

# APARATURA

## BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

### Warunki termodynamiczne podczas spawania drobnoziarnistej stali S960 MC

BOŻENA SZCZUCKA-LASOTA<sup>1</sup>, TOMASZ WĘGRZYN<sup>2</sup>, JAN PIWNIK<sup>3</sup>, ADAM JUREK<sup>4</sup>,  
JERZY KALWAS<sup>5</sup>, KRZYSZTOF I. WILCZYŃSKI<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup>POLITECHNIKA ŚLĄSKA, <sup>3</sup>INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW, WARSZAWA,

<sup>4</sup>NOVAR SP. Z O. O. GLIWICE, <sup>3,5,6</sup>COBRABID Sp. z o.o.

**Słowa kluczowe:** inżynieria lądowa, transport, środki transportu, warunki termodynamiczne

#### STRESZCZENIE:

Nieustannie wrasta zapotrzebowanie na spajanie trudno-spawalnych stali wysokowytrzymałych stosowanych w inżynierii lądowej i w transporcie. Ważnym materiałem konstrukcyjnym w budowie środków transportu są stale drobnoziarniste z uwagi na ich dużą wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 1250 MPa. Celem niniejszego artykułu było dobranie parametrów termodynamicznych w procesie spawania MAG trudno-spawalnej stali S960 MC.

Stale drobnoziarniste, charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie i 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. Postanowiono sprawdzić rolę podgrzewania wstępnego i temperatury warstw międzyścięgowych na poprawność wykonanego złącza MAG konstrukcji o grubości 8 mm. Sprawdzone udarność złącza i oszacowano zawartość wodoru dyfundującego w stopiwie.

#### Thermodynamic conditions when welding fine-grained steel S960 MC

**Keywords:** civil engineering, transport, means of transport, thermodynamic conditions

#### ABSTRACT:

There is growing demand for bonding high-strength steels with a low level of weldability used in civil engineering and transport. Fine-grained steels are an important material for the construction of means of transport due to their high tensile strength of 1000 MPa. The aim of this article was to select thermodynamic parameters for MAG welding of low weldability S960 MC steel.

Fine-grained 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. A decision was made to check the impact of preheating and the temperature of interpass layers on the correctness of a MAG joint in a structure 8 mm thick. The impact toughness of the joint has been checked and the content of diffusible hydrogen in the weld estimated.

## 1. WSTĘP

Przedstawiono wyniki badań wykonanych w celu dobrania parametrów termodynamicznych spawania konstrukcji wykonanej z wysokowytrzymałej drobnoziarnistej stali S960 MC. Stale te proponuje się stosować w budowie środków transportu z uwagi na jej wysoką wytrzymałość. W tym wypadku wydłużenie względne na poziomie 8% jest akceptowalne [1-6]. Niestety taka struktura sprzyja powstawaniu pęknięć spawalniczych spowodowanych między innymi oddziaływaniem wodoru [7-11].

Obniżenie zawartości wodoru w spoinie uzyskuje się stosując podgrzewanie wstępne do temperatury 100°C. Równocześnie panuje pogląd, że podgrzewanie wstępne powyżej 200°C jest niekorzystne gdyż prowadzi do rozrostu obszaru strefy wpływu ciepła [12-19]. Wpływ wodoru na pękanie stalowych spoin i metody obliczania ilości wodoru dyfundującego są bardzo obszernie opisane w literaturze [20-29].

Zagadnienia te stały się tematem podjętych badań, ponieważ istnieje bardzo mało informacji dotyczących pęknięć wodorowych złączy spawalniczych wykonanych z wysokowytrzymałych stali drobnoziarnistych.

## 2. MATERIAŁY STOSOWANE DO BADAŃ

Do spawania MAG stali S960 MC o grubości 8 mm użyty został drut elektrodowy UNION X90 (EN ISO 16834-A G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo), a jako gazy osłonowe mieszanina 90% Ar- 2% O<sub>2</sub>. Celem prac badawczych było osiągnięcie poprawnego złącza ze stali S960 MC z blach o grubości 8 mm, przeznaczonych na konstrukcje środków transportu. Proces spawania realizowany był w różnych termodynamicznych warunkach spawalniczych, takich jak podgrzewanie wstępne i zmienne temperatury warstw międzyścięgowych.

Tabela 1 prezentuje własności mechaniczne stali S960 MC stosowanej do budowy środków transportu.

Tabela 1 Własności mechaniczne stali S960 MC [6]

Granica plastyczności YS, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie UTS, MPa	Wydłużenie względne A5 %
950	1250	8,1

Na uwagę zasługuje wysoka granica plastyczności na poziomie 950 MPa i akceptowalne wydłużenie względne na poziomie 8%. Jest to związane z większą zawartością węgla i tytanu w stosunku do niestopowych stali konstrukcyjnych. W niestopowych stalach C-Mn zawartość Ti jest wprowadzana maksymalnie na poziomie 0,003%, a w drobnoziarnistych stalach wysokowytrzymałych zawartość tytanu jest dwudziestokrotnie większa % (Tab.2) Panuje pogląd, że powstaje utwardzanie dyspersyjne stopiwa związkami tytanu (typu TiN, TiO).

