

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Parametry spawania cienkościennych konstrukcji środków transportu ze stali DOCOL 1400M

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

^{1,2}POLITECHNIKA ŚLĄSKA, ³CENTRALNY OŚRODEK BADAWCZO ROZWOJOWY APARATURY BADAWCZEJ I DYDAKTYCZNEJ COBRABID WARSZAWA, ⁴NOVAR SP. Z O.O. GLIWICE, ⁵POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Słowa kluczowe: inżynieria lądowa, transport, środki transportu, stal AHSS

STRESZCZENIE:

Ostatnio coraz częściej stosowanym materiałem w budowie środków transportu są stale z grupy AHSS (AHSS – *Advanced High-Strength Steel*) z uwagi na ich dużą wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 1500 MPa. Złącza z tych stali są trudnospawalne ze względu na dominującą strukturę martenzytyczną. Celem prac opisanych w artykule jest dobór parametrów do spawania cienkościennych konstrukcji ze stali AHSS na przykładzie stali DOCOL 1400M. Postanowiono sprawdzić wpływ energii liniowej spawania i podgrzewania wstępnego na poprawność wykonanego złącza.

Welding parameters for thin structures of means of transport made of DOCOL steel

Keywords: civil engineering, transport, means of transport, AHSS steel

ABSTRACT:

Recently, more and more often used material in the construction of means of transport are steels from the AHSS group (AHSS – *Advanced High-Strength Steel*) due to their high tensile strength of 1500 MPa. The joints of these steels are difficult to weld due to the dominant martensitic structure. The purpose of the article is to choose the parameters for welding thin structures made of AHSS steel on the example of DOCOL 1400M steel. It was decided to check the influence of preheating and linear energy on the correctness of the joint made.

1. WSTĘP

W inżynierii lądowej i w transporcie stosuje się coraz to bardziej wytrzymałe stopy. Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie wyników badań prowadzących do dobrania parametrów spawania cienkościennej konstrukcji ze stali DOCOL 1400M z grupy AHSS.

Stale DOCOL 1400 znajdują coraz szersze zastosowanie w inżynierii lądowej i w budowie środków transportu z uwagi na ich dużą wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 1500 MPa z równocześnie wysoką granicą plastyczności na poziomie 1200 MPa. Wadą tej stali jest to, że oprócz wysokiej wytrzymałości nie charakteryzuje się dobrymi własnościami plastycznymi, czego miarą jest wydłużenie względne na poziomie 7-8% [2-4]. Podczas spawania stali DOCOL 1400M pogarszają się własności mechaniczne w SWC. Wytrzymałość złącza i wydłużenie względne są przez to znacznie mniejsze od wytrzymałości materiału rodzimego. Zalecane jest zatem ograniczenie energii liniowej w trakcie spawania do poziomu 5 kJ/cm [5]. Stal DOCOL 1400M stosuje się przede wszystkim na cienkościenne konstrukcje, bo jej wysoka wytrzymałość pozwala na zmniejszenie masy całkowitej konstrukcji środków transportu.

2. MATERIAŁY STOSOWANE DO BADAŃ

Stale z grupy AHSS uznawane są za trudnospalne, ponieważ strefa wpływu ciepła podatna jest na pęknięcia. Jest to efekt struktury martenzytycznej owych stali oraz wysokiej twardości materiału. Zasadniczym problemem spawalniczym tej grupy stali jest jednak dużo niższa wytrzymałość powstałego złącza od materiału rodzimego i jeszcze gorsze własności plastyczne [6]. Tabela 1 prezentuje własności mechaniczne stali DOCOL 1400 w stanie dostarczenia.

Tabela 1 Stal DOCOL 1400 i jej własności mechaniczne

Granica plastyczności R_e	Wytrzymałość na rozciąganie R_m	Wydłużenie A_5
MPa	MPa	%
1160	1375	7,2

Stale AHSS charakteryzują się dziesięciokrotnie większą zawartością tytanu i dwukrotnie większą zawartością glinu niż stale węglowo-manganowe wykorzystywane w budowie środków transportu

i w inżynierii lądowej. Możliwe jest to ze względu na bardzo małą zawartość siarki (Tab. 2). Ten skład chemiczny pozwala na podwyższenie wytrzymałości z zachowaniem akceptowalnych własności plastycznych.

Tabela 2 Stal DOCOL 1400 – skład chemiczny [7]

Gatunek stali	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Nb%	Ti%
DOCOL 1400M	0,17	0,20	1,40	0,009	0,002	0,040	0,015	0,025

Do oceny spawalności stali DOCOL 1400M zastosowano blachę o grubości 1,8 mm.

