

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Podgrzewanie wstępne i temperatura warstw międzyściegowych podczas spawania stali DOCOL 1200 M

BOŻENA SZCZUCKA-LASOTA¹, TOMASZ WĘGRZYN², JAN PIWNIK³, ADAM JUREK⁴,
JERZY KALWAS⁵, KRZYSZTOF I. WILCZYŃSKI⁶

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

⁴NOVAR SP. Z O. O. GLIWICE, ^{5,6}COBRABID Sp. z o.o.

Słowa kluczowe: inżynieria lądowa, transport, środki transportu, stale DOCOL

STRESZCZENIE:

Stale z grupy DOCOL charakteryzują się dużą wytrzymałością na rozciąganie i wysoką granicą plastyczności. Złącza z tych stali są trudnospawalne ze względu na dominującą strukturę martenzytyczną i skomplikowaną procedurę związaną z koniecznością ograniczenia zawartości wodoru w stopiwie. Celem artykułu jest dobór prawidłowych parametrów termodynamicznych spawania konstrukcji stosowanych w środkach transportu ze stali DOCOL 1200M. Postanowiono sprawdzić wpływ podgrzewania wstępnego i temperatury warstw międzyściegowych na poprawność wykonanego złącza MAG konstrukcji o grubości 8 mm. Sprawdzone też wytrzymałość złącza i oszacowano zawartość wodoru dyfundującego w stopiwie.

Preheating and temperature of interpass layers for steel DOCOL 1200 M welding

Keywords: civil engineering, transport, means of transport, DOCOL steels

ABSTRACT:

DOCOL grade steels demonstrate a high tensile strength and yield point. Joints made using these steels are difficult to weld due to the dominant martensitic structure and the complicated procedure needed to limit hydrogen in the weld. This article aims to determine the thermodynamic welding parameters for the construction of transport means made of DOCOL 1200M steel. A decision was made to check how preheating and the temperature of interpass layers impact the correctness of a MAG joint in a structure 8 mm thick. The strength of the joint has been verified and the diffusible hydrogen in the weld estimated.

1. WSTĘP

Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie wyników badań prowadzących do dobrania parametrów spawania MAG konstrukcji wykonanej ze stali DOCOL 1200M z grupy AHSS (AHSS – Advanced High-Strength Steel). Stale DOCOL znajdują coraz szersze zastosowanie w inżynierii lądowej i w budowie środków transportu z uwagi na jej wysoką wytrzymałość na poziomie 1200 MPa [1-4]. Wadą tej stali jest jednak niskie wydłużenie względne na poziomie 6% [5-9]. Struktura ta sprzyja powstawaniu pęknięć spawalniczych spowodowanych między innymi:

- naprężeniami spawalniczymi,
- dominującą strukturą martenzytyczną sprzyjającą pęknięciom,
- obecnością gruboziarnistego ferrytu,
- oddziaływaniem wodoru.

W celu obniżenia naprężeń spawalniczych i rozdrobnienia ferrytu rekomenduje się ograniczenie energii liniowej w trakcie spawania do poziomu 4 kJ/cm [10-16]. Natomiast aby obniżyć zawartość wodoru w spoinie, zaleca się stosowanie podgrzewania wstępnego i kontrolowania temperatury warstw międzyściogowych. Podczas spawania uwalniane są bowiem w stopiwie pojedyncze atomy wodoru H, które mogą swobodnie przenikać pomiędzy atomami żelaza, gdzie łączą się w cząsteczkę H₂ (rekombinacja). Akumulacja wodoru wewnątrz metalu powoduje powstawanie ciśnienia wewnętrznego, powodującego naprężenia wewnętrzne materiału, które w konsekwencji prowadzą do powstawania pęknięć wodorowych (HIC – Hydrogen Induced Cracking) [17-21]. W stalach DOCOL nie dochodzi do pęknięć wskutek korozji naprężeniowej pod wpływem działania siarczków (SSCC – Sulfide Stress Corrosion Cracking), gdyż stale te zawierają śladowe zawartości siarki [22-25]. Pękanie HIC w stalach DOCOL jest inicjowane głównie na granicach ziaren martenzyt-ferryt i w kontakcie z wtrąceniami niemetalicznymi [26-31].