Tabela 2 Skład chemiczny stali S960 MC [6]

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Al., %	Nb, %	V, %	Ti, %	Ni, %
0,12	0,25	1,3	0,02	0,01	0,015	0,05	0,05	0,07	1,7

Skład chemiczny drutu różni się od składu chemicznego spawanej stali (Tab. 3).

Tabela 3 Drut elektrodowy UNION X90 – 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

Na uwagę zasługuje dodatek chromu w drucie elektrodowym (który zwiększa wytrzymałość złącza) oraz dodatek molibdenu (który podnosi własności plastyczne złącza, zwłaszcza udarność złącza w ujemnych temperaturach). 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 X90 wynosiła 1,0 mm. Napięcie łuku i natężenie prądu spawania dla warstwy pierwszej i dla warstw pozostałych były różne. Wartości prądowo napięciowe zmieniano w celu uniknięcia wad spawalniczych typu przyklejenia. Prędkość układania poszczególnych warstw międzyścięgowych była na podobnym poziomie: 330-340 mm/min.

Spoina miała charakter siedmiościęgowy. Kolejne warstwy były spawane podwyższonymi parametrami prądowo-napięciowymi (w celu uzyskania głębszego wtopienia i uniknięcia wad spawalniczych), które przedstawiono w Tabeli 4.

**Tabela 4** Parametry spawania kolejnych warstw złącza ze stali S960 MC

Numer warstwy (od strony grani)	Napięcie łuku, V	Natężenie prądu, A	Prędkość spawania, mm/min
pierwsza	18	114	330
warstwy 2-7	21	230	340

Wykonano złącza bez podgrzewania wstępnego oraz przy podgrzewaniu wstępnym do temperatury 120°C. Dodatkowo ustalano temperaturę międzyściegową złącza w trakcie układania warstw 2-7 (100°C, 150°C, 170°C, 200°C).

### 3. METODY BADAŃ

Po spawaniu MAG przeprowadzono badania nieniszczące (NDT):

- Badanie wizualne (VT)
- Badanie magnetyczno-proszkowe (MT).

Analiza uzyskanych wyników badań nieniszczących pozwoliła wytypować złącza do badania udarności w temperaturze -30°C i -40°C. Analizowano strukturę metalograficzną spoin pod mikroskopem świetlnym (LM). Wykonano pomiar zawartości wodoru dyfundującego w spoinie. Badania wykonano wg pogładowej metody glicerynowej opisanej w normie BN-64/4130.

### 4. REZULTATY BADAN I ICH ANALIZA

Rezultaty badań nieniszczących przedstawiono w Tabeli 5.

Zauważono różnice w ocenie złączy wykonanych różnymi parametrami termodynamicznymi (zastosowanie podgrzewania wstępnego, różne temperatury międzyściegowe). Rezultaty badań wizualnych makroskopowych przeprowadzonych okiem nieuzbrojonym oraz magnetyczno-proszkowych powstałych połączeń przedstawiono w Tabeli 5.

**Tabela 5** Wyniki badań nieniszczących

Spawanie bez podgrzewania wstępnego	Spawanie z podgrzewaniem wstępnym do 120°C, temperatura międzyściegowa:			
	100° C	150° C	170° C	200° 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 S960 MC bezwzględnie potrzebne jest podgrzewanie wstępne przed spawaniem. Uznano, że temperatura podgrzewania wstępnego na poziomie 120°C jest wystarczająca, gdyż w złączach tych nie zaobserwowano pęknięć. Równocześnie zauważono, że temperatura międzyściegowa złącza powinna być w zakresie 150°C-170°C. W złączach wykonanych z podgrzewaniem wstępnym do 120°C i przy temperaturze międzyściegowej 200°C obserwowano pęknięcia w spoinach z innego powodu (znaczne rozszerzenie się strefy wpływu ciepła).

Bezpośrednio po spawaniu sprawdzono zawartość wodoru dyfundującego w spoinie. Utrzymała się ona na niskim poziomie, ale równocześnie zaobserwowano znaczne rozszerzenie się strefy wpływu ciepła przy wzroście temperatury międzyściegowej. Wyniki badań przedstawiono w Tabeli 6.

**Tabela 6** Wodór dyfundujący w spoinie

Rodzaj próbki	Zawartość wodoru dyfundującego, ml/100 g stopiwa
Bez podgrzewania wstępnego	6,4
Temp. warstwy międzyściegowej 100°C	5,8
Temp. warstwy międzyściegowej 150°C	4,0
Temp. warstwy międzyściegowej 170°C	3,8
Temp. warstwy międzyściegowej 200°C	3,4

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 temperaturę międzyściegową na poziomie 150°C-170°C.

