

TINERI CERCETĂTORI JUNIOR RESEARCHERS

Cercetări privind influența gazului de protecție în corelație cu parametrii de sudare asupra proprietăților mecanice ale îmbinărilor din oțel inoxidabil duplex pentru industria navală

Research on the influence of shielding gas in correlation with welding parameters on the mechanical properties of stainless-steel duplex joints for the shipbuilding industry

Marian Puchianu^{1*}, Ionelia Voiculescu^{2*}, Anamaria Feier³

¹Universitatea Națională de Știință și Tehnologie „Politehnica” București, PhD student

²Universitatea Națională de Știință și Tehnologie „Politehnica” București

³Universitatea „Politehnică” din Timișoara

Rezumat

Scopul principal al acestei lucrări a fost analiza efectelor tipului de gaz protector în corelație cu valorile optime ale parametrilor de sudare, în vederea obținerii proprietăților mecanice adecvate ale îmbinărilor sudate fabricate din oțelul S31803. Îmbinarea cap la cap din oțel inoxidabil duplex a fost realizată prin sudare cu sârmă tubulară cu flux rutilic (FCAW), în pozițiile de sudare vertical ascendent (PF) și orizontal pe perete vertical (PC), utilizând gazele de protecție 100% CO₂ (codificat C1) și Ar +18% CO₂ (codificat M21). Gazele utilizate în acest studiu sunt preferate pentru asigurarea protecției zonei de sudare în industria construcțiilor navale. Principalele teste mecanice prin care s-au determinat proprietăți mecanice ale îmbinărilor sudate au fost cele de impact, tracțiune, îndoire și duritate. Pentru validarea rezultatelor și stabilirea valorilor optime ale parametrilor de sudare s-au prelevat probe metalografice, pe baza cărora s-a analizat evoluția microstructurii sudurilor și a zonelor afectate termic.

Cuvinte cheie

Gaz de protecție, parametri de sudare, oțel inoxidabil duplex, procedeu FCAW

Abstract

The main purpose of this practical work was to analyse the effects of the type of shielding gas in correlation with the optimal values of the welding parameters, to obtain the appropriate mechanical properties of welded joints made of S31803 steel. The duplex stainless steel butt joint was made by rutile flux cored wire welding (FCAW) in the vertical upward (PF) and horizontal on vertical wall (PC) welding positions using shielding gases 100% CO₂ (coded C1) and Ar +18% CO₂ (coded M21). The gases used in this study are preferred for providing weld zone protection in the shipbuilding industry. The main mechanical tests by which the mechanical properties of the welded joints were determined were impact, tensile, bending and hardness. To validate the results and establish the optimal values of the welding parameters, metallographic samples were taken, based on which the evolution of the microstructure of the welds and the heat affected zones were analysed.

Keywords

Shielding gas, welding parameters, duplex stainless steel, FCAW process

1. Introducere

La procedeul de sudare în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, zonele topite și încălzite sunt protejate de acțiunea nocivă a gazelor din atmosferă,

1. Introduction

In the Gas-shielded metal arc welding process, the molten and heated areas are protected from the harmful action of atmospheric gases by a continu-

cu o perdea continuă de gaz de protecție care este suflată prin pistolul de sudare [1-2].

Protecția se poate realiza cu gaze inerte sau amestecuri cu gaze active, care definesc tipurile de procese de sudare cunoscute în literatura de specialitate sub denumirea de MIG (Metal Inert Gas), respectiv MAG (Metal Active Gas), în funcție de tipul gazului sau a amestecului gazos utilizat la sudare [3].

Materialul de adaos pentru sudare poate fi sub formă de sârmă plină, sârmă tubulară cu pulbere metalică sau sârmă tubulară cu miez, pentru aceasta din urmă fiind disponibilă mai multe tipuri de fluxuri, cum ar fi rutilic, bazic etc.

Oțelurile inoxidabile Duplex au o microstructură mixtă austenito-feritică, iar fabricarea lor a rezultat a avut la bază combinația compozițiilor oțelurilor feritice și austenitice, pentru a conține de la 30 la 60% ferită, restul fiind austenită [4]. Actualmente, prin aproximări succesive, s-a ajuns la clasa de aliere Cr-Ni-Mo, frecvent aliată cu azot. Aceste oțeluri au o sudabilitate bună, cu rezistențe acceptabile față de coroziunea intergranulară, pitting și coroziune fisurantă sub tensiune, precum și caracteristici mecanice bune [4 - 6]. Proporția principalelor faze (ferita δ și austenită γ) este foarte importantă, de ea depinzând proprietățile aliajului. O cantitate prea mare de ferită (care poate apărea la sudare) are ca efecte negative micșorarea rezistenței la coroziune, reducerea tenacității, creșterea pericolului de fisurare la rece [7]. Oțelul S31803 poate fi utilizat în diverse domenii, inclusiv sisteme pentru procesarea apei de mare, (pompe și supape), recipiente de proces chimic, schimbătoare de căldură, echipamente pentru procesele alimentare, conducte pentru aplicații petroliere etc. În aceste oțeluri, ferita bogată în Cr este metastabilă, ceea ce limitează domeniul de utilizare la aproximativ 300°C [8].

Structura bi-fazică se obține prin recoacere pentru stabilizare în domeniul de temperaturi 1100 - 1200°C, urmată de răcire în apă. Acest tratament determină creșterea proprietăților mecanice dar și scăderea plasticității oțelului, a rezistenței la fisurare sau la coroziune [9].

În structurile sudate din oțel inoxidabil duplex pot apărea la solidificare trei tipuri de austenită, și anume: (i) austenită nucleată la limitele inițiale ale grăunților de ferită; (ii) austenită de tip Widmanstätten cu aspect plachetar nucleată pe limite de grăunte; (iii) austenită intergranulară precipitată în grăunții de ferită [10- 11]. Prin urmare, se recomandă utilizarea unor valori mai mici ale energiei liniare la sudare (aproximativ 1,5 kJ/

ous shielding gas curtain that is blown through the welding torch [1-2].

