

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Udarność spawanych podpór podestu ruchomego ze stali S690 QL

*BOŻENA SZCZUCKA-LASOTA¹, TOMASZ WĘGRZYN², JERZY KALWAS³, ADAM JUREK⁴,
KRZYSZTOF I. WILCZYŃSKI⁵*

^{1,2}POLITECHNIKA ŚLĄSKA, ³COBRABiD, ⁴NOVAR SP. Z O. O. GLIWICE, GLIWICE, POLAND,

⁵POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Słowa kluczowe: inżynieria lądowa, transport, środki transportu, stal S690 QL

STRESZCZENIE:

Do budowy podestów ruchomych stosuje się różne gatunki stali o różnej wytrzymałości na rozciąganie. Przeważnie są stale konstrukcyjne wysoko wytrzymałe (AHSS), stale niestopowe i stale o podwyższonej granicy plastyczności. Przykładem stali o podwyższonej granicy plastyczności jest S690 QL z uwagi na wysoką granicę plastyczności na poziomie 900 MPa. Złącza z tych stali mają dobrą wytrzymałość, ale niską udarność w ujemnych temperaturach. Celem prac opisanych w artykule jest prawidłowy dobór parametrów do spawania podpór podestu ruchomego wykonanego ze stali S690 QL o grubości 12 mm. Postanowiono sprawdzić wpływ parametrów spawania na poprawność wykonanego złącza.

Impact strength of welded platform supports made of S690 QL steel

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

ABSTRACT:

Various grades of steel and tensile strength are used to build mobile platforms. They are usually high strength structural steels (AHSS), low-alloy steels and steels with high yield strength. An example of steel with an increased yield strength is S690 QL due to the high yield strength of 900 MPa. The joints of these steels have good strength but low impact toughness at negative temperatures. The purpose of the article is the correct selection of parameters for welding the supports of a movable platform made of 12 mm thick S690 QL steel. It was decided to check the influence of welding parameters on the correctness of the joint made.

1. WSTĘP

Artykuł ma na celu przedstawienie wyników badań prowadzących do dobrania parametrów spawania MAG konstrukcji podpory podestu ruchomego 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 [1-2]. Zaletą tej grupy stali jest korzystna wartość wydłużenia względnego na poziomie 14%, która jest dwukrotnie wyższa od wartości wydłużenia charakteryzującego stale wysokowytrzymałe z grupy AHSS [3-4]. Zalecane jest ograniczenie energii liniowej w trakcie spawania stali o podwyższonej granicy plastyczności do poziomu 3,5 kJ/cm [5] i stosowanie podgrzewania wstępnego. W zależności od zwiększania grubości spawanych blach powinna odpowiednio wzrastać temperatura podgrzewania wstępnego. Producenci nie informują o zasadach doboru temperatury podgrzewania wstępnego dla tego gatunku stali [7]. W artykule postanowiono dobrać najwłaściwsze parametry do spawania stali S690 QL (typowej stali o podwyższonej granicy plastyczności) w celu zapewnienia złączom jak najlepszej udarności w niskich temperaturach.

2. MATERIAŁY STOSOWANE DO BADAŃ

Stal S690 QL uznawana jest za trudnospawalną, ponieważ złącze jest podatne na pęknięcia. Głównym problemem spawalniczym tej grupy stali jest niższa udarność i wytrzymałość powstałego złącza od materiału rodzimego [6]. Tabela 1 prezentuje własności mechaniczne stali S690 QL o grubości 12 mm 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
692	910	14,2	55

