

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Spawanie złącza mieszane w budowie podestów ruchomych ze stali S690 QL i S960 MC

BOŻENA SZCZUCKA-LASOTA¹, TOMASZ WĘGRZYN², JAN PIWNIK³, ADAM JUREK⁴,
KRZYSZTOF I. WILCZYŃSKI⁵

^{1,2}POLITECHNIKA ŚLĄSKA, ³INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW,

⁴NOVAR SP. Z O.O. GLIWICE, GLIWICE, POLAND, ⁵POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Słowa kluczowe: inżynieria lądowa, transport, środki transportu, złącze mieszane

STRESZCZENIE:

W artykule analizowano możliwość wykonania prawidłowego złącza mieszane z dwóch różnych gatunków stali o wysokiej wytrzymałości (S960 MC) ze stalą o podwyższonej granicy plastyczności (S690 QL). Do budowy podestów ruchomych stosuje się coraz częściej różne gatunki stali i wykonuje się z nich złącza jednorodne i mieszane. Celem artykułu jest prawidłowy dobór parametrów do spawania mieszane złącza elementów podestu ruchomego wykonanego ze stali S690 QL i S960 MC o grubości 6 mm. Postanowiono sprawdzić wpływ parametrów spawania na poprawność wykonanego złącza. Zastosowano różne druty elektrodowe i różne gazy osłaniające. Wykonano badania nieniszczące i niszczące dla sprawdzenia jakości złącza mieszane.

Welding of a mixed joint in the structure of mobile platforms made of S690 QL and S960 MC steel

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

ABSTRACT:

The article analyzes the possibility of making a correct mixed joint from two different high-strength steel grades (S960 MC) with steel with an increased yield strength (S690 QL). Various grades of steel are increasingly being used to build mobile platforms and homogeneous and mixed joints are made of them. The purpose of the article is the correct selection of parameters for welding the mixed joint of elements of the mobile platform made of steel S690 QL and S960 MC with a thickness of 6 mm. It was decided to check the influence of welding parameters on the correctness of the joint made. Various electrode wires and various shielding gases were used. Non-destructive and destructive tests were performed to check the quality of the mixed joint.

1. WSTĘP

Przedstawiono wyniki badań prowadzących do dobrania parametrów spawania MAG (proces 135) złącza mieszanego występującego w konstrukcji podestu ruchomego ze stali S690 QL ze stalą S960 MC.

Stalowe złącza mieszane stosuje się w różnorodnych konstrukcjach używanych w inżynierii lądowej i w transporcie [1-2]. Dobrym przykładem zastosowania złączy mieszanych z badanymi gatunków stali jest konstrukcja podestu ruchomego, w przypadku której dąży się do wydłużenia ramienia operacyjnego podestu i równoczesnego zwiększania udźwigu [3-4]. Do spawania jednoimiennego obu gatunków stali (S960 MC i S690 QL) zalecane jest ograniczenie energii liniowej w trakcie spawania do poziomu 4 kJ/cm [5] i stosowanie podgrzewania wstępnego dla grubości blach powyżej 4 mm. W zależności od zwiększania grubości spawanych blach powinna odpowiednio wzrastać temperatura podgrzewania wstępnego [6]. Producenci nie informują o zasadach doboru temperatury podgrzewania wstępnego dla złącza mieszanego z badanymi stali [7]. W artykule postanowiono dobrać najwłaściwsze parametry do spawania stali S960 MC ze stalą S690 QL w celu zapewnienia jak najlepszej jakości złącza.

2. MATERIAŁY STOSOWANE DO BADAŃ

Oba gatunki stali S960 MC ze stalą S690 QL uznawane są za trudnospalne, ponieważ złącze jest podatne na pęknięcia w strefie wpływu ciepła (SWC). Głównym problemem spawalniczym złączy jednorodnych wykonanych ze stali S960 MC ze stalą S690 QL jest niższa uderzalność i wytrzymałość powstałego złącza od materiału rodzimego

[6]. Tabela 1 prezentuje własności mechaniczne stali S960 MC ze stalą S690 QL o grubości 6 mm w stanie dostarczenia.

Tabela 1 Własności mechaniczne stali S960 MC i stali S690 QL

Stal	Granica plastyczności YS, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie UTS, MPa	Wydłużenie względne A ₅ , %
S690 QL	692	910	14,2
S960 MC	950	1250	8,1

Oba gatunki stali mają różne właściwości mechaniczne, co dodatkowo utrudnia prawidłowe wykonanie złącza mieszanego. Granica plastyczności, wytrzymałości i wydłużenie względne są na różnym poziomie. Stale te różnią się także składem chemicznym (Tab. 2).