Protection can be achieved with inert gases or mixtures with active gases, which define the types of welding processes known in the specialized literature as MIG (Metal Inert Gas), respectively MAG (Metal Active Gas), depending on the type of gas or of the gas mixture used for welding [3].

The filler metal for welding can be provided as solid wire, metal powder tubular wire or flux-cored tubular wire, for the latter being available several types of fluxes, like rutile, basic etc.

Duplex stainless steels have a mixed austenitic-ferritic microstructure, and their manufacture was based on the combination of ferritic and austenitic steel compositions, to contain from 30 to 60% ferrite, the rest being austenite [4]. Currently, through successive approximations, the class of Cr-Ni-Mo alloys, frequently alloyed with nitrogen, has been reached. These steels have good weldability, with acceptable resistance to intergranular corrosion, pitting and stress corrosion cracking, as well as good mechanical properties [5- 6]. The proportion of the main phases (ferrite δ and austenite γ) is very important, as the properties of the alloy depend on it. Too much ferrite (which can appear during welding) has the negative effects of reducing corrosion resistance, reducing toughness, and increasing the risk of cold cracking [7].

The S31803 steel can be used in various fields including seawater processing systems (pumps and valves), chemical process vessels, piping and heat exchangers, food processing equipment, pipelines for petroleum applications etc.

In these steels, Cr-rich ferrite is metastable, which limits the range of use to approximately 300°C [8].

The bi-phase structure is obtained by annealing for stabilization in the temperature range of 1100-1200°C, followed by cooling in water. This treatment causes an increase in the mechanical properties but also a decrease in the steel's plasticity, resistance to cracking or corrosion [9].

In the welded structures of duplex stainless steel, three types of austenite can appear upon solidification, namely: (i) austenite nucleated at the initial boundaries of the ferrite grains; (ii) Widmanstätten-type austenite with plate-like appearance nucleated on grain boundaries; (iii) intergranular austenite precipitated in the ferrite grains [10- 11].

Therefore, it is recommended to use lower values of heat input during welding (about 1.5 kJ/mm) for off-

mm) pentru aplicații off-shore. Lucrarea analizează influența gazului de protecție, în corelație cu valorile parametrilor de sudare, asupra proprietăților unor îmbinări sudate cap la cap fabricate din oțel inoxidabil duplex S31803. Se prezintă informații utile pentru fabricanții de aparatură navală privind stabilirea valorilor parametrilor de regim la sudarea GMAW, utilizând atât gaze inerte cât și gaze active. Utilizarea de gaze active la sudare presupune interacțiunea chimică a produșilor gazoși cu diferite elemente din baia de metal topit și sârma de adaos. De aceea, lucrarea analizează în detaliu efectele gazelor active și inerte asupra proprietăților sudurilor, în condiții similare de fabricare.

2. Date de intrare

Materialul de bază S31803 (W1.4462), utilizat în această lucrare, este un oțel inoxidabil duplex cu conținut mediu de molibden și aliat cu azot, adesea întâlnit în industria construcțiilor navale, având echivalentul de corespondență X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) în conformitate cu Standardul european de clasificare EN 10028-7 [12]. Compoziția chimică (conținând 22% crom, 3% molibden, 5-6% nichel și 0.19% azot), îi conferă rezistență mecanică ridicată, tenacitate și o rezistență la coroziune foarte bună (coroziune generală sau sub tensiune). Compoziția chimică a tablei de oțel S31803 folosite pentru realizarea testelor este prezentată în Tabelul 1. Pentru realizarea probelor sudate s-au utilizat table cu grosime de 12 mm și dimensiuni 300x600mm. Materialul de adaos utilizat pentru sudare a fost o sârmă tubulară cu flux rutilic E2209T1-4 având diametrul de Ø1.2 mm, a cărei compoziție chimică pe metalul depus prin sudare este prezentată în tabelul 2.

Tabelul 1. Compoziția chimică a materialului de bază
Table 1. Chemical composition of base material

Marcă oțel Steel Grade	Elemente chimice [%] Chemical elements [wt%]													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Al	Cu	Ti	V	Nb
S31803	0.024	0.40	1.35	0.027	0.001	22.4	5.64	3.14	0.19	-	-	-	-	-

Tabelul 2. Compoziția chimică a materialului de adaos
Table 2. Chemical composition of filler metal

Clasificare material adaos Filler material Classification	Elemente chimice [%] Chemical elements [wt%]									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
E2209T1-4 (1)	0.03	0.88	1.00	0.019	0.005	22.69	9.19	3.27	0.06	0.13

shore applications. The paper analyses the influence of the shielding gas, in correlation with the values of the welding parameters, on the properties of butt-welded joints made of duplex stainless steel S31803. Useful information for shipbuilding manufacturers is presented regarding the establishment of regime parameter values for GMAW welding, using both inert and active gases. The use of active gases in welding involves the chemical interaction of the gaseous products with various elements in the molten metal bath and the filler wire. Therefore, the paper analysis in detail the effects of active and inert gases on the properties of welds, under similar manufacturing conditions.

2. Input data

The base material S31803 (W1.4462) used in this work is a medium molybdenum and nitrogen alloy duplex stainless steel often found in the shipbuilding industry, having the correspondence equivalent of X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462) according to the European Standard classification EN 10028-7 [12]. The chemical composition (containing 22 wt% chromium, 3 wt% molybdenum and 5-6 wt% nickel and 0.19 wt% nitrogen), gives it high mechanical strength, toughness and a very good corrosion resistance (general or stress corrosion). The chemical composition of the S31803 steel sheet used for the tests are shown in Table 1. Sheets with a thickness of 12 mm and dimensions of 300x600 mm were used to make the welded samples. The filler metal used for welding was a tubular wire with rutile flux E2209T1-4 having a diameter of Ø1.2 mm, whose chemical composition on the metal deposited by welding is shown in table 2.

