

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Warunki termodynamiczne podczas spawania elementów wagonów ze stali S355J+N

BOŻENA SZCZUCKA-LASOTA¹, TOMASZ WĘGRZYN¹, JAN PIWNIK², JERZY KALWAS², ADAM JUREK³, KRZYSZTOF IRENEUSZ WILCZYŃSKI²

¹POLITECHNIKA ŚLĄSKA, ²COBRABiD Sp. z o.o., ³NOVAR SP. Z O. O., GLIWICE, POLAND

Słowa kluczowe: inżynieria lądowa, transport, środki transportu, PBO4, spawanie

STRESZCZENIE:

Celem pracy jest analiza właściwości mechanicznych konstrukcji wagonów ze stali niskostopowej S355J+N, spawanej metodą MAG.

Do budowy wagonów używa się często grubościennych konstrukcji, co może stanowić problem spawalniczy. Trudności te związane są ze składem chemicznym stali i drutów elektrodowych, stanem naprężenia, warunkami termodynamicznymi (na które składają się temperatura podgrzewania wstępnego i temperatura międzyścięgowa). W niniejszym artykule przedstawiono właściwości konstrukcji ze stali niskostopowej S355J+N po spawaniu metodą MAG różnymi parametrami procesu. Wykonano badania nieniszczące oraz przeanalizowano strukturę metalograficzną i wytrzymałość na rozciąganie złączy spawanych. Jako gazu osłonowego użyto różnych osłonowych mieszanin gazowych argonu z tlenem i dwutlenkiem węgla, ustalono też sposób ukosowania blach przed spawaniem. Zmieniano prędkość spawania nie stosując podgrzewania wstępnego. Temperatura międzyścięgowa została poddana kontroli, tak aby nie przekraczała 250°C.

Thermodynamic conditions during welding of railway carriage elements made of S355J+N STEEL

Keywords: civil engineering, transport, means of transport, PBO4, welding

ABSTRACT:

The article aims to analyse the mechanical properties of carriage structures made of MAG-welded, low-alloy S355J+N steel.

Carriages are often made from thick-walled structures, which may cause problems during welding. The aforementioned issues stem from the chemical composition of the steel and electrode, the internal stress, as well as the thermodynamic conditions (which consist of the pre-heating temperature and interpass temperature). This article presents the properties of S355J+N steel structures after MAG welding. In addition, non-destructive testing has been performed, and the metallographic structure and tensile strength of welded joints have been analysed. Different mixtures of argon with carbon dioxide or oxygen were used as the shielding gas, and the beveling method used for sheets before welding was established. Welding speed was changed without pre-heating. The interpass temperature was controlled, so that it did not exceed 250°C.

1. WSTĘP

Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie wyników badań w celu dobrania parametrów spawania MAG konstrukcji elementów wagonów wykonanej ze stali S355J+N.

Zapotrzebowanie na złącza stalowe gwarantujące wysoką udarność w tworzeniu konstrukcji Smart City (obszar badawczy PB04) stale wzrasta. Podobnie ważne jest stałe udoskonalanie stalowych złączy wykonywanych przy budowie wagonów. Duża część obecnie prowadzonych badań dotyczy opracowywania złączy stali o wysokiej wytrzymałości i udarności przy zastosowaniu nowych materiałów dodatkowych i innowacyjnych technologii spawania [1-4]. Wybór pierwiastków stopowych w stali i w spoinie jest bardzo ważny ze względu na ich wpływ na strukturę, doraźną wytrzymałość na rozciąganie i udarność złącza. Wpływ składu chemicznego stali niestopowych na te własności był analizowany bardzo dokładnie w ciągu ostatnich 15 lat [8-10]. W stali S355J + N (EN10025-2: 2004) oraz w drucie elektrodowym SG3 (EN ISO 14341-A: G 46 5 M G4Si1) przeznaczonym do tej stali występują głównie takie elementy jak: C, Mn, Si, Cu, Al, P oraz S. Dodatek Mn podnosi wytrzymałość i jest neutralny jeśli chodzi o wpływ na własności plastyczne (pierwiastek austenitotwórczy). Dodatek Cu ma wpływ na własności chemiczne, poprawia też odporność stali niestopowych na korozję. Dodatek Si podnosi wytrzymałość stali i złącza. S i P z kolei są traktowane jako pierwiastki niepożądane, pogarszające własności plastyczne stali.