Do dalszych badań niszczących (struktura oraz udarność) brano pod uwagę tylko złącza wykonane z podgrzewaniem wstępnym na poziomie 120°C i z równoczesnym zapewnieniem właściwej temperatury międzyściegowej. Dominującą strukturą był martenzyt; stwierdzono również występowanie małych ilości bainitu i drobnoziarnistego ferrytu. Wyniki badania udarności stanowią średnią z 3 prób (Tab. 7).

**Tabela 7** Udarność złącza ze stali S960 MC (podgrzewanie wstępne 120°C, temp. międzyścięgowa 150°C lub 170°C)

Temp międzyścięgowa	KV w temp. -30°C [J]	KV w temp. -40°C [J]
150°C	49	37
170°C	47	33

Z danych Tabeli 7 wynika, że możliwe jest spełnienie 3 klasy udarności (energia łamania jest powyżej wartości progowej 47 J w -30°C). W temperaturze -40°C nie uzyskano udarności powyżej 47 J, co świadczy, że nie są spełnione wymagania dla 4 klasy udarności. Nieco lepszą udarność posiada złącze wykonane z podgrzewaniem wstępnym do temperatury 120°C i zachowaniem temperatury międzyścięgowej na poziomie 150°C.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Po ustaleniu warunków termodynamicznych procesu spawania MAG stali drobnoziarnistej S960 MC uzyskano poprawne złącze o dobrych własnościach mechanicznych o małej zawartości wodoru

w stopiwie. Złącze to spełnia wymagania 3 klasy udarności.

Dobrano termodynamiczne parametry spawania konstrukcji grubościennych ze stali drobnoziarnistej S960 MC.

Sformułowano następujące wnioski:

1. Przed spawaniem MAG stali S960 MC należy zastosować podgrzewanie wstępne (120°C);
2. Ważne jest kontrolowanie temperatury międzyścięgowej, która powinna być na poziomie 150°C -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 3 klasę udarności.
4. Temperatura warstwy międzyścięgowej powyżej 200°C jest niekorzystna i prowadzi do rozszerzania się strefy wpływu ciepła.

#### BIBLIOGRAFIA

- [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), pp. 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.; Verlag Dashofer, Warszawa 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, pp.1-5
- [11] PN-EN ISO 3690: 2005 Spawanie i procesy spawaniu pokrewne – Oznaczanie zawartości wodoru w stopiwiu ferrytycznym wykonanym łukowo.
- [12] Shwachko V. I., Cold cracking of structural steel weldments as reversible hydrogen embrittlement effect. International Journal of Hydrogen Energy 25/2000.
- [13] Karppi R. i in., Determination of weld hydrogen content, IIW Doc. II-1020-84.
- [14] Hart P. H. M., Evans G. M., Hydrogen content of single and multipass steel welds. Welding Journal 2/1997.
- [15] Jenkins N., Hart P., Parker D., An evaluation of rapid methods for diffusible weld hydrogen. Welding Journal 1/1997.
- [16] Karakhin V. A., Levchenko A. M., Computer-aided determination of diffusible hydrogen in deposited weld metal. IIW Doc. H-1634-07.
- [17] Alexandrov B. T., Hydrogen diffusion coefficient and modifying of hydrogen behavior in welded joints of structural steels. IIW Doc. IX-2063-03.
- [18] Nolan D., Pitrun M., Diffusible hydrogen testing in Australia. IIW Doc. IX-2065-03.
- [19] Kotecki D. J., Aging of welds for hydrogen removal, Welding Journal 6/1994.
- [20] Mikuła J., Rola wodoru w powstawaniu pęknięć zimnych (część I). Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 1/1994.
- [21] 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.
- [22] Strom C., Elvander J., Calibration and verification of the hot extraction method including a comparison with the mercury method. IIW Doc. II-1543-04.
- [23] Mazur M., Grela P., Badania porównawcze wodoru dyfundującego ze stopiwa metodami glicerynową i rtęciową. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 1/2002.
- [24] Kannengiesser T., Tiersch N., Comparative study between hot extraction methods and mercury method – a national round robin test. IIW Doc. II-1690-08.
- [25] Łabanowski J., Fydrych D., Oznaczanie zawartości wodoru dyfundującego w stopiwiu. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, II Sympozjum Naukowe Zakładu Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [26] Fydrych D., Oznaczenie ilości wodoru dyfundującego w stopiwiu elektrod otulonych Chromet 921 oraz Thermanit MTS 5 Co 1 do spawania staliwa kobaltowego. Raport z badań KTMMiS 1/2009, Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- [27] 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.
- [28] Terasaki T., Akiyama T., Specimen size for determination of diffusible hydrogen content in weld metal. IIW Doc. II-1041-85.
- [29] Fydrych D., Łukomski A., Wpływ warunków spawania na zawartość wodoru dyfundującego w stopiwiu 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)

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

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