of the welding procedure qualification record.

Keywords: qualification of welding procedures; heat-resistant cast steel; TIG welding

Wstęp

Staliwa wysokostopowe żaroodporne austenityczne są szeroko stosowane na elementy instalacji w zakładach naftowych, petrochemicznych i chemicznych. Od żaroodpornych odlewów staliwnych stosowanych na ww. elementy instalacji wymaga się stabilności mikrostruktury, żarowytrzymałości, odporności na nawęglanie i utlenianie, przy zachowaniu dobrej spawalności [1]. Elementy instalacji podczas pracy narażone są na ekstremalnie wysokie temperatury ok. 800÷1100 °C. Takie warunki powodują degradację mikrostruktury różnymi mechanizmami. Począwszy od kruchości wywołanej pełzaniem, wysokotemperaturowego zmęczenia, kruchości wywołanej przez fazę sigma, nawęglanie, kruchości wodorowej, grafityzacji, erozji, korozji wysokotemperaturowej [2]. W czasie pracy w podwyższonej temperaturze, głównymi wydzieleniami jakie powstają są węgliki bogate w chrom typu Cr₂₃C₆, M₆(C,N), węgliki bogate w niob typu NbC, węgliko-azotki Cr₂(C,N) [2].

W mikrostrukturze stopów GX zawierających Nb w stanie lanym oprócz osnowy austenitycznej występują węgliki niobu (NbC) i węgliki chromu (M₇C₃) [3,4]. Spawalność odlewów staliwnych w szczególności o mikrostrukturze austenitycznej

jest ograniczona przez segregację dendrytyczną i rozszerzalność cieplną. Ich współczynnik rozszerzalności liniowej jest 1,5x większy od współczynnika dla staliw niestopowych. Autorzy w pracy [5] zaprezentowali technikę spawania z temperaturą podgrzewania wstępnego rzędu 600 °C. Tak wysokie podgrzewanie zwiększa ciągliwość i zmniejsza naprężenia. Dane producentów wskazują, że możliwe jest zwiększenie plastyczności materiału po zastosowaniu starzenia w 1100 °C przez 1000 godzin [6,7]. Pękanie podczas spawania staliw wysokostopowych żaroodpornych GX jest spowodowane występowaniem węgliku chromu M₂₃C₆ oraz kruchego związku międzymetaliczny Ni-Nb-Si. Autorzy [8] tłumaczą to przemianą związku międzymetalicznego Ni-Nb-Si w węgielki niobu (NbC). Po przemianie pozostaje wysoka zawartość krzemu, która znacząco obniża miejscowo temperaturę topnienia, co prowadzi w czasie chłodzenia do obniżenia plastyczności. Podczas cykli cieplnych w miejscach segregacji dendrytycznych np. na granicach krystalitów, następuje równowagowe nadtapianie lub rozpuszczanie węglików eutektycznych NbC. Krzepnięcie eutektyki węglkowej związane jest ze skurczem i powstaniem pęknięć po granicach ziaren [9].

Dr inż. Sławomir Parzych – Politechnika Krakowska, dr inż. Marek Gucwa – Politechnika Częstochowska, dr inż. Robert Bęczkowski – DRB.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: slawomir.parzych@mech.pk.edu.pl

Metodyka badań, materiał do badań

Celem pracy było opracowanie dwóch technologii spawania wg PN-EN ISO 11970 [10]. Kwalifikowanie technologii spawania polegało na wykonaniu złącza próbnego przy użyciu spawania łukowego elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych, tj. metody 141 (TIG) z materiałem dodatkowym w gatunku WZ 35 45 Zr (tabl. III) wg EN ISO 14343 [11]. Skład chemiczny oraz podstawowe własności mechaniczne wg atestu materiałowego przedstawiono w tablicy II. Materiałem do badań były odlewane żaroodporne rury stalowe w gatunku GX40NiCrNb35-45 wg PN-EN 10295 [12]. Pierwsza $\varnothing 155,8 \times 11,0$ mm o nazwie handlowej MANAURITE XTM oraz druga $\varnothing 102,0 \times 11,0$ mm o nazwie handlowej KHR 45A. Zastosowane warunki spawania: pozycja z dołu do góry – PH; gaz/osłona: I1 – argon 5,0; temperatura międzysciegowa: max 150 °C. Zgodnie z tablicą 1 PN-EN ISO 11970 [10] na złączach próbnych należy wykonać badania: 100% badań niszczących powierzchniowych i objętościowych: wizualne (VT), penetracyjne (PT) i radiograficzne (RT) oraz badania niszczące: badanie na rozciąganie poprzeczne. Jeśli jest wymagane, wykonuje się badania: zginania poprzecznego, udarności, twardości, makroskopowe i mikroskopowe.