2. MATERIAŁY I METODY

Jak wspomniano we wstępie, stal S355J + N jest coraz częściej stosowana w tworzeniu miast modalnych (smart city), a także w budownictwie lądowym i transporcie ze względu na stosunkowo wysoką wytrzymałość i dobre własności plastyczne. Wytrzymałość tej stali na rozciąganie kształtuje się na poziomie 600 MPa, a wydłużenie względne jest zadowalające dla konstruktorów. Zaletą tej grupy materiałowej jest możliwość uzyskania porównywalnych własności mechanicznych po spawaniu. W Tabeli 1. przedstawiono właściwości mechaniczne stali S355J + N przeznaczonej na spawane elementy wagonów.

Tabela 1 Własności mechaniczne stali S355J + N [6]

Stal	R _m , MPa	Re, MPa	A5, %
S355J+N	600	435	16

Konstrukcje grubościennne używane do budowy wagonów uważane są za trudne do spawania ze względu na pęknięcia pojawiające się w spoinie (rzadziej niż w strefie wpływu ciepła) [1]. Z tego powodu niezwykle ważne jest prawidłowe dobranie składu chemicznego drutu oraz ustalenie odpowiednich parametrów spawania. W Tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny stali S355J + N.

Tabela 2 Skład chemiczny badanej stali S355J+N [6]

Steel grade	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Al, %	Cu, %	O, ppm
S355J+N	0,19	0,55	1,7	0,035	0,035	0,01	0,6	95

Łatwo zauważyć zawyżoną zawartość fosforu i siarki, co stwarza trudności w spawaniu. Wybrano zatem następujące druty elektrodowe: SG3 (EN ISO 14341-A: G 46 5 M G4Si1). Skład chemiczny drutu spawalniczego przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 3 Skład chemiczny drutu spawalniczego SPG3 [10]

Typ	C %	Si %	Mn %	P %	S %
SG3	0.08	0.85	1.7	0.021	0.021

Składy chemiczne stali i drutu spawalniczego są tu zbliżone. Średnica drutu elektrodowego wynosiła 1,2 mm, napięcie łuku 20 V, zaś prąd spawania 115 A. W obu przypadkach sprawdzono trzy różne prędkości spawania: 300 mm/min, 350 mm/min i 400 mm/min. Zgodnie z zaleceniami literatury przedmiotu postanowiono nie stosować podgrzewania wstępnego, natomiast kontrolowano temperaturę międzyścigową, która nigdy nie przekraczała 250°C. Prędkość spawania zmieniano kilkukrotnie, aby ocenić która energia liniowa jest najbardziej odpowiednia [6, 7]. Źródło prądu stałego zawsze podłączano do (+) na elektrodzie, otrzymując spoinę spawaną trójścigowo. Zastosowano też dwie różne mieszanki osłonowe argonu: Ar+18% CO₂ i Ar+2% O₂ (wg normy PN-EN 14175). Badania obejmowały badania nieniszczące (NDT), na które składały się:

- Badania wizualne (VT) przygotowanych złączy spawanych wykonane okiem uzbrojonym w lupę o 3-krotnym powiększeniu – badanie wykonano

wg normy PN-EN ISO 17835, kryteria oceny wg EN ISO 5817;

- Badania magnetyczno-proszkowe (MT) – badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 17638, z oceną wykonaną zgodnie z normą EN ISO 5817, defektoskopem magnetycznym typu REM-230;

- Badania radiograficzne – badania przeprowadzono zgodnie z normą PN EN ISO 15614-1, typ źródła promieniowania SMART 200.