Pękanie wodorowe rozprzestrzenia się przeważnie równoległe do powierzchni blachy. Ponieważ istnieje bardzo mało informacji dotyczących niszczenia wodorowego złączy spawanych wykonanych ze stali DOCOL, dlatego zagadnienia te stały się tematem podjętych badań.

2. MATERIAŁY STOSOWANE DO BADAŃ

Do spawania MAG stali DOCOL o grubości 8 mm postanowiono zastosować drut elektrodowy UNION X96 (EN ISO 16834-A G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo). Jako gaz osłonowy wytypowano mieszkankę 90% Ar – 10% CO₂. W przypadku konstrukcji grubościennych zalecono stosowanie podgrzewania wstępnego ze względu na odwodowanie spoiny. W ramach prac badawczych postanowiono wykonać poprawne złącze ze stali DOCOL 1200M z blach o grubości 8 mm, przeznaczonych na konstrukcje środków transportu. W procesie spajania zastosowano różne temperaturowe warunki spawalnicze (podgrzewanie wstępne, zmienne temperatury warstw międzyściogowych).

Zasadniczym problemem spawalniczym tej grupy stali jest dużo niższa wytrzymałość na rozciąganie powstałego złącza od materiału rodzimego i jeszcze gorsze własności plastyczne [13]. Tabela 1 prezentuje własności mechaniczne stali DOCOL 1200M, natomiast Tabela 2 przedstawia skład chemiczny stali DOCOL 1200M.

Tabela 1 Stal DOCOL 1200M i jej własności mechaniczne [13]

Granica plastyczności R _e , MPA	Wytrzymałość na rozciąganie R _m , MPA	Wydłużenie A ₅ , %
730	1190	6,1

Tabela 2 Stal DOCOL 1200M - skład chemiczny [14]

Gatunek stali	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Nb%	Ti%
Docol 1200M	0,15	0,20	1,30	0,008	0,001	0,045	0,009	0,021

Analizując powyższe dane (Tab. 1, 2) można zauważyć, że wysokie własności wytrzymałościowe omawianej stali w porównaniu ze stalami niskostopowymi wynikają ze składu chemicznego. Stal DOCOL 1200M posiada dużo większą zawartość tytanu i glinu niż konstrukcyjne stale niestopowe. W badaniach skupiono się przede wszystkim na ustaleniu wpływu podgrzewania wstępnego i właściwej temperatury warstw międzyściogowych na poprawność wykonanego złącza MAG. Skład chemiczny drutu elektrodowego podano w Tabeli 3.

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

Rodzaj drutu	C%	Si%	Mn%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Ti%
Union X96	0,1	0,8	1,8	0,001	0,45	0,65	2,45	0,007

Skład chemiczny drutu jest nieco odmienny od materiału rodzimego. W drucie elektrodowym UNION X96 wprowadzono chrom i większą zawartość krzemu dla podwyższenia wytrzymałości oraz nikiel i molibden dla poprawy własności plastycznych złącza.

Przed przystąpieniem do wykonania złączy z blach o grubości $t = 8$ mm wykonano ukosowanie na V . Kąt ukosowania wynosił 60° , odległość pomiędzy blachami i próg wynosił 1,5 mm.

Parametry spawania były następujące: średnica drutu elektrodowego UNION X96 wynosiła 1,0 mm, napięcie łuku pierwszej warstwy przetopowej wynosiło 18 V, natężenie prądu spawania wynosiło 114 A. Prędkość spawania pierwszej warstwy wynosiła 300 mm/min. Spoina miała charakter sześciocięgowy. Kolejne warstwy były spawane podwyższonymi parametrami prądowo-napięciowymi (w celu uzyskania głębszego wtopienia), które przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4 Parametry spawania kolejnych warstw złącza ze stali DOCOL 1200M (opracowanie własne)

Numer warstwy (od strony grani)	Napięcie łuku, V	Natężenie prądu, A	Prędkość spawania, mm/min
pierwsza	18	114	320
warstwy 2-6	21	230	340

Wykonano złącza bez podgrzewania wstępnego oraz przy podgrzewaniu wstępnym do temperatury 120°C . Dodatkowo ustalano temperaturę międzyścięgową złącza w trakcie układania warstw 2-6 (130°C , 150°C , 170°C , 190°C).