Rura stalowa w stanie lanym charakteryzuje się mikrostrukturą w pełni austenityczną z wydzieleniami węglików bogatych w chrom i niob ($M_{23}C_6$, M_7C_3 , MC) o maksymalnej temperaturze pracy w powietrzu do 1100 °C bez dodatkowej obróbki cieplnej. Rury stalowe są wytwarzane metodą odlewania odśrodkowego (ang. *Centrifugally Casting*). Skład chemiczny poszczególnych staliw przedstawiono w tablicach I, II.

Zgłady metalograficzne trawiono 10% wodnym roztworem CrO_3 . Badania mechaniczne wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS810. Badania twardości wykonano

na twardościomierzu HPO 250 przy obciążeniu 98,1 N (10 kg) metodą Vickersa. Badania udarności wykonano za pomocą młota Charpy'ego o energii początkowej młota 300 J na próbkach $7,5 \times 10 \times 55$ mm z karbem „V”.

Wyniki badań i ich dyskusja

Badania wizualne (VT) i badania penetracyjne (PT) nie ujawniły niezgodności spawalniczych. Badania makroskopowe złącza ujawniły poprawny układ ściągów w spoinie bez widocznych wewnętrznych niezgodności spawalniczych (rys. 1).

W celu kompleksowego określenia własności mechaniczne złącza próbnego, oprócz badań wymaganych przez PN-EN ISO 11970 [10], wykonano dodatkowe badania na zginanie poprzeczne, udarności, twardości, metalograficzne makroskopowe i mikroskopowe. W tablicach IV÷VIII przedstawiono wyniki badań niszczących. Badanie rozciągania poprzecznego zakończyło się pozytywnym wynikiem, zerwanie nastąpiło poza spoiną, a wymagana wytrzymałość na rozciąganie została osiągnięta.

Próbę zginania poprzecznego wykonano na dwóch próbkach: od strony lica i grani. Kąt gięcia przy którym próbki się złamały przedstawiono w tablicy V. Próba zginania poprzecznego prowadzona jest w celu sprawdzenia plastyczności złączy oraz wykrycia ewentualnych niezgodności powstałych podczas spawania np. przyklejenia. Kąty przy jakich próbki uległy złamaniu, wskazują na bardzo małą plastyczność złączy.

Próbę udarności wykonano na próbkach o zredukowanych wymiarach ISO Charpy 7,5 ($7,5 \times 10 \times 55$ mm) w temperaturze otoczenia. Próbki pobrano i karby nacięto w następujących strefach złącza: spoinie i strefie wpływu ciepła.

Tablica I. Skład chemiczny i własności mechaniczne w temperaturze otoczenia staliwa MANAURITE XTM 5 (% masowe)

Table I. Chemical composition and mechanical properties at the room temperature of cast steel MANAURITE XTM 5 (% mass)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti
0,43	1,90	1,18	0,018	0,005	36,01	44,43	0,95	0,30
R_{p0,2} [MPa]		R_m [MPa]			A₅ [%]			
≥ 250		≥ 450			≥ 5			

Tablica II. Skład chemiczny i własności mechaniczne w temperaturze otoczenia staliwa KHR 45A (wt %)

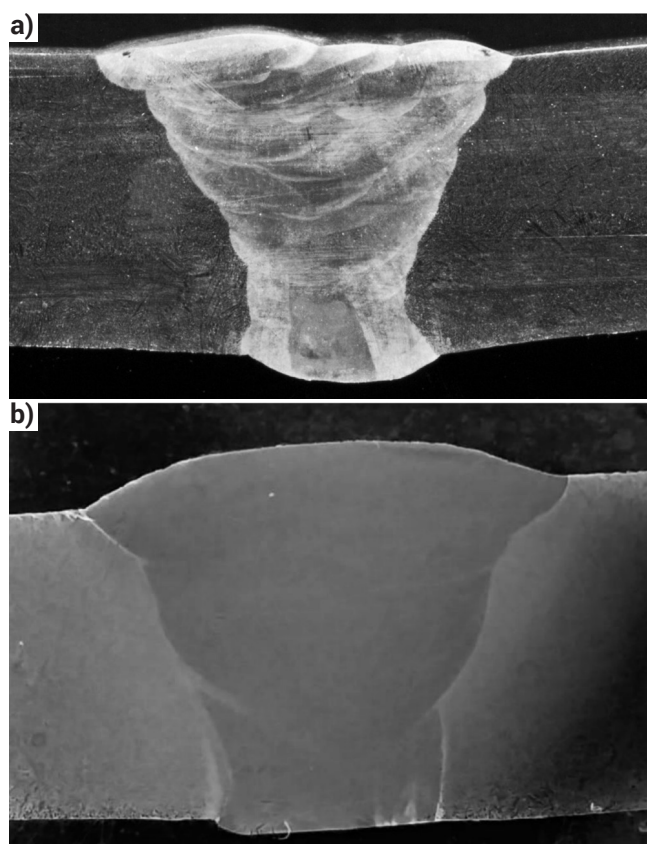
Table II. Chemical composition and mechanical properties at the room temperature of cast steel KHR 45A wt %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti
0,53	1,80	1,78	0,015	0,008	34,51	45,68	1,95	0,42
R_{p0,2} [MPa]		R_m [MPa]			A₅ [%]			
≥ 250		≥ 450			≥ 5			