Obie stale mają kontrolowaną zawartość Al i B na poziomie, który nie pogarsza spawalności stali. W obu można także zaobserwować podwyższoną zawartość siarki, która może sprzyjać powstawaniu siarczkowych wtrąceń niemetalicznych MnS. Skład chemiczny obu badanymi stali gwarantuje wysoką wytrzymałość, ale nie sprzyja dobrej spawalności [7].

Postanowiono wykonać złącze mieszane stali S960 MC / stal S690 QL o grubości 6 mm, stosując proces MAG. Testowano dwie różne argonowo-tlenowe mieszanki osłonowe, odpowiednio o zawartości 2% O₂ i 3% O₂. Dodatkowo testowano dwa druty elektrodowe: UNION X96 (EN ISO 16834-A G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo) oraz drut UNION X90 (EN ISO 16834-A G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo) o następującym składzie chemicznym (Tab. 3).

Tabela 2 Skład chemiczny stali S960 MC i stali S690 QL, % [7]

Stal	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	B
S690 QL	0,21	0,8	1,7	0,025	0,015	0,009	1,55	0,5	0,7	0,06	2,1	0,05	0,12	0,005
S960 MC	0,12	0,25	1,3	0,02	0,01	0,015	0,8	0,3	0,7	0,05	2,0	0,07	0,05	0,005

Tabela 3 Druty elektrodowe stosowane w badaniach – skład chemiczny [10]

UNION	C%	Si%	Mn%	P%	Cr%	Mo%	Ni%	Ti%
X90	0,10	0,8	1,8	0,010	0,35	0,6	2,3	0,005
X96	0,11	0,8	1,8	0,010	0,45	0,65	2,45	0,007

W badaniach skupiono się przede wszystkim na wpływie rodzaju gazu osłonowego i rodzaju drutu elektrodowego o różnej zawartości Cr, Ni i Mo na własności mechaniczne i na poprawność wykonanego złącza MAG. W obu drutach elektrodowych można zaobserwować mniejszą zawartość C i Ti w stosunku do zawartości tych pierwiastków w stalach S690 QL i S960 MC, co sprzyja poprawie spawalności złącza mieszanego z tych stali.

Parametry spawania były następujące: średnica drutu elektrodowego wynosiła 1,0 mm, napięcie łuku 21 V, natężenie prądu spawania 121 A. Spoina miała charakter wielościęgowy. Prędkość spawania wynosiła 400 mm/min. Mieszanki osłonowe w procesie MAG stanowiły Ar + 2% O₂ oraz następnie Ar + 3% O₂. Wykonano złącza przy podgrzewaniu wstępnym do temperatury 120°C.

3. REZULTATY I Dyskusja

Po spawaniu MAG w osłonie dwóch testowanych mieszanek (Ar + 2% O₂ oraz Ar + 3% O₂) i z użyciem dwóch badanych drutów elektrodowych (UNION X90 i UNION X96) przeprowadzono badania nieniszczące i niszczące.

W ramach badań nieniszczących (NDT) zrealizowano:

- badanie wizualne (VT) wykonanych złączy spawanych, które przeprowadzono wg wymagań normy PN-EN ISO 17638, kryteria oceny wg EN ISO 5817, okiem uzbrojonym w lupę przy powiększeniu 3x,
- badanie magnetyczno-proszkowe (MT) – które wykonano wg normy PN-EN ISO 17638. Ocenę badań dokonano wg EN ISO 5817 defektoskopem magnetycznym typu REM 230.

Rezultaty badań nieniszczących wykonanych złączy przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4 Ocena badań nieniszczących złącza

Gaz osłonowy	Drut elektrodowy	Obserwacja
Ar + 2% O ₂	UNION X90	Brak pęknięć
Ar + 2% O ₂	UNION X96	Brak pęknięć
Ar + 3% O ₂	UNION X90	Pęknięcia w SWC
Ar + 3% O ₂	UNION X96	Pęknięcia w spoinach i w SWC

Z danych tablicowych wynika, że tylko mieszanka gazowa Ar + 2% O₂ jest właściwa do zastosowania. Mieszanka Ar + 3% O₂ ma bardziej utleniający charakter stopiwa od mieszanki Ar + 2% O₂, co sprawia, że łatwiej powstają pęknięcia w złączu wykonanym z osłonową mieszanką Ar + 3% O₂. W bardziej utlenionym stopiwie występują większe ilości tlenkowych wtrąceń niemetalicznych (i o większym rozmiarze) mających bezpośredni wpływ na powstawanie pęknięć w spoinie.

