

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Spawanie MAG cienkościennych konstrukcji środków transportu ze stali S690 QL

*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, stal S690 QL

STRESZCZENIE:

Ważnym materiałem stosowanym w budowie środków transportu są stale o podwyższonej wytrzymałości z uwagi na ich wysoką granicę plastyczności na poziomie 900 MPa i wytrzymałość na poziomie 1300 MPa. Złącza z tych stali nie mają porównywalnych własności mechanicznych. Celem artykułu jest prawidłowy dobór parametrów do spawania cienkościennych konstrukcji podestu ruchomego ze stali S690 QL. Postanowiono sprawdzić wpływ parametrów spawania na poprawność wykonanego złącza.

MAG welding parameters for thin structures of means of transport made of S690 QL steel

Keywords: civil engineering, transport, means of transport, S690 QL steel

ABSTRACT:

Recently, more and more often used material in the construction of means of transport are high strengths steels due to their high yield strength of 900 MPa, UTS on the level of 1300 MPa. The joints of these steels are difficult to weld and can not guarantee good plastic properties. The purpose of the article is to choose the parameters for welding thin structures made of S690 QL steel. It was decided to check the welding parameters on the correctness of the joint made.

1. WSTĘP

Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie wyników badań prowadzących do dobrania parametrów spawania MAG cienkościennej konstrukcji ze stali o podwyższonej granicy plastyczności S690 QL. Symbole tej stali oznaczają odpowiednio [7]:

- **S:** *structural steel* (stal konstrukcyjna),
- **690:** minimalna wartość granicy plastyczności (690 MPa),
- **Q:** *Quenching & Tempering* (hartowanie, odpuszczanie),
- **L:** *low notch toughness testing temperature* (dobra udarność w niskich temperaturach).

Stale o podwyższonej granicy plastyczności znajdują coraz szersze zastosowanie w inżynierii lądowej i w budowie środków transportu z uwagi na ich wysoką granicę plastyczności na poziomie 900 MPa [1-2]. Zaletą stali S690 QL jest korzystna wartość wydłużenia względnego na poziomie 14%, co stanowi dwukrotnie większą wartość od rejestrowanego wydłużenia względnego dla stali wysokowytrzymałych z grupy AHSS [3-4]. W trakcie spawania stali o podwyższonej granicy plastyczności zalecane jest ograniczenie energii liniowej w trakcie spawania do poziomu 3,5 kJ/cm [5] i stosowanie osuszającego podgrzewania wstępnego.

2. MATERIAŁY STOSOWANE DO BADAŃ

Stal S690 QL uznawana jest za trudnospawalną, ponieważ zarówno spoina, jak i strefa wpływu ciepła podatna jest na pęknięcia. Głównym problemem spawalniczym tej grupy stali jest zarówno dużo niższa wytrzymałość, jak i gorsze własności plastyczne powstałego złącza od materiału rodzimego [6]. Tablica 1 prezentuje własności mechaniczne stali S690 QL w stanie dostarczenia.

Tabela 1 Stal S690 QL i jej własności mechaniczne

Granica plastyczności $R_{e'}$ MPa	Wytrzymałość na rozciąganie $R_{m'}$ MPa	Wydłużenie $A_{5'}$ %	Udarność KV, J w 0°C
690	905	14,1	50

Stal S690 QL ma dużo większą zawartość tytanu niż konstrukcyjne stale niestopowe wykorzystywane w budowie środków transportu i w inżynierii

lądowej. Przyjmuje się, że zawartość Ti w spawalnych stalach nie powinna przekraczać 0,003% [6]. W stali S690 QL poziom tytanu wynosi 0,05%. Na uwagę zasługuje również łączna wysoka zawartość fosforu i siarki w stali sięgająca 0,04% (Tab. 2). Ten skład chemiczny pozwala na podwyższenie wytrzymałości stali z zachowaniem akceptowalnych własności plastycznych.