Tablica III. Skład chemiczny i własności mechaniczne materiału dodatkowego do spawania WZ 35 45 Nb (% masowe)

Table III. Chemical composition and mechanical properties of filler material WZ 35 45 Nb (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Nb
0,42	1,05	1,53	0,009	0,002	35,29	45,50	0,10	1,24
R_{p0,2} [MPa]		R_m [MPa]			A₅ [%]			
≥ 400		≥ 650			≥ 8			



Rys. 1. Makrostruktura złącza spawanego: a) MANAURITE XTM, b) KHR 45A

Fig. 1. Macrostructure of the welded joint: a) MANAURITE XTM, b) KHR 45A

Tablica IV. Wyniki próby rozciągania poprzecznego złącza spawanego staliwa MANAURITE XTM oraz KHR 45A

Table IV. Transverse tensile test results concerning the test joint made in cast steel MANAURITE XTM and KHR 45A

Oznaczenie próbki	Wymagania	R _m [MPa]	Miejsce zerwania	Wyniki badań
		440	–	–
MANAURITE XTM	R1	462	poza spoiną	pozytywny
	R2	443	poza spoiną	pozytywny
KHR 45A	R1	443	poza spoiną	pozytywny
	R2	447	poza spoiną	pozytywny

Praca łamania niezależnie od miejsca próby była na bardzo niskim poziomie (tabl. VI). Nie można odnieść otrzymanych wartości pracy łamania do wartości pracy łamania materiału rodzimego z powodu braku takich informacji w normie materiałowej PN-EN 10295. Dodatkowo materiał lany, jakim jest odlew stalowy, charakteryzuje się niskimi własnościami mechanicznymi w porównaniu do materiałów przerobionych plastycznych.

Wyniki pomiarów twardości na przekroju złącza spawanego GX40NiCrSiNb35-25 nie odbiegają od typowych dla tego typu materiałów. Nie ma gwałtownych zmian twardości w zależności od badanych stref złącza (tabl. VII, VIII). Podobnie jak w przypadku próby udarności, nie ma informacji na jakim poziomie jest twardość materiału rodzimego.

Można zauważyć, że w przypadku zastosowania materiału KHR 45A średnia twardość na przekroju złącza jest niższa w porównaniu do MANAURITE XTM o ok. 40÷50 jednostek twardości. Jest to prawdopodobnie spowodowane większą objętością fazy węglkowej. Aby to potwierdzić, należy wykonać badania mikroskopowe.

Tablica V. Wyniki próby zginania poprzecznego złącza spawanych MANAURITE XTM oraz KHR 45A

Table V. Test results concerning the bending of the test joint made in cast steel MANAURITE XTM and KHR 45A

Oznaczenie próbki		Średnica trzpienia gnącego lub rolki	Kąt zginania	Strona gięcia	Uwagi
MANAURITE XTM	TFBB1	90 mm	9°	lico	Pełne złamanie
	TFBB2	90 mm	11°	lico	Pełne złamanie
	TRBB1	90 mm	14°	grań	Pełne złamanie
	TRBB2	90 mm	16°	grań	Pełne złamanie
KHR 45A	TFBB1	90 mm	11°	lico	Pełne złamanie
	TFBB2	90 mm	12°	lico	Pełne złamanie
	TRBB1	90 mm	10°	grań	Pełne złamanie
	TRBB2	90 mm	13°	grań	Pełne złamanie