3. METODY BADAŃ

Po spawaniu MAG przeprowadzono badania nieniszczące (NDT):

- Badanie wizualne (VT) wykonanych złączy spawanych wykonano okiem uzbrojonym w lupę przy powiększeniu $3\times$ – 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

badania dokonano wg EN ISO 5817, urządzeniem do badań defektoskopem magnetycznym typu REM – 230.

Analiza uzyskanych wyników badań nieniszczących pozwoliła wytypować złącza do badania doraźnej wytrzymałości na rozciąganie. Wytrzymałość złączy została wyznaczona przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369. Próbki przebadano również pod względem strukturalnym, przy wykorzystaniu mikroskopu świetlnego (LM). Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 9016 2021. Bezpośrednio po spawaniu postanowiono również sprawdzić zawartość wodoru dyfundującego w spoinie. Badania wykonano wg pogładowej metody glicerynowej opisanej w normie „Oznaczenie całkowitej ilości wodoru w stopiwie stalowych elektrod z otuliną kwaśną, rutyłową lub zasadową. BN-64/4130”, gdyż nie dysponowano aparaturą do precyzyjniejszego oznaczania wodoru wg metody rtęciowej opisanej w normie z 2018 roku „PN_EN_ISO_3690_2005 „Oznaczenie zawartości wodoru w ferrytycznym metalu spoiny”.

4. REZULTATY BADAŃ I ICH ANALIZA

Wynik oceny złączy wykazał wpływ zmiany parametrów procesu (zastosowanie podgrzewania wstępnego, różne temperatury międzyścięgowe). Rezultaty badań wizualnych makroskopowych przeprowadzonych okiem nieuzbrojonym oraz magnetyczno-proszkowych powstałych połączeń podestu ruchomego przedstawiono w Tabeli 5.

Tabela 5 Wyniki badań nieniszczących

Spawanie bez podgrzewania wstępnego	Spawanie z temperaturą 130°C	podgrzewaniem wstępnym do 120°C , międzyścięgowa:		
		150°C	170°C	190°C
Pęknięcia w: spoinach, SWC	Pęknięcia w: spoinach, SWC	Brak pęknięć	Brak pęknięć	Pęknięcia w spoinach

Stwierdzono, że do prawidłowego spawania blach o grubości 8 mm ze stali DOCOL 1200M bezwzględnie potrzebne jest podgrzewanie wstępne do temperatury 120°C . Uznano, że temperatura podgrzewania wstępnego na poziomie 120°C jest wystarczająca, gdyż w złączach tych nie zaobserwowano pęknięć. Równocześnie zauważono, że temperatura międzyścięgowa złącza powinna być w zakresie 150 - 170°C . W złączach wykonanych z podgrzewaniem wstępnym do 120°C i przy tem-

peraturze międzyścięgowej 190°C obserwowano pęknięcia w spoinach z innego powodu. Zawartość wodoru dyfundującego w spoinie była co prawda na niskim poziomie, ale zaobserwowano niepokojące rozszerzanie się strefy wpływu ciepła wraz ze wzrostem temperatury międzyścięgowej. Bezpośrednio po spawaniu sprawdzono zawartość wodoru dyfundującego w spoinie. Wyniki badań przedstawiono w Tabeli 6.

Tabela 6 Wodór dyfundujący w spoinie

Rodzaj próbki	Zawartość wodoru dyfundującego, ml/100 g stopiwa
Bez podgrzewania wstępnego	7,1
Temp. warstwy międzyścięgowej 130°C	6,2
Temp. warstwy międzyścięgowej 150°C	4,3
Temp. warstwy międzyścięgowej 170°C	4,2
Temp. warstwy międzyścięgowej 190°C	3,9

Na podstawie wyników badań przedstawionych w Tabeli 6 stwierdzono, że wodór jest na poziomie 3-5 ml/100 g stopiwa tylko wtedy, gdy równocześnie:

- zastosuje się podgrzewanie wstępne,
- ustali się temperatura międzyścięgową na poziomie 150°C-170°C.