Stal S690 QL ma wielokrotnie większą zawartość tytanu i azotu niż konstrukcyjne stale niestopowe wykorzystywane w budowie środków transportu i w inżynierii lądowej. Przyjmuje się, że zawartość Ti w spawalnych stalach konstrukcyjnych nie powinna przekraczać 30 ppm (0,003%), a zawartość N nie powinna przekraczać 50 ppm (0,005%) [6]. Duże powinowactwo tytanu do azotu sprawia, że w spoinie mogą powstawać azotkowe wtrącenia niemetaliczne TiN, które mogą sprzyjać pęknięciom. Z uwagi na duże powinowactwo tytanu do tlenu powinno się stosować do spawania stali S690 QL tylko procesy niskotlenowe, by zapobiec pojawianiu się tlenkowych wtrąceń niemetalicznych TiO w spoinie, mogących mieć wpływ na powstawanie pęknięć. Na uwagę zasługuje łączna większa zawartość fosforu i siarki w stali na poziomie 0,04%. Z kolei duża zawartość Mn i S w stali może sprzyjać powstawaniu siarczkowych wtrąceń niemetalicznych MnS. Z tego samego powodu powinno się spawać stal S690 QL niskotlenowymi procesami, by ograniczać powstawanie tlenkowych wtrąceń MnO. Skład chemiczny stali S690 QL gwarantuje jej wysoką wytrzymałość, ale nie sprzyja dobrej spawalności (Tab. 2).

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

C	Si	Mn	P	S	N	Mo	Nb	Ni	Ti
0,21	0,8	1,7	0,025	0,015	0,015	0,7	0,06	2,1	0,05

Do oceny spawalności stali STAL S690 QL zastosowano blachę o grubości 12 mm.

Postanowiono wykonać złącza z wykorzystaniem procesu MAG (*Metal Active Gas*), stosując wg zaleceń jako gaz osłonowy dwie różne niskotlenowe mieszanki argonu z ditlenkiem węgla [7]. Dobrano drut elektrodowy UNION X96 (EN ISO 16834-A G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo). W badaniach skupiono się przede wszystkim na wpływie rodzaju gazu osłonowego i podgrzewania wstępnego na poprawność wykonanego złącza MAG.

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

W drucie elektrodowym wprowadzono chrom dla zapewnienia wysokiej wytrzymałości złącza oraz nikiel i molibden dla poprawy jego własności plastycznych. Można zaobserwować mniejszą zawartość C i Ti w drucie elektrodowym w stosunku do zawartości tych pierwiastków w stali S690 QL, co powinno poprawić spawalność stali.

Parametry spawania były następujące: średnica drutu elektrodowego wynosiła 1,0 mm, napięcie łuku 19 V, natężenie prądu spawania 119 A. Spoina miała charakter wielościęgowy. Prędkość spawania wynosiła 434 mm/min. Niskotlenowe mieszanki osłonowe w procesie MAG stanowiły Ar + 10% CO₂ oraz następnie Ar + 2% O₂. Wykonano złącza przy podgrzewaniu wstępnym do trzech różnych badanych temperatur: 90°C, 120°C, 150°C.

3. REZULTATY I DYSKUSJA

Po spawaniu MAG w osłonie dwóch badanych niskotlenowych mieszanek (Ar + 10% CO₂ oraz Ar + 2% O₂) z podgrzewaniem wstępnym w trzech różnych temperaturach (90°C, 120°C, 150°C) 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 badanych złączy przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4 Ocena badań nieniszczących złącza

Gaz osłonowy	Temperatura podgrzewania wstępnego, 90°C	Temperatura podgrzewania wstępnego, 120°C	Temperatura podgrzewania wstępnego, 150°C
mieszanka Ar + 10% CO ₂	Pęknięcia w SWC	Brak pęknięć	Brak pęknięć
mieszanka Ar + 2% O ₂	Pęknięcia w spoinach i w SWC	Pęknięcia w SWC	Brak pęknięć

Z danych tablicowych wynika, że do prawidłowego spawania stali STAL S690 QL potrzebne jest podgrzewanie wstępne minimum do temperatury 120°C pod warunkiem zastosowania osłonowej mieszanki gazowej Ar + 10% CO₂. Przyjmuje się, że CO₂ dodawany w mieszance argonowej ma charakter 15-krotnie mniej utleniający od tlenu [6]. Zatem można przyjąć, że 2% O₂ w argonowej mieszance odpowiada zawartości 30% CO₂. Reasumując, mieszanka Ar + 10% CO₂ ma wyraźnie mniej utleniający charakter od mieszanki Ar + 2% O₂, co sprawia, że łatwiej powstają pęknięcia w złączu wykonanym z osłonową mieszanką Ar + 2% O₂, która bardziej utlenia stopiwo, co z kolei sprzyja wydzielaniu się większej ilości tlenkowych wtrąceń niemetalicznych mających bezpośredni wpływ na inicjację pęknięć.