Tablica VI. Wyniki pracy łamania złącza spawanych

Table VI. Results concerning the impact strength of the joint made in cast steel

Oznaczenie próbki		Zestaw	Powierzchnia przekroju w płaszczyźnie karbu [cm ²]	Temperatura badania	Praca łamania KV [J]			Wartość średnia [J]
					1	2	3	
MANAURITE XTM	VWT (spoina)	1÷3	0,6	+21 °C	5	3	3	4
	VHT (SWC)	4÷6	0,6	+21 °C	3	3	3	3
KHR 45A	VWT (spoina)	1÷3	0,6	+21 °C	6	4	6	5
	VHT (SWC)	4÷6	0,6	+21 °C	5	8	6	6

Tablica VII. Wyniki pomiarów twardości na przekroju złącza spawanego MANAURITE XTM

Table VII. Results of hardness measurements concerning the cross-sectional hardness of the welded joints made in cast steel MANAURITE XTM

Linia pomiarowa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
lico	217	214	216	215	213	208	204	208	216	217	210	216	211	218	214
grań	225	213	224	210	217	222	214	206	192	198	205	207	206	213	213

Tablica VIII. Wyniki pomiarów twardości na przekroju złącza spawanego KHR 45A

Table VIII. Results of hardness measurements concerning the cross-sectional hardness of the welded joints made in cast steel KHR 45A

Linia pomiarowa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
lico	166	191	163	191	197	205	193	191	176	193	192	189	159	157	158
grań	180	177	168	198	205	206	222	221	227	207	206	202	170	169	168

Podsumowanie

Przeprowadzone badania dały wynik pozytywny i pozwoliły na wystawienie protokołu kwalifikowania technologii spawania WPQR zgodnie z PN-EN ISO 11970. Należy jednak zaznaczyć, że badane złącza mają bardzo niską plastyczność i udurowienie, co związane jest prawdopodobnie z wydzieleniem się węglików i związków międzymetalicznych po granicach ziaren austenitu. Zauważalna jest również różnica w twardości badanych złączy. Złącza wykonane z użyciem materiału KHR 45A charakteryzowały się zdecydowanie mniejszą twardością materiału rodzimego niż złącza wykonane z materiału MANAURITE XM. Również wyniki badań udurowienia wskazują na pewne różnice we właściwościach materiału, wynikające prawdopodobnie z różnic w składach chemicznych porównywanych materiałów, jak i niskich właściwości plastycznych charakteryzujących materiały odlewane. Można jednak przyjąć, że niezależnie od producenta wyniki badań niszczących są na podobnym poziomie.

Literatura

- [1] ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and HighPerformance Alloys, ASM International, Materials Park, Ohio, 2005.
 - [2] Babakr A.M., Al.-Ahamari A., Al.-Jumayiah K., Habiby F.: Sigma phase formation and embrittlement of cast iron-chromium Nickel (Fe-Cr-Ni) alloys, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2008, vol. 7, No. 2, pp. 127-145.
 - [3] Patchett, B.M. and Skwarok, R.W.: Welding metallurgy of 20Cr-32Ni-Nb and HP45 castings, *Materials for Resource recovery and Transport*, Metallurgical Society of CIM, 1998.
 - [4] Shinozaki, K. et al: Deterioration of weldability of long term aged HP heat-resistant cast steel containing Nb, Mo and W, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 12, No. 2, 1998, pp. 223-232.
 - [5] Vekeman J., De Waele M.: Repair welding of HP40-Nb, *Welding in the World*, 2010, Vol. 54, No 3/4, pp. 34-42.
 - [6] http://www.kubotamaterials.com/alloys/heat_resistant/KHR45A.pdf (7.04.2018).
 - [7] http://www.manoir-industries.com/site/docs_wsw/RUB_75/FICHE_INTERNET_XTM.pdf (7.04.2018).
 - [8] Shi S., Lippold J. C., Ramire J.: Hot Ductility Behavior and Repair Weldability of Service-Aged, Heat-Resistant Stainless Steel Castings, *Welding Research*, 2010, Vol. 89.
 - [9] Tasak E.: *Metalurgia spawania*, JAK, 2008.
 - [10] PN-EN ISO 11970:2009 Instrukcja technologiczna spawania i kwalifikowanie technologii spawania produkcyjnego odlewów staliwnych.
 - [11] PN-EN ISO 14343:2010 Materiały dodatkowe do spawania – Druty elektrodowe, taśmy elektrodowe, druty i pręty do spawania łukowego stali nierdzewnych i żaroodpornych – Klasyfikacja.
 - [12] PN-EN 10295:2004 Odlewy ze staliwa żaroodpornego.
-