Do dalszych badań niszczących (ocena struktury oraz doraźna wytrzymałość na rozciąganie) brano pod uwagę tylko złącza wykonane z podgrzewaniem wstępnym na poziomie 120°C i z równoczesnym zapewnieniem właściwej temperatury międzyścięgowej. Dominującą strukturą był martenzyt, stwierdzono również występowanie małych ilości bainitu i drobnoziarnistego ferrytu.

Wytrzymałość złącza zarejestrowana przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369 została przedstawiona w Tabeli 7. Wyniki badania doraźnej wytrzymałości na rozciąganie stanowią średnią z 3 prób.

Tabela 7 Wytrzymałość złącza ze stali DOCOL 1200M (podgrzewanie wstępne 120°C, temp. międzyścięgowa 150°C i 170°C)

Temp międzyścięgowa	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
150°C	542	729	6,0
170°C	531	707	5,9

Z danych tablicy 5 wynika, że uzyskano wysoką wytrzymałość R_m i akceptowalne wydłużenie względne A₅ na poziomie materiału rodzimego.

5. PODSUMOWANIE

Trudnospawalnym materiałem coraz częściej stosowanym w inżynierii lądowej i w budowie środków transportu są stale z grupy DOCOL. Ich wysoka wytrzymałość na rozciąganie jest znacznie większa od wytrzymałości złącza spawanego. Dużym problemem spawalniczym jest zapewnienie porównywalnych własności plastycznych złącza ze stali DOCOL 1200M i materiału rodzimego. W niniejszym artykule dobrano parametry spawania konstrukcji grubościennych ze stali DOCOL 1200M. Sformułowano następujące wnioski:

1. Przed spawaniem MAG stali DOCOL 1200 M należy zastosować podgrzewanie wstępne (120°C);
2. Ważne jest kontrolowanie temperatury międzyścięgowej, która powinna być na poziomie 150-170°C;
3. Podgrzewanie wstępne i prawidłowo dobrana temperatura warstw międzyścięgowych pozwoli na ograniczenie zawartości wodoru w spoinie poniżej 5 ml/100 g stopiwa, co gwarantuje dobre własności mechaniczne złącza.