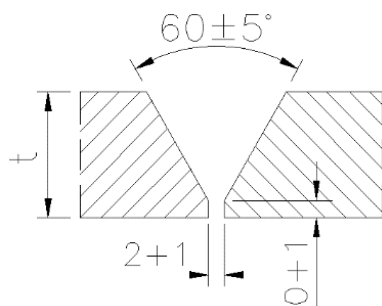
Dodatkowo przeprowadzono następujące badania niszczące:

- Badanie wytrzymałości na rozciąganie na maszynie (maszyna wytrzymałościowa ZWICK 100N5A);

- Badanie makrostruktury próbek trawionych odczynnikiem Adlera i mikroskopem świetlnym (LM).

3. REZULTATY I DISKUSJA

Wykonano połączenie spawane doczołowo (BW) ze stali S355J + N. Spawanie metodą MAG (135) zastosowano w pozycji dolnej (PA) zgodnie z normą EN 15614-1. Przygotowanie materiału do spawania z potrójnym ścięciem przedstawiono na Rysunku 1.



Rysunek 1 Sposób ukosowania złącza trójścięgowego

Po spawaniu wykonano następujące badania nieniszczące (NDT): wizualne (VT), magnetyczno-proszkowe (MT) oraz radiograficzne. Na ich podstawie oceniono jakość złącza (Tab. 4).

Tabela 4 Ocena jakości złącza

Gaz osłonowy	Szczelina między blachami, mm	Prędkość spawania 300 mm/min	Prędkość spawania 350 mm/min	Prędkość spawania 400 mm/min
Ar-2% O ₂	2	Wady i niezgodności spawalnicze	Wady i niezgodności spawalnicze	Wady i niezgodności spawalnicze
Ar-18% CO ₂	2	Brak pęknięć	Brak pęknięć	Wady i niezgodności spawalnicze
Ar-2% O ₂	3	Wady i niezgodności spawalnicze	Wady i niezgodności spawalnicze	Wady i niezgodności spawalnicze
Ar-18% CO ₂	3	Wady i niezgodności spawalnicze	Wady i niezgodności spawalnicze	Wady i niezgodności spawalnicze

Z danych tablicowych wynika, że właściwszym gazem osłonowym jest mieszanka Ar-18% CO₂, która posiada mniej utleniający charakter od mieszanki Ar-2% O₂. Dużą rolę w uzyskaniu złącza bez wad odgrywa prawidłowy sposób ukosowania. Przy rodzaju ukosowania „na Y” (Rys. 1) odstęp pomiędzy blachami powinien wynosić 2 mm. Z badań nieniszczących wynika, że prędkość spawania powinna być na poziomie 300 mm/min lub 350 mm/min. Aby uzyskać dodatkowe informacje dotyczące poprawności połączenia, zdecydowano się na wykonanie prób wytrzymałości na rozciąganie. Po wykonaniu złączy (o parametrach dających pozytywne rezultaty z poprzedniej części badań) przeprowadzono badania wytrzymałości na rozciąganie. Badania złączy wykonano na maszynie wytrzymałościowej ZWICK 100N5A. Wymiar przekroju próbki wynosił 12 mm x 25 mm. Wyniki badań mechanicznych spoin (średnia z trzech pomiarów) przedstawiono w Tabeli 5.

Tabela 5 Własności mechaniczne złącza wykonanego z dwiema różnymi prędkościami spawania

Gaz osłonowy	Prędkość spawania, mm/min	R _e , MPa	R _m , MPa	A ₅ , %
Ar-18% CO ₂	300	411	541	13.1
Ar-18% CO ₂	350	403	538	13.9

Z danych tablicowych wynika, że prędkość spawania nie ma istotnego wpływu na własności mechaniczne złącza (odstęp pomiędzy blachami wynosił 2 mm). Można zatem uznać, że nieco korzystniejsze jest spawanie z prędkością na poziomie 350 mm/min. W następnej kolejności oceniono strukturę metalograficzną w spoinach pod kątem występowania najkorzystniejszej fazy, którą stanowi ferryt AF (acicular ferrite).