Tabela 2 Stal S690 QL – skład chemiczny, % [7]

C	Si	Mn	P	S	N	B	
0,21	0,8	1,7	0,025	0,015	0,015	0,005	
Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr
1,55	0,5	0,7	0,06	2,1	0,05	0,12	0,15

Do oceny spawalności stali S690 QL zastosowano blachę o grubości 3 mm.

Postanowiono wykonać złącza z wykorzystaniem procesu MAG (*Metal Active Gas*), stosując jako gaz osłonowy dwie różne mieszanki argonu z ditlenkiem węgla. Dobrano drut elektrodowy UNION X96 (EN ISO 16834-A G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo). W badaniach skupiono się przede wszystkim na wpływie gazu osłonowego i podgrzewania wstępnego na poprawność wykonanego złącza MAG (proces 135).

Skład chemiczny drutu elektrodowego podano w Tabeli 3.

Tabela 3 Drut elektrodowy UNION X96 – skład chemiczny [8]

C%	Si%	Mn%	P%	Cr%	Mo%	Ni%	Ti%
0,1	0,8	1,8	0,010	0,45	0,65	2,45	0,007

Skład chemiczny drutu jest dość zbliżony do składu materiału rodzimego. W drucie elektrodowym wprowadzono chrom dla podwyższenia wytrzymałości oraz nikiel i molibden dla poprawy własności plastycznych do poziomu podobnego jak w spawanej stali.

Parametry spawania były następujące: średnica drutu elektrodowego wynosiła 1,0 mm, napięcie łuku 19 V, natężenie prądu spawania 117 A. Spoina miała charakter jednościegowy. Prędkość spawania wynosiła 350 mm/min. Mieszanki osłonowe stanowiły Ar + 18% CO₂ oraz następnie Ar + 10% CO₂. Wykonano złącza bez podgrzewania wstępnego oraz przy podgrzewaniu wstępnym do temperatury 70°C.

3. REZULTATY I Dyskusja

Po spawaniu MAG w osłonie mieszanki Ar + 18% CO₂ (a następnie Ar + 10% CO₂) przeprowadzono badania nieniszczące (NDT) i niszczące.

W ramach badań nieniszczących zrealizowano:

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

Rezultaty powstałych połączeń podestu ruchomego przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4 Ocena badań nieniszczących złącza podestu ruchomego

Gaz osłonowy	Bez podgrzewania wstępnego	Z podgrzewaniem wstępnym, 70°C
Mieszanka Ar + 18% CO ₂	Pęknięcia w spoinach i w SWC	Brak pęknięć
Mieszanka Ar + 10% CO ₂	Pęknięcia w spoinach i w SWC	Brak pęknięć

Z danych tablicowych wynika, że do prawidłowego spawania stali STAL S690 QL potrzebne jest osuszające podgrzewanie wstępne. Zastosowano dwie różne mieszanki gazów osłonowych. W obu przypadkach uzyskano porównywalne efekty świadczące o tym, że obie osłonowe mieszanki gazowe są prawidłowe. Na podstawie przeprowadzonych badań nieniszczących uznano, że temperatura podgrzewania wstępnego na poziomie 70°C jest wystarczająca.

Do dalszych badań (niszczących) brano pod uwagę tylko złącza wykonane z podgrzewaniem wstępnym. Wytrzymałość wykonanych połączeń przetestowana została przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369. Wyniki badań wytrzymałościowych (średnia z 3 prób) przedstawiono w Tabeli 5.

Z danych tablicowych wynika, że uzyskano wysoką wytrzymałość i akceptowalne, porównywalne własności plastyczne we wszystkich testowanych przypadkach. Nieco wyższą wytrzymałość i granicę plastyczności mają złącza spawane MAG

Tabela 5 Rezultaty testów wytrzymałościowych stali STAL S690 QL po spawaniu z wykorzystaniem podgrzewania wstępnego do temp. 70°C

Gaz osłonowy	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
Ar + 18% CO ₂	419	671	11,8
Ar + 10% CO ₂	434	675	12,1

w osłonie mieszanki Ar + 10% CO₂. Zastosowanie mieszanki Ar + 10% CO₂ okazało się korzystniejsze, gwarantując wydłużenie względne złącza powyżej 12%.