Do dalszych badań (niszczących) brano pod uwagę głównie złącza wykonane w osłonie niskotlenowej mieszanki Ar + 10% CO₂ z podgrzewaniem 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 stali S690 QL po spawaniu z wykorzystaniem podgrzewania wstępnego do temp. 120°C

Gaz osłonowy	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
Ar + 10% CO ₂	426	670	11,5

Z danych tablicowych wynika, że uzyskano wysoką wytrzymałość i akceptowalne własności plastyczne (średnia z 3 pomiarów).

Następnie przeprowadzono próbę zginania dla wszystkich złączy wykonanych w osłonowej mieszance gazowej Ar + 10% CO₂ 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 ze stali S690 QL.

W dalszej części badań wykonano analizę makro- i mikrostruktury. Po spawaniu stali S690 QL procesem MAG zarówno w osłonie Ar + 10% CO₂, jak i w osłonie Ar + 2% O₂ obserwowano dominującą strukturę martenzytyczną, co świadczy o

tym, że złącze może być dodatkowo podatne na pęknięcia. Analiza makrostruktur nie wykazała jednak pęknięć. Głównym punktem badań było sprawdzenie udarności złącza. W tym celu zbadano wszystkie testowane złącza, w których nie obserwowano pęknięć (na podstawie badań niszczących):

- Mieszanka Ar + 10% CO₂, temperatura wstępna 120°C,
- Mieszanka Ar + 10% CO₂, temperatura wstępna 150°C,
- Mieszanka Ar + 2% O₂, temperatura wstępna 150°C.

Wyniki badań udarności przedstawiono w Tabeli 6.

Tabela 6 Udarność złączy wykonanych przy różnych parametrach

Gaz osłonowy	Temp. podgrzewania wstępnego, °C	KV, J Temp. 0°C	KV, J Temp. -20°C	KV, J Temp. -30°C
Mieszanka Ar + 10% CO ₂	120	48	36	27
Mieszanka Ar + 10% CO ₂	150	49	41	29
Mieszanka Ar + 2% O ₂	150	43	31	22

Z analizy Tabeli 6 wynika, że spawalnicze kryterium minimalnej wartości 47 J jest spełnione tylko w przypadku łamania próbki w temperaturze 0°C. Nie jest spełnione kryterium drugiej ani trzeciej klasy udarności, które zakłada, że energia łamania próbki w temperaturze -20°C i odpo-

wiednio -30°C byłaby na poziomie minimum 47 J. Badania udarności potwierdziły, że argonowa mieszanka osłonowa Ar + 10% CO₂ jest korzystniejsza od mieszanki Ar + 2% O₂, po zastosowaniu której nie uzyskano udarności na wymaganym poziomie 47 J.

4. PODSUMOWANIE

Trudnospawalnym materiałem stosowanym do budowy podpór podestów ruchomych są stale o podwyższonej granicy plastyczności. Wysoka wytrzymałość stali z tej grupy materiałowej, S690 QL, jest znacznie większa od wytrzymałości złącza spawanego. Z badań niszczących wynika, że do uzyskania prawidłowego złącza ze stali S690 QL potrzebne jest podgrzewanie wstępne przed spawaniem do poziomu 120°C. Z analizy wyników badań o charakterze niszczącym można wywnioskować, że zastosowanie osłonowej mieszanki gazowej 90% Ar – 10% CO₂ pozwala na uzyskanie wysokiej granicy plastyczności i wytrzymałości złącza. Zastosowanie osłonowej mieszanki gazowej 90% Ar – 10% CO₂ pozwala na uzyskanie lepszych własności plastycznych, czego miarą jest wydłużenie względne na poziomie 11,5%. Dobre własności plastyczne złącza potwierdziły badania udarności, które wykazały, że możliwe jest jej uzyskanie (ponad wymagane 47 J) w temperaturze 0°C stosując w procesie MAG osłonową mieszankę gazową 90% Ar – 10% CO₂.

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=EAIaIQobChMloqT4o9Gw6QIVGoGyCh2PtQupEAAAYAiAAEgKgsfD_BwE.