Figura 1 prezintă modul în care a fost prelucrat rostul în formă de V, având acces doar dintr-o parte, cu unghiul de deschidere de 60° , înălțimea rădăcinii de 2 mm și o deschidere la rădăcină de 4-6 mm. Îmbinarea cap la cap s-a realizat cu pătrundere completă, utilizând un suport ceramic plasat la rădăcina sudurii. Sudarea a fost efectuată în pozițiile PF (vertical ascendent), respectiv PC (orizontal pe perete vertical). Aceste poziții de sudare au fost alese pentru a acoperi un spectru cât mai larg al valorilor energiei liniare, în care poziția PF este asociată cu valoarea limită superioară, iar poziția PC cu valoarea limită inferioară [13]. Se știe că este mai dificil de obținut o îmbinare corectă la sudarea cu arc în plan vertical, deoarece metalul topit depus în baia de sudură este supus forțelor de gravitație și scurgerii din rost [14-15]. Figurile 2 și 3 prezintă secvențele de depunere ale rândurilor, pentru toate sudurile cap la cap executate, cu ambele gaze de protecție. Se observă că pentru poziția de sudare PC, numărul de straturi este mai mare față de poziția PF. Totodată, numărul necesar de straturi este mult mai mare în cazul utilizării gazului de protecție C1.

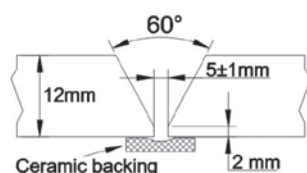


Figura 1. Forma și dimensiunile rostului în "V" utilizat în experimentările de sudare
Figure 1. V-shaped groove used in welding tests, and its dimensions



Figura 2. Ordinea de sudare utilizată la sudarea în mediul de gaz de protecție M21
Figure 2. Welding sequence when used M21 shielding gas

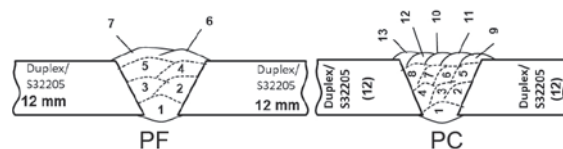


Figura 3. Ordinea de sudare utilizată la sudarea în mediul de gaz de protecție C1
Figure 3. Welding sequence when used C1 shielding gas

Gazele de protecție utilizate pentru realizarea probeilor sudate sunt simbolizate conform EN ISO 14175, codificarea C1 fiind asociată cu 100% CO_2 , în timp ce codificarea M21 a fost asociată cu un amestec de 15-25% CO_2 și argon, procentajul gazului activ ales pentru sudare fiind de 18% CO_2 [16-17]. Pentru stabilirea valorilor parametrilor de sudare s-a calculat energia liniară necesară realizării topirii materialului de adaos și materialului de bază cu relația 1, unde Q este energia liniară [kJ/mm], k eficiența termică a procesului, 0,8 (80%) pentru FCAW, U tensiunea arcului [V], I curentul de sudare [A], v viteza de sudare [mm/s] [18-19].

The shielding gases used to make the welded samples are symbolized according to EN ISO 14175, the C1 coding being associated with 100% CO_2 , while the M21 coding was associated with a mixture of 15-25% CO_2 and argon, the percentage of active gas chosen for welding being 18% CO_2 [16-17]. In order to establish the values of the welding parameters, the heat input required to achieve the joint melting of the filler material and the base material was calculated with using formula 1, where Q is heat input [kJ/mm], k thermal efficiency of welding process, 0.8 (80%) for FCAW, U arc voltage [V], I welding current [A], v welding speed [mm/s] [18-19].

Valorile energiilor liniare calculate pentru fiecare tip de probă, asociate pozițiilor de sudare și tipurilor de gaze de protecție, sunt prezentate în Tabelul 3.

The values of the heat input calculated for each type of sample, associated with the welding positions and the types of shielding gases, are shown in table 3.

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

Tabelul 3. Valorile energiei liniare în timpul sudării [kJ/mm]

Table 3. The values of heat input during welding [kJ/mm]

Rând/ Row	Poziția de sudare și tipul gazului Welding position and gas type			
	PC		PF	
	M21	C1	M21	C1
Trecerea de sudare a rădăcinii / Root welding pass	1.26	1.62	1.58	1.85
Treceri de sudare pentru umplere / Filling passes	0.48÷0.51	0.36÷0.62	0.72÷0.76	0.67-0.88
Ultima trecere de umplere / Last welding pass	0.40÷0.59	0.46÷0.59	0.78÷0.91	0.75÷0.83

Temperatura dintre rânduri la sudare nu a depășit 150°C, cu scopul asigurării unei viteze mari de răcire, care permite menținerea echilibrului între procentul de ferită și austenită din metalul depus. Valorile temperaturii între straturi s-au situat între 18 și 90°C pentru poziția PF, respectiv între 18 și 100°C pentru poziția PC.

În figura 4 se prezintă probele sudate, cu plăcuțe mici sudate la cele două capete, pentru eliminarea defectelor marginale.

The inter-pass temperature did not exceed 150 °C, in order to ensuring a sufficiently high cooling rate, that allows maintaining the balance between the percentage of ferrite and austenite in the weld deposition. The inter-pass temperature values were between 18 and 90 °C for the PF position and between 18 and 100°C for the PC position.

Figure 4 shows the samples after welding, with small plates welded at the two ends, to eliminate marginal defects.