LITERATURA

- [1] Jaewson L., Kamran A., Jwo P., Modeling of failure mode of laser welds in lap-shear specimens of HSLA steel sheets, *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, Vol 1, pp 347-396.
- [2] Darabi J., Ekula K., Development of a chip-integrated micro cooling device, *Microelectronics Journal*, 2016, Vol 34, Issue 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, Vol. 60, Issue 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, Vol 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*, Vol 24, Issue 1, pp. 37-44.
- [6] Golański D., T. Chmielewski T., Skowrońska B., Rochalski D., *Advanced Applications of Microplasma Welding*, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, 2018, Vol. 62, Issue 5, 53-63. <http://dx.doi.org/10.17729/ebis.2018.5/5>.
- [7] Skowrońska B., Szulc J., Chmielewski T., Golański D., Wybrane właściwości złączy spawanych stali S700 MC wykonanych metodą hybrydową plazma + MAG, *Welding Technology Review*, 2017, Vol. 89(10), 104-111. <http://dx.doi.org/10.26628/ps.v89i10.825>.
- [8] Silva A., Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Jurek A., MAG welding of S700MC steel used in transport means with the operation of low arc welding method, *Welding Technology Review*, Vol. 91 Nr 3/2019, PL ISSN 0033-2364, 23-30.
- [9] Ferenc K., Cegielski P., Chmielewski T., *Technika spawalnicza w praktyce: Poradnik inżyniera konstruktora i technologa*, 1st ed.; Publisher: Verlag Dashofer, Warszawa, Poland, 2015.
- [10] Krupicz B., Tarasiuk W., Barsukov V.G., Sviridenok A.I.: Experimental Evaluation of the Influence of Mechanical Properties of Contacting Materials on Gas Abrasive Wear of Steels in Sandblasting Systems; *Journal of Friction and Wear*; 2020, Vol 41, Issue: 1, p. 1-5.
- [11] Hadrys D., Węgrzyn T., Piwnik J., Stanik Z., Tarasiuk W.: (2016) The use of compressed air for micro-jet cooling after mig welding; *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol: 61, Issue: 3, pp. 1059-1061.
- [12] PN-EN ISO 3690: 2005 Spawanie i procesy spawaniu pokrewne – Oznaczanie zawartości wodoru w stopiwie ferrytycznym wykonanym łukowo.
- [13] Pohodnia I. K., *Metalurgija dugovoj svarki. Vzajmodiejstvje metalla s gazami*. Naukowa Dumka, Kijów 2004.
- [14] Shwachko V. I., Cold cracking of structural steel weldments as reversible hydrogen embrittlement effect. *International Journal of Hydrogen Energy* 25/2000.
- [15] Karppi R. i in., Determination of weld hydrogen content, IIW Doc. II-1020-84.
- [16] Hart P. H. M., Evans G. M., Hydrogen content of single and multipass steel welds. *Welding Journal* 2/1997.
- [17] Jenkins N., Hart P., Parker D., An evaluation of rapid methods for diffusible weld hydrogen, *Welding Journal*, 1/1997.
- [18] Karakhin V. A., Levchenko A. M., Computer-aided determination of diffusible hydrogen in deposited weld metal. IIW Doc. H-1634-07.
- [19] Alexandrov B. T., Hydrogen diffusion coefficient and modeling of hydrogen behavior in welded joints of structural steels. IIW Doc. IX-2063-03.
- [20] Nolan D., Pitrun M., Diffusible hydrogen testing in Australia. IIW Doc. IX-2065-03.
- [21] Kotecki D. J., Aging of welds for hydrogen removal, *Welding Journal* 6/1994.
- [22] Mikuła J., Rola wodoru w powstawaniu pęknięć zimnych (część I). *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 1/1994.
- [23] Nevasmaa P., Laukkanen A., Procedure for the Prevention of Hydrogen Cracking in Multipass Weld Metal with Emphasis on the Assessment of Cracking Risk in 2.25Cr-1Mo-0.25V-TiB (T24) Boiler Steel. IIW Doc. IX-2131-04.
- [24] Strom C., Elvander J., Calibration and verification of the hot extraction method including a comparison with the mercury method. IIW Doc. II-1543-04.
- [25] Mazur M., Grela P., Badania porównawcze wodoru dyfundującego ze stopiwa metodami glicerynową i rtęciową, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 1/2002.
- [26] Kannengiesser T., Tiersch N., Comparative study between hot extraction methods and mercury method – a national round robin test. IIW Doc. 11-1690-08.
- [27] Łabanowski J., Fydrych D., Oznaczanie zawartości wodoru dyfundującego w stopiwie, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, II Sympozjum Naukowe Zakładu Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2008.

- [28] Fydrych D., Oznaczenie ilości wodoru dyfundującego w stopiwie elektrod otulonych Chromet 921 oraz Thermanit MTS 5 Co 1 do spawania staliwa kobaltowego. Raport z badań KTMMiS 1/2009, Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- [29] Opartny-Myśliwiec D., Pomiar zawartości wodoru dyfuzyjnego w złączu spawanym łukowo-ręcznie, w zależności od gatunku elektrody i stanu jej powierzchni. Politechnika Gdańska, Gdańsk 1980.
- [30] Terasaki T., Akiyama T., Specimen size for determination of diffusible hydrogen content in weld metal. IIW Doc. II-1041-85,
- [31] Fydrych D., Łukowski A., Wpływ warunków spawania na zawartość wodoru dyfundującego w stopiwie przy spawaniu elektrodami otulonymi. Raport z badań. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2007.

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

dr hab. inż. Bożena Szczucka-Lasota, prof. PŚ (Politechnika Śląska)

prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn (Politechnika Śląska)

prof. dr hab. inż. Jan Piwnik (Cobrabid Sp. z o.o.)

mgr inż. Adam Jurek (Novar Sp. z o. o. Gliwice, Gliwice, Poland)

dr inż. Jerzy Kalwas (Cobrabid Sp. z o.o.)

mgr inż. Krzysztof Ireneusz Wilczyński (Cobrabid Sp. z o.o.)