Postanowiono wykonać złącza z wykorzystaniem procesu MAG (*Metal Active Gas*) stosując jako gaz osłonowy mieszankę 82% Ar + 18% CO₂. Dobrano drut elektrodowy UNION X96 (EN ISO 16834-A G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo). W badaniach skupiono się przede wszystkim na wpływie energii liniowej spawania i podgrzewania wstępnego na poprawność wykonanego złącza.

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

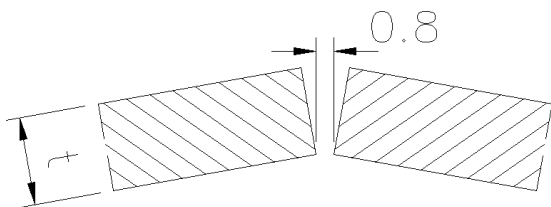
Skład chemiczny drutu nie jest całkiem zbliżony do składu stali. Na uwagę zasługuje czterokrotnie większa zawartość krzemu w drucie niż w stali wpływająca na podwyższenie wytrzymałości. Dodatkowo wprowadzono chrom o stosunkowo dużej zawartości na poziomie 0,45%, co bardzo zwiększa wytrzymałość, ale równocześnie obniża udarność złącza. Dla poprawy własności plastycznych złącza wprowadzono do spoiny nikiel (2,45% Ni) i molibden (0,65% Mo). Nikiel wprowadzony do stopiwa o zawartości 2% i molibden wprowadzany do stopiwa o zawartości 0,5% bardzo znacznie podnoszą udarność złącza w ujemnych temperaturach. Dla złączy ze stali węglowo-manganowych oba te pierwiastki wprowadzone do stopiwa gwarantują udarność złącza na poziomie 50 J w temp. -40°C, co spełnia 4 klasę udarności. Podobnie w złączach ze stali AHSS oba pierwiastki poprawiają znacznie własności plastyczne.

Parametry spawania były następujące: średnica drutu elektrodowego wynosiła 1,0 mm, napięcie łuku 20 V, natężenie prądu spawania 118 A, źródło

długości prądu stałego (+) na elektrodzie, spoina miała charakter jednościęgowy. Dla oceny spawalności cienkościennego złącza (o grubości 1,8 mm) postanowiono wyznaczyć właściwą prędkość spawania (prędkość spawania zmieniano dwukrotnie: 300 mm/min i 400 mm/min) oraz temperaturę podgrzewania wstępnego (wykonano złącza bez podgrzewania wstępnego oraz przy podgrzewaniu wstępnym do temperatury 80°C i 120°C) i ustalić, czy podgrzewanie wstępne jest potrzebne do spawania tej konstrukcji.

3. REZULTATY I DISKUSJA

Sposób przygotowania złącza ze stali DOCOL 1400M przedstawiono na Rysunku 1.



Rysunek 1 Sposób przygotowania złącza do spawania MAG

Spawanie wykonano z wykorzystaniem podkładki ceramicznej. Po spawaniu przeprowadzono badania nieniszczące (NDT):

- Badanie wizualne (VT) wykonanych złączy spawanych wykonano 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, urządzeniem do badań był defektoskop magnetyczny typu REM 230.

Rezultaty powstałych połączeń podestu ruchomego przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4 Ocena badań nieniszczących złącza podestu ruchomego

Predkość spawania, mm/min	Bez podgrzewania wstępnego	Podgrzewanie wstępne, 80°C	Podgrzewanie wstępne, 120°C
300	Pęknięcia w spoinach i w SWC	Brak pęknięć	Brak pęknięć
400	Pęknięcia w spoinach i w SWC	Brak pęknięć	Brak pęknięć

Z danych tablicowych wynika, że do prawidłowego spawania stali DOCOL 1400M potrzebne jest podgrzewanie wstępne. Po ocenie złączy badaniami nieniszczącymi postanowiono wykonać badanie wytrzymałości pospawanych elementów podestu na rozciąganie. Badano także prędkość spawania na poziomie 300 mm/min i 400 mm/min. W obu przypadkach uzyskano porównywalne efekty świadczące o tym, że prędkość spawania powinna być w przedziale (300, 400) mm/min. Uznano, że temperatura podgrzewania wstępnego na poziomie 80°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.