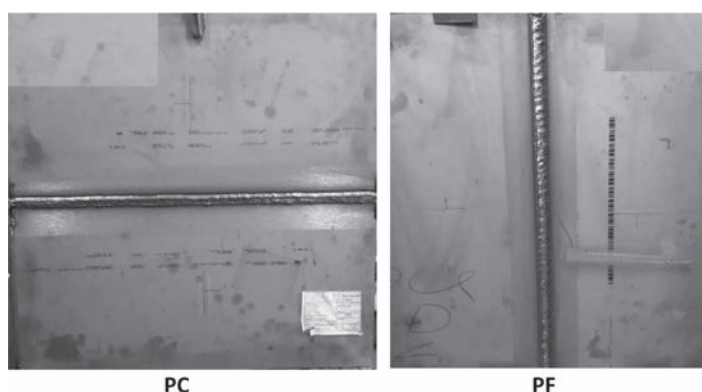


Figura 4. Aspectul probelor sudate (față și rădăcină) pentru cele 2 poziții de sudare și gazul C1
Figure 4. Appearance of welded samples (face and root) for the 2 welding positions and gas C1

Valorile curentului de sudare în cazul probelor sudate cu gazul M21 în poziția PF s-au încadrat între 155 și 180 A, ale tensiunii între 21.6 și 24.1 V, iar ale vitezei de sudare între 8 și 27 cm/min. Pentru poziția PC, valorile curentului s-au situat între 185 și 215 A, ale tensiunii între 23.7 și 24 V, iar ale vitezei de sudare între 17 și 55 cm/min.

Valorile curentului de sudare în cazul probelor sudate cu gazul C1 în poziția PF s-au încadrat între 125 și 165 A, ale tensiunii între 19.4 și 23.7 V, iar ale vitezei de sudare între 6.3 și 27 cm/min. Pentru poziția PC, valorile curentului s-au situat între 175 și

The values of the welding current in the case of samples welded using M21 gas in the PF position were between 155 and 180 A, of the voltage between 21.6 and 24.1 V, and of the welding speed between 8 and 27 cm/min. For the PC position, the current values were between 185 and 215 A, the voltage between 23.7 and 24 V, and the welding speed between 17 and 55 cm/min. The values of the welding current in the case of samples welded using C1 gas in the PF position were between 125 and 165 A, of the voltage between 19.4 and 23.7 V, and of the welding speed between 6.3 and 27 cm/min. For the

195 A, ale tensiunii între 23.1 și 24.7 V, iar ale vitezei de sudare între 12 și 60 cm/min.

Așa cum rezultă din datele prezentate în tabelul 3, valorile energiei liniare necesare pentru realizarea rădăcinii sudurii sunt mai mari comparativ cu straturile de umplere sau de supraînălțare.

Totodată, energia liniară pentru stratul de rădăcină are valori mai scăzute în cazul utilizării amestecului de gaze M21 față de gazul complet activ C1, la ambele poziții de sudare. Pentru poziția de sudare PF sunt necesare valori ale energiei liniare mai mari față de poziția PC, pentru ambele tipuri de gaze.

3. Rezultate și discuții

3.1 Microstructură

Din probele sudate au fost prelevate mostre, apoi secțiunile transversale pe axa sudurilor au fost prelucrate cu materiale abrazive specifice (hârtii abrazive cu SiC și granulații de la 240 la 600, pulberi abrazive de Al₂O₃ cu granulații între 1 și 0.1 microni) și au fost atacate electrochimic cu soluție de NaOH (tensiune 2V cc, timp 15 de secunde) conform prescripțiilor ASTM E3-11 (2017) [20]. Microstructura probelor a fost observată cu ajutorul microscopului optic (microscop Reichert MeF2).

Analiza microscopică s-a efectuat conform A923 – 14 (2022), în vederea determinării tipurilor de faze sau constituenți și pentru detectarea eventualelor faze intermetalice nedorite [21].

Au fost examinate diferite zone ale îmbinării sudate, respectiv: sudura (centru, rădăcină și supraînălțare), zona influențată termic (central, lângă rădăcină și lângă supraînălțare).

În figura 6a se observă aspectul microstructurii probei codificate PC - M21 din zona influențată termic (ZIT/HAZ), astfel: aleatoriu (1), la rădăcină (3) și la zona superioară (4), precum și imagini din sudură (WM), astfel: aleatoriu (2), la rădăcină (5) și la zona superioară (supraînălțare)(6). Figura 6b evidențiază zonele caracteristice dar pentru proba codificată PF – C1.

Microstructura conține, atât în ZIT, cât și în sudură (WM), ferită delta și austenită (austenită intergranulară, austenită de tip Widmanstätten și austenită precipitată pe limitele de grăunte), fără faze intermetalice și cu mici cantități de carburi localizate pe limitele grăunților (mai puțin de 1%).

Limitele dintre faze sunt netede, iar grăunții de ferită sunt grosolani și au formă poliedrică.

PC position, the current values were between 175 and 195 A, the voltage between 23.1 and 24.7 V, and the welding speed between 12 and 60 cm/min. As can be seen from the data presented in table 3, the values of the heat input required to make the root of the weld are higher compared to the filling or surfacing layers. At the same time, the heat input for the root layer has lower values when using the gas mixture M21 compared to the fully active gas C1, at both welding positions. Higher heat input values are required for the PF welding position compared to the PC position, for both gas types.

3. Results and discussion

3.1 Microstructure

Specimens were taken from the welded samples, then the cross sections on the weld axis were processed with specific abrasive materials (SiC abrasive papers with grits from 240 to 600, abrasive powders Al₂O₃ with grits between 1 and 0.1 microns) and they were electrochemically etched with NaOH solution (voltage 2V dc, time 15 seconds) according to ASTM E3-11 (2017) [20]. The microstructure of the specimens was observed using an optical microscope (Reichert MeF2 microscope).

Microscopic analysis was performed according to A923 – 14 (2022), to determine the types of phases or constituents and to detect possible harmful intermetallic phases [21].

Different zones of the welded joint were examined, namely: weld (center, root and upper area), heat-affected zone (central, near root and near upper area). Figure 6a shows the appearance of the microstructure of the coded sample PC- M21 in the heat affected zone (HAZ), as follows: random (1), at the root (3) and in the upper zone (4), as well as images from the weld (WM), as follows: random (2), at the root (5) and at the upper area (cap) (6). Figure 6b highlights the same characteristic areas but for the coded sample PF – C1.

The microstructure contains, both in HAZ and WM, delta ferrite and austenite (intergranular austenite, Widmanstätten-type austenite and grain boundary austenite), without intermetallic phases and with small quantities of carbides located on grain boundary (less than 1%).