Następnie przeprowadzono próbę zginania dla wszystkich złączy wykonanych po podgrzewaniu wstępnym do temperatury 70°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 ze stali S690 QL.

W dalszej części badań wykonano analizę mikrostruktury. Po spawaniu MAG w osłonie obu mieszanek obserwowano dominującą strukturę martenzytyczną, co świadczy o tym, że złącze może być podatne na pęknięcia. Analiza struktur nie wykazała pęknięć. Dodatkowo postanowiono sprawdzić udarność złącza. W tym celu pospawano MAG blachy o grubości 6 mm, wykorzystując parametry z poprzedniego procesu: średnica drutu elektrodowego wynosiła 1,0 mm, napięcie łuku 19 V, natężenie prądu spawania 117 A. Prędkość spawania wynosiła 350 mm/min. Mieszanki osłonowe stanowiły ponownie Ar + 18% CO₂ oraz Ar + 10% CO₂. Spoina miała charakter wielościągowy. Wykonano złącza wyłącznie z podgrzewaniem wstępnym do temperatury 70°C. Wyniki badań udarności przedstawiono w Tabeli 6.

Tabela 6 Udarność złącza

Gaz osłonowy	KV, J temp. 0°C	KV, J temp. -20°C
Mieszanka Ar + 18% CO ₂	42	31
Mieszanka Ar + 10% CO ₂	48	35

Z analizy Tabeli 6 wynika, że spawalnicze kryterium minimalnej wartości 47 J jest spełnione tylko w jednym przypadku, w temp. 0°C. Nie jest spełnione kryterium drugiej klasy udarności, które zakłada, że energia próbki w temperaturze -20°C byłaby większa niż wymagane 47 J. Badania udarności stanowią uzupełnienie do wyżej przedstawionych badań. Nie są to dokładnie te same warunki spawalnicze ze względu na inną grubość blachy, gdyż dla próbki wyciętej z blachy o grubości 3 mm nie przeprowadza się badań udarności. Podobnie jak w poprzednich przypadkach korzystniejsza jest argonowa mieszanka osłonowa zawierająca 10% ditlenku węgla.

4. PODSUMOWANIE

Trudnospawalnym materiałem stosowanym w inżynierii lądowej i w transporcie są stale o podwyższonej granicy plastyczności. Z badań nieniszczących wynika, że do uzyskania prawidłowego

złącza ze stali STAL S690 QL potrzebne jest podgrzewanie wstępne do poziomu 70°C. Z badań o charakterze niszczącym można wywnioskować, że zastosowanie osłonowej mieszanki gazowej 90% Ar – 10% CO₂ pozwala na uzyskanie dobrych własności mechanicznych złącza, czego miarą jest R_m na poziomie 675 MPa, R_e na poziomie 434 MPa, wydłużenie względne na poziomie 12%. Gorsze efekty uzyskano po spawaniu złącza z bardziej utleniającą osłonową mieszanką gazową 82% Ar – 18%CO₂. Dobre własności mechaniczne złącza potwierdziła próba zginania. Dodatkowe badania udarności dla innej grubości blachy z badanej stali STAL S690 QL wykazały, że uzyskanie dobrej udarności (powyżej 47 J) jest możliwe tylko w temperaturze 0°C przy zastosowaniu w procesie MAG mniej utleniającej osłonowej mieszanki gazowej 90% Ar –10% CO.

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=EAlaIqobChMIoqT4o9Gw6QIVGoGyCh2PtQupEAAAYiAAEgKgsfD_BwE.