Tabela 6 Zawartość ferrytu AF w badanych złączach

Gaz osłonowy	Prędkość spawania mm/min	Acicular ferrite [%]
Ar-2% O ₂	300	36
Ar-18% CO ₂	300	44
Ar-2% O ₂	350	37
Ar-18% CO ₂	350	45

Z analizy danych przedstawionych w Tabeli 6. ponownie wynika, że spawanie MAG w osłonie Ar-18% CO₂ jest korzystniejsze od spawania w osłonie Ar-2% O₂. Nadmiernie utleniająca osłona gazowa nie sprzyja powstawaniu dużej zawartości ferrytu AF, co przekłada się na powstawanie gorszych własności plastycznych złącza i możliwość występowania wad spawalniczych. Badania strukturalne potwierdziły, że najkorzystniejsze jest zastosowanie prędkości spawania na poziomie 350 mm/min.

4. PODSUMOWANIE

Wykonano złącza ze stali S355J + N posługując się różnymi parametrami spawalniczymi i stosując różne mieszanki osłonowe, zmienną prędkość spawania oraz różny sposób ukosowania.

Badania nieniszczące wykazały, że mieszanka osłonowa Ar-2% O₂ jest niewłaściwa do spawania tej stali; nie obserwowano wad i niezgodności spawalniczych, gdy zastosowano mniej utleniającą mieszankę osłonową Ar-18% CO₂. Ważną rolę odgrywają też inne czynniki, m.in. właściwy sposób ukosowania i prędkość spawania.

Badania niszczące, na które składały się badanie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie i badania struktury pod kątem zawartości ferrytu AF, wykazały, że korzystniejsza jest prędkość spawania na poziomie 350 mm/min.

LITERATURA

- [1] Hadryś D., Mechanical properties of plug welds after micro-jet cooling, [in:] Arch. Metall. Mater. No. 61(2016), pp. 1771-1775.
- [2] Tegoż, Impact load of welds after micro-jet cooling, [in:] Archives of Metallurgy and Materials, no. 60 (4), 2015, pp. 2525-2528.
- [3] Stanik Z., Mechatronic Systems, Mechanics and Materials, [in:] Solid State Phenomena, vol. 210/2014, pp. 58-64.
- [4] Evans G. M., Microstructure and properties of ferritic steel welds containing Al and Ti, [in:] Oerlikon-Schweissmitt, vol.130/1994, pp. 21-39.
- [5] Fornalczyk A., Willner J., Cebulski J., Pasek D., Saternus M., Czech P., Structure and surface state of different catalytic converters applied in cars. The 5th international Lower Silesia-Saxony conference "Advanced Metal Forming processes in automotive industry (AutoMetForm 2016)", Wrocław (Poland), 28-29 June 2016, pp. 327-333.
- [6] Fornalczyk A., Saternus M., Willner J., Fafiński M., Kania H., Czech P., The results of platinum recovery from metal substrate catalytic converters by using magneto-hydro-dynamic pump. 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials "METAL 2016", Brno (Czech Republic), 25th - 27th May 2016, pp. 1382-1387. ISBN: 978-80-87294-67-3.
- [7] Burdzik R., Konieczny Ł., Stanik Z., Folega P., Smalcerz A., Lisiecki A., Analysis of impact of chosen parameters on the wear of camshaft, [in:] Archives of Metallurgy and Materials, vol. 59 (3), 2014, pp. 957-963.
- [8] Kasuya T., Hashiba Y., Ohkita S., Fuji M., Hydrogen distribution in multipass submerged arc weld metals, [in:] Science and Technology of Welding&Joining, vol. 6 (4), 2001, pp. 261-266. DOI: 10.1179/136217101101538767.
- [9] Lukaszowicz K., Dobrzański L. et al, Characterization and properties of PVD coatings applied to extrusion dies, [in:] Vacuum, vol. 86/2012, pp. 2082-2088.
- [10] Evans G. M., The effect of micro-alloying elements on the microstructure and properties of ferritic all-weld metal deposits, IIW Doc II-A-855-92, 1992, pp. 1-20.

Podziękowania: Artykuł jest związany z realizacją projektu COST, CA 18223