The interphase boundaries are smooth, and the ferrite grains are coarse and polyhedral in shape.

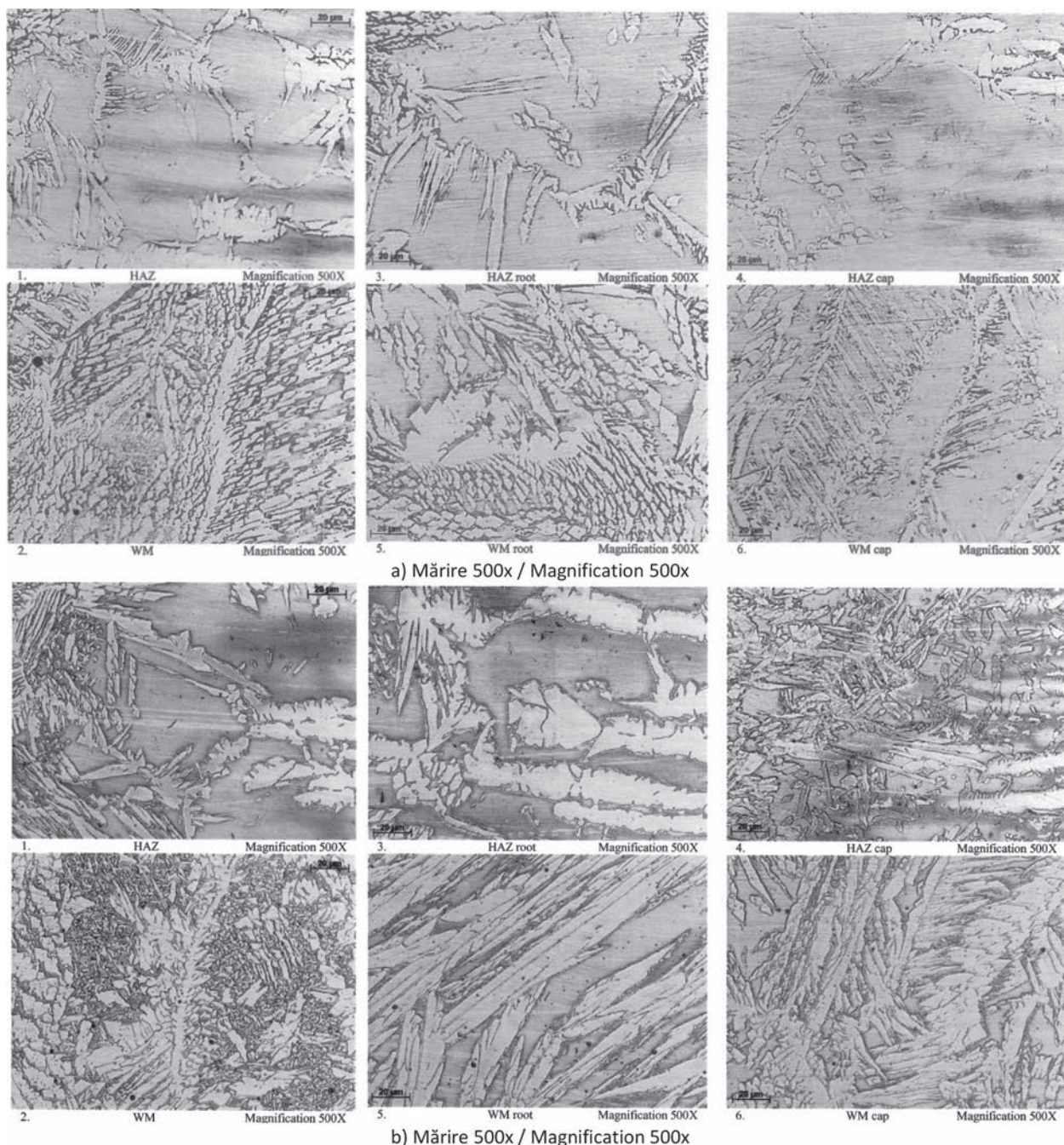


Figura 6. Microstructura sudurii realizată cu gaz de protecție C1, pentru poziția PC (a) și respectiv PF (b).

1- ZIT; 2-sudură; 3- ZIT rădăcină; 4 – ZIT supraînălțare; 5 – sudură rădăcină; 6- sudură supraînălțare.

Figure 6. Weld microstructure performed with C1 shielding gas, for PC (a) and PF (b) position respectively.

1- HAZ; 2- weld; 3- HAZ root; 4 – HAZ cap; 5 – weld root; 6- weld cap.

În cazul probelor la care s-a utilizat gazul de protecție M21 (figura 7) se observă o ușoară finisare a granulației atât în ZIT cât și în metalul depus prin sudare. Și aici se regăsesc fazele principale ale microstructurii oțelului duplex (ferită și austenită), carburile sau fazele intermetalice fiind absente sau dificil de decelat (figura 7a and b).

Absența fazei sigma din microstructura sudurii sau a ZIT-ului este benefică, deoarece aceasta fază reduce rezistența la coroziunea pitting a oțelurilor inoxidabile duplex și produce fragilizarea matricei metalice, fiind

In the case of the samples where the shielding gas M21 was used (figure 7), a small finishing of the granulation is observed both in the ZIT and in the weld deposition. Here too, the main phases of the duplex steel microstructure are found (ferrite and austenite), carbides or intermetallic phases missing or difficult to be observed (figure 7 a and b).