Do dalszych badań (niszczących) brano pod uwagę złącza mieszane wykonane dwoma badanymi drutami elektrodowymi w osłonie mieszanki Ar + 2% O₂ po podgrzewaniu wstępnym do temperatury 120°C. Wytrzymałość wykonanych połączeń przetestowana została przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369. Wyniki badań wytrzymałościowych (średnia z 3 prób) przedstawiono w Tabeli 5.

Tabela 5 Rezultaty testów wytrzymałościowych złącza wykonanego z dwóch gatunków stali: S690 QL oraz S960 MC

Gaz osłonowy	Drut elektrodowy	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
Ar + 2% O ₂	UNION X90	427	701	7,1
Ar + 2% O ₂	UNION X96	435	717	6,8

Z danych tablicowych wynika, że uzyskano wysoką wytrzymałość (na poziomie 700 MPa) i akceptowalne wydłużenie względne (na poziomie 7%). Wytrzymałość złącza mieszanego jest dużo mniejsza od wytrzymałości obu spawanych ze sobą gatunków stali S690 QL. Następnie przeprowadzono próbę zginania dla złączy mieszanych wykonanych tylko w osłonowej mieszance gazowej Ar + 2% O₂ z wykorzystaniem dwóch badanych drutów elektrodowych, po podgrzewaniu wstępnym do temperatury 120°C. Wykonano 5 pomiarów w próbie zginania dla każdej badanej grubości złącza od strony grani oraz od strony lica. Nie odnotowano pęknięć w spoinie i w SWC zarówno od strony grani, jak i lica. Próba zginania została przeprowadzona prawidłowo, nie wykryto pęknięć oraz innych niezgodności we wszystkich badanych złączach mieszanych.

W dalszej części badań wykonano analizę makro- i mikrostruktury. Po spawaniu stali S690 QL ze stalą S960 MC procesem MAG dwoma badanymi drutami elektrodowymi (UNION X90 i UNION X96) oraz w osłonie dwóch stosowanych

do badań mieszanek osłonowych (Ar + 2% O₂ i Ar + 3% O₂) obserwowano dominującą strukturę martenzytyczną, co świadczy o tym, że złącze może być dodatkowo podatne na pęknięcia. Analiza makrostruktur nie wykazała pęknięć.

4. PODSUMOWANIE

Z badań o charakterze nieniszczącym i niszczącym można wywnioskować, że zastosowanie osłonowej mieszanki gazowej Ar-2%O₂ pozwala na uzyskanie stosunkowo dobrej granicy plastyczności i wytrzymałości złącza. Zastosowanie osłonowej mieszanki gazowej Ar-2%O₂ pozwala także na

uzyskanie lepszych własności plastycznych, czego miarą jest wydłużenie względne na poziomie 7%. Dobre własności plastyczne złącza potwierdziło badanie zginania próbek. Oba druty elektrodowe (UNION X90 i UNION X96) mogą być wykorzystane do wykonania złącza mieszanego ze stali S690 QL i S960 MC. Stosując drut elektrodowy UNION X96, można uzyskać nieco wyższą R_m i R_e. Stosując drut elektrodowy UNION X90, można uzyskać nieco wyższe wydłużenie względne.

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

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jaewon L., Kamran A., Jwo P., Modeling of failure mode of laser welds in lap-shear specimens of HSLA steel sheets, *Engineering Fracture Mechanics* 2011, 1, pp. 347-396.
- [2] Darabi J., Ekula K., Development of a chip-integrated micro cooling device, *Microelectronics Journal* 2003, 34(11), pp. 1067-1074, <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2003.09.010>.
- [3] Hadryś D., Impact load of welds after micro-jet cooling, *Archives of Metallurgy and Materials* 2015, 60(4), pp. 2525-2528, <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0409>.
- [4] Muszynski T., Mikielewicz D., Structural optimization of microjet array cooling system, *Applied Thermal Engineering* 2017, 123, pp. 103-110, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.082>.
- [5] Celin R., Burja J., Effect of cooling rates on the weld heat affected zone coarse grain microstructure, *Metallurgical and Materials Engineering* 2018, 24(1), pp. 37-44.
- [6] Walsh S. M., Smith J. P., Browne E. A., Hennighausen T. W., Malouin B. A., Practical Concerns for Adoption of Microjet Cooling, *ASME Proceedings 2018 Power Electronics, Energy Conversion, and Storage*, <https://doi.org/10.1115/IPACK2018-8468>.
- [7] Strona internetowa producenta stali Htsteelmill: http://www.htsteelmill.com/s690ql-steel-plate.html?gclid=EAlalQobChMIoqT4o9Gw6QIVGoGyCh2PtQupEAAYAiAAEgKgsfD_BwE.