Tabela 5 Rezultaty testów wytrzymałościowych stali DOCOL 1400M po spawaniu z wykorzystaniem podgrzewania wstępnego

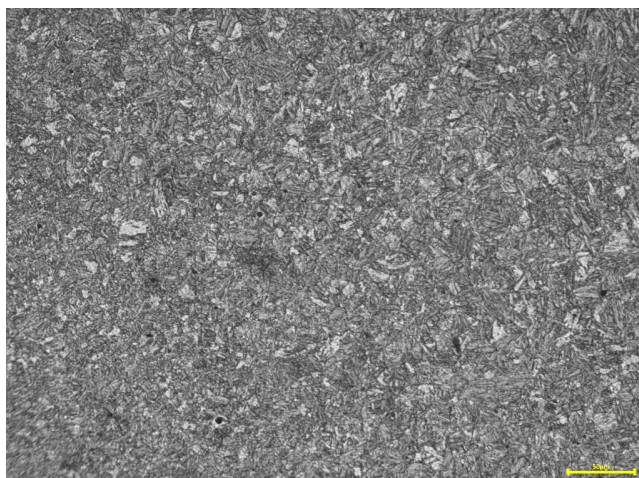
Temp. podgrzewania [°C]; Prędkość [mm/min]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
80°C; 300 mm/min	557	892	6,7
120°C; 300 mm/min	544	884	6,8
80°C; 400 mm/min	559	891	6,7
120°C; 400 mm/min	541	883	6,8

Z danych tablicowych wynika, że temperatura podgrzewania wstępnego i prędkość spawania nie mają dużego wpływu na własności mechaniczne złącza. Uzyskano wysoką wytrzymałość i dobre porównywalne własności plastyczne we wszystkich testowanych przypadkach.

Następnie przeprowadzono próbę zginania dla wszystkich złączy wykonanych po podgrzewaniu wstępnym do temperatury 80°C i 120°C oraz przy dwóch różnych prędkościach spawania (300 i 400 mm/min). Dla próbek o grubości 1,8 mm parametry były następujące: szerokość próbki $b = 20$ mm, trzpień $d = 14$ mm, rozstaw podpór $d + 3a = 31$ mm oraz wymagany kąt gięcia 180°. 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, ocena badań jest pozytywna, ponieważ nie wykryto pęknięć oraz innych niezgodności we wszystkich badanych złączach ze stali DOCOL

1400M (z różną temperaturą wstępną i z różną prędkością spawania).

Następnie wykonano analizę mikrostruktury. Zarówno po podgrzewaniu wstępnym do temperatury 80°C i 120°C, jak i przy dwóch różnych prędkościach spawania (300 i 400 mm/min) obserwowano dominującą strukturę martenzytyczną, która została przedstawiona na Rysunku 2, gdzie widoczny jest martenzyt, gruboziarnisty ferryt i ślady bainitu.



Rysunek 2 Mikrostruktura spoiny stali DOCOL 1400M spawanej MAG w osłonie 82% Ar + 18% CO₂, temperatura podgrzewania wstępnego 80° C, prędkość spawania 300 mm/min

4. PODSUMOWANIE

Coraz częściej stosowanym materiałem w inżynierii lądowej i w transporcie są trudnospawalne stale AHSS. Ich wysoka wytrzymałość jest prawie dwukrotnie większa od wytrzymałości złącza spawanego. Wydłużenie względne dotychczas stosowanych procesów jest na raczej niskim poziomie, czego miarą jest wydłużenie względne na poziomie 6%. Poszukiwane są zatem nowe rozwiązania gwarantujące poprawę spawalności cienkościennej konstrukcji ze stali AHSS, a przy tym pozwalające na zwiększenie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie i poprawienie wydłużenia względnego. Z badań wynika, że do uzyskania prawidłowego złącza ze stali DOCOL 1400M potrzebne jest podgrzewanie wstępne. Dla cienkościennej konstrukcji wystarczająca jest temperatura podgrzewania wstępnego na poziomie 80°C. Badano także prędkość spawania na poziomie 300 mm/min i 400 mm/min. W obu przypadkach uzyskano porównywalne efekty świadczące o tym, że prędkość spawania powinna być w przedziale (300, 400) mm/min.

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., Mikielwicz 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] <https://www.yumpu.com/xx/document/view/11500058/docol-m-zimnowalcowana-stal-martenzytyczna-ssab>.
- [8] https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/grobblech_migration/perform/verarbeitung_1/schweissen_1/klassifikation_der_schweisszusaeetze.pdf.