The absence of the sigma phase in the weld or HAZ microstructure is beneficial, because this phase reduces pitting corrosion resistance of duplex stainless steels and embrittles the metal matrix, being located

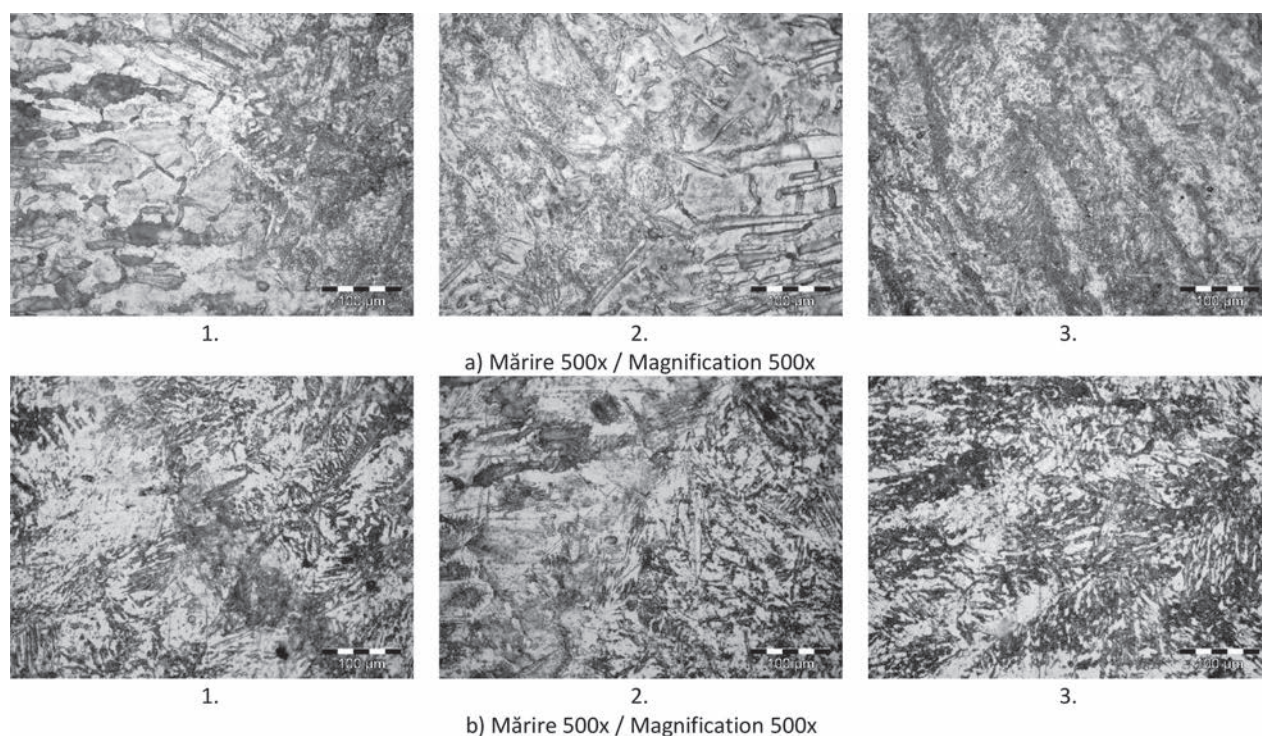


Figura 7. Microstructura sudurii realizată cu gaz de protecție M21, pentru poziția PC (a) și respectiv PF (b).

1-Material de bază; 2- ZIT ; 3- Sudura

Figure 7. Weld microstructure performed with M21 shielding gas, for PC (a) and PF (b) position respectively.

1-Base material; 2- HAZ 2; 3 – Weld (WM)

localizată mai ales la interfața austenită/sigma [22]. În acest caz se poate observa totodată tendința de creștere a granulației în zona influențată termo-mecanic, cu apariția plăcilor de austenită de tip Widmanstätten.

3.2 Conținutul de ferită

Determinarea conținutului de ferită în microstructura sudurii și a ZIT a fost efectuată cu un feriscop, în conformitate cu EN ISO 8249 și ASTM E562 [23-25], la o temperatură ambiantă de 28°C în momentul testării. Conform standardului s-a utilizat o grilă de test fabricată din plastic cu puncte de testare, care a fost plasată peste imaginea de microscopie, apoi s-au numărat punctele de intersecție ale fazei ferita și acest număr s-a împărțit la numărul total de puncte ale grilei, rezultând o estimare a fracției de volum a acestui constituent. Conținutul de ferită și austenită în zona de influență termică și în depunerea sudată a fost determinat pentru a sublinia influența acestuia asupra proporției fazelor din microstructura sudată. Rezultatele obținute la acest test sunt prezentate în tabelul 4. Pentru ambele tipuri de gaze, conținutul de ferită este mai mare în ZIT față de depunerea sudată, efect datorat regimului termic și tendinței de supraîncălzire din această zonă.

Analizând comparativ valorile conținutului de ferită

mostly at the austenite/sigma interface [22].

In this case, the trend of grain growth in the thermo-mechanically heat affected area can also be observed, with the appearance of Widmanstätten-type austenite plates.

3.2 Ferrite content

The determination of the ferrite content in the weld microstructure and ZIT was performed with a feritoscope, in accordance with EN ISO 8249 and ASTM E562 [23-25], at an ambient temperature of 28°C during testing. According to the standard, a plastic test grid with test points was used, which was placed over the microscopy image, then the intersection points of the ferrite phase were counted, and this number was divided by the total number of grid points, resulting in a estimation of the volume fraction of this constituent. The ferrite and austenite content in the heat-affected zone and weld deposition was determined to emphasize its influence on the proportion of the phases in the welded microstructure. The obtained results of this test are presented in table 4. For both types of shielding gases, the ferrite content is higher in the HAZ compared to the weld deposition, an effect due to the thermal regime and overheating tendency in this area. Comparatively analyzing the values of the ferrite

Tabelul 4. Conținutul de ferită**Table 4.** Ferrite content

Gaz de protecție / Shielding gas	Locație / Location	Poziție de sudare / Welding position	Epruvetă / Specimen	Conținut de ferită / Ferrite content [%]
C1	ZIT/ HAZ	PF	Rădăcină / root	62.71
		PF	Umplere / cap	65.62
		PC	Rădăcină / root	60.62
		PC	Umplere / cap	69.17
	MD/ WM	PF	Rădăcină / root	40.21
		PF	Umplere / cap	44.17
		PC	Rădăcină / root	37.5
		PC	Umplere / cap	49.17
M21	ZIT HAZ	PF	Rădăcină / root	47.8
		PF	Umplere / cap	48.2
		PC	Rădăcină / root	48.5
		PC	Umplere / cap	48.0
	MD WM	PF	Rădăcină / root	46.7
		PF	Umplere / cap	46.9
		PC	Rădăcină / root	47.3
		PC	Umplere / cap	46.7

obținute cu cele 2 gaze de protecție utilizate, se observă că în cazul gazului M21 se păstrează un echilibru al fazelor (cu ferită între min. 46.7% și max. 48.5%) corespunzător proporției ideale de 50% ferită și 50% austenită.

În cazul gazului C1 se poate vedea o creștere a conținutului de ferită mai ales în ZIT.

La poziția PF creșterea este mai mare în zona de rădăcină, în timp ce la poziția PC procentul de ferită maxim se înregistrează în straturile finale ale sudurii. Creșterea conținutului de ferită se poate datora condițiilor diferite de răcire. Dacă zona topită a fost mai supraîncălzită (așa cum se întâmplă în cazul gazului C1), se stabilizează ferita și se reduce volumul de austenită format în timpul răcirii.

content obtained with the 2 shielding gases used, it is observed that in the case of M21 gas a phase balance is preserved (with ferrite between min. 46.7% and max. 48.5%) corresponding to the ideal proportion of 50% ferrite and 50% austenite. In the case of C1 gas, an increase in the ferrite content can be seen especially in the HAZ.

At the PF position the increase is greater at the root, while at the PC position the maximum ferrite percentage is recorded in the final layers of the weld. The increase in ferrite content may be due to different cooling conditions. If the molten zone was overheated (as it happens in the case of C1 gas), the ferrite is stabilized, and the volume of austenite formed during cooling is reduced.

3.3 Încercări mecanice

3.3.1 Încercări la tracțiune

Pentru evaluarea comportării la solicitări mecanice au fost prelevate probe sudate utilizând cele două gaze de protecție analizate. Epruvetele au fost pregătite și testate conform specificațiilor SR EN ISO 4136:2013 [26]. În tabelul 5 se prezintă rezultatele testului de tracțiune, valorile limitelor de rupere obținute pentru ambele tipuri de gaze de protecție fiind peste cerințele minime.

Condițiile specifice de testare au fost: temperatura de testare de 20°C; cerințe minime pentru forța de rupere la tracțiune de 490 MPa; localizarea ruperii în materialul de bază (BM).

3.3 Mechanical testing

3.3.1 Tensile tests

To evaluate the behaviour under mechanical stress, welded samples were taken using the two analysed shielding gases. The samples were prepared and tested according to SR EN ISO 4136:2013 specifications [24]. Table 5 presents the results of the tensile test, the breaking limit values obtained for both types of shielding gases being above the minimum requirements.

The specific test conditions were: test temperature of 20°C; minimum tensile strength requirements of 490 MPa; break location in the base material (BM).

Tabelul 5. Rezultate test tracțiune**Table 5.** Tensile test results

Gaz de protecție / Shielding gas	Epruvetă / Specimen	Dimensiuni / Dimensions [mm]	Forță de rupere / Tearing Force [KN]	Rm min. [MPa]	Localizare rupere Tearing place
M21	PF	25x12	170	564	BM
		25x12	170	564	BM
	PC	25x12	168	558	BM
		25x12	169	563	BM
C1	PF	25x12	156	510	BM
		25x12	158	516	BM
	PC	25x12	158	516.3	BM
		25x12	159	520	BM

3.3.2 Rezistența la impact

Tenacitatea la rupere este foarte importantă pentru structurile din domeniul naval, mai ales când se trece din zone cu ape calde în zone cu ape foarte reci. De aceea, s-a efectuat testarea probelor sudate la solicitări de impact, conform SR EN ISO 9016:2013 [27]. S-au efectuat seturi de câte trei încercări, dimensiunile epruvetelor utilizate pentru testul de impact fiind: 55x10x10 mm. Condițiile specifice pentru încadrarea în cerințele standardului au fost: temperatura de încercare de -20°C; valoarea energiei de rupere la impact minime de 27 J.

În tabelul 6 sunt prezentate rezultatele încercării de impact.

3.3.2 Impact test

Fracture toughness is very important for structures in the naval field, especially when moving from warm water areas to very cold-water areas. That is why the testing of the welded samples for impact stress was carried out, according to SR EN ISO 9016:2013 [27]. Sets of three tests were performed, the dimensions of the samples used for the impact test being: 55x10x10 mm. The specific conditions for meeting the requirements of the standard were: test temperature of -20°C; minimum impact breaking energy value of 27 J.

In table 6 are shown the results of the impact tests.

Tabelul 6. Rezultate test impact – Charpy V**Table 6.** Impact test results – Charpy V

Gaz de protecție / Shielding gas	Epruvetă / Specimen	Poziția creștăturii epruvetei Location of V Notch	Energia de rupere / Energy [J]			Valoare medie / Average [J]
M21	PF	WM	31	31	31	31
		FL*	56	64	58	59
		FL+2mm	168	162	143	157
		FL+5mm	289	239	257	261
	PC	WM	32	34	32	32
		FL*	54	35	47	45
		FL+2mm	103	166	120	129
		FL+5mm	201	235	230	222
C1	PF	WM	44	46	42	44
		FL*	70	72	66	69.3
		FL+2mm	140	114	144	132.6
		FL+5mm	262	294	290	282
	PC	WM	50	48	46	48
		FL*	82	58	66	68.6
		FL+2mm	110	122	120	117.3
		FL+5mm	296	298	298	297.3

*FL – linia de topire / fusion line

3.3.3 Duritate

Pentru determinarea durității în diferitele zone caracteristice ale îmbinărilor sudate, au fost preluate probe conform SR EN ISO 6507-1:2006 [28]. Suprafețele în secțiune transversală ale probelor au fost pregătite metalografic iar metoda de testare a

3.3.3 Hardness

To determine the hardness in the different characteristic zones of the welded joints, samples were taken according to SR EN ISO 6507-1:2006 [28]. The cross-sectional surfaces of the samples were metallographically prepared, and the test method was

fost Vickers, folosind valoarea forței de apăsare de 10 kgf, timpul de testare de 10 s, și distanța dintre amprente de 1 mm. Condițiile și cerințele de încercare au fost: temperatură încercare de 20°C; valoare duritate maximă de 350 HV10.

Tabelele 7 și 8 prezintă rezultatele încercărilor de duritate. Se observă că în cazul utilizării gazului de protecție M21 valorile obținute au fost sub 350 HV10, ceea ce înseamnă că aportul de căldură și viteza de răcire au fost foarte bine controlate și nu au influențat duritatea în ZIT.

La utilizarea gazului C1 s-a obținut o creștere a durității în metalul depus (valoare maximă de 279 HV10) și mai ales în ZIT (valoare maximă de 304 HV10).

Vickers, using the pressing force value of 10 kgf, the test time of 10 sec, and the distance between indentation of 1 mm. The testing conditions and requirements were testing temperature of 20°C; maximum hardness value of 350 HV10.

Tables 7 and 8 show the results of the hardness tests. It is noted that when using the shielding gas M21 the values obtained were below 350 HV10, which means that the heat input and the cooling rate were very well controlled and did not influence the hardness in the HAZ.

When using C1 gas, an increase in hardness was obtained in the weld deposit (maximum value of 279 HV10) and especially in the HAZ (maximum value of 304 HV10).

Tabelul 7. Rezultatele încercărilor de duritate cu gaz de protecție M21

Table 7. Hardness test results using M21 shielding gas

Poziție de sudare / welding position	Localizare măsurare / Testing location	Valori medii de duritate, HV10/ Hardness average value, HV10				
		S31803 Material de bază 1 Base metal 1		WM	S31803 Material de bază 2 Base metal 2	
		BM	HAZ		HAZ	BM
PC	L1 – 2 mm sub zona de supraînălțare/ 2 mm below weld overheight	225	247	264	243	221
		224	247	268	254	224
		224	245	264	251	221
	L2 – 2 mm față de rădăcina sudurii / 2 mm of welding root	225	254	266	247	224
		228	247	265	242	219
		290	251	265	240	224
PF	L1 – 2 mm sub zona de supraînălțare / 2 mm below weld overheight	228	249	264	258	224
		228	251	260	254	232
		230	251	258	254	228
	L2 – 2 mm față de rădăcina sudurii / 2 mm of welding root	225	254	266	251	221
		225	258	264	251	224
		221	251	274	251	224

WM – weld metal; BM – base metal; HAZ – heat affected zone

Tabelul 8. Rezultatele încercării de duritate cu gaz de protecție C1

Table 8. Hardness test results using C1 shielding gas

Probă sudată / Specimen	Localizare măsurare / Testing location	Valori medii de duritate, HV10/ Hardness average value, HV10				
		S31803 Material de bază 1 Base metal 1		WM	S31803 Material de bază 2 Base metal 2	
		BM	HAZ		HAZ	BM
PC	L1 – 2 mm sub zona de supraînălțare/ 2 mm below weld overheight	251	302	264	289	254
		247	297	268	285	242
		253	299	270	297	243
	L2 – 2 mm față de rădăcina sudurii/ 2 mm of welding root	240	294	270	299	247
		245	285	264	302	251
		249	297	266	294	254
PF	L1 – 2 mm sub zona de supraînălțare / 2 mm below weld overheight	242	285	270	302	243
		247	297	279	289	251
		243	299	272	297	247
	L2 – 2 mm față de rădăcina sudurii / 2 mm of welding root	245	294	268	294	254
		251	302	270	297	247
		249	304	279	296	240

4. Concluzii

Rezultatele testelor efectuate pe îmbinări sudate din oțel S31803 (W1.4462) indică valori acceptabile ale parametrilor mecanici și microstructurali.

Corelarea dintre valorile energiei liniare la sudare, a vitezelor de sudare și a temperaturii între straturi a permis menținerea durității în sudură și ZIT sub limita maximă admisă în cazul utilizării gazului M21 (Ar +18% CO₂).

În cazul utilizării gazului C1 (CO₂ 100%), valorile durității în depunerea sudată, ZIT în vecinătatea rădăcinii și la zona de supraînălțare au crescut, dar nu au depășit limita maximă admisă de 350HV10.

Utilizarea unui număr mai mare de rânduri în cazul gazului de protecție C1 a produs extinderea mai mare a ZIT, dar efectele ciclurilor termice generate de suprapunerea rândurilor nu au afectat semnificativ caracteristicile de rezistență și tenacitate ale îmbinării sudate.

Controlul riguros al energiei termice introduse la sudare (energia liniară și temperatura între straturi) a permis menținerea valorilor de duritate la limita maximă admisă pentru ambele gaze de protecție, cele mai favorabile valori fiind înregistrate pentru energia liniară situată între 0.38 și 1.81 kJ/mm.

Rezultatele testului de rezistență la impact au indicat valori ale forței de rupere mai mici la nivelul sudurii și pe linia de fuziune în cazul utilizării gazului M21.

Deși procentul de ferită din ZIT a crescut în raport cu procentul de austenită în cazul utilizării gazului C1 (60 – 69% Ferită), rezultatele testelor mecanice efectuate au indicat valori acceptabile pentru proprietățile îmbinării sudate.

Activitatea ridicată a gazului de protecție C1 și caracterul pronunțat rutilic al sârmelor tubulare au condus la obținerea unor valori ale tenacității mai reduse, care pot fi acceptabile doar pentru temperaturi de lucru peste 0°C.

4. Conclusions

The results of the tests carried out on welded joints of steel S31803 (W1.4462) indicate acceptable values of the mechanical and microstructural parameters.

Correlation between values of heat input, welding speeds and temperature between layers allowed to maintain weld hardness and HAZ below the maximum allowed limit when using M21 gas (Ar +18% CO₂).

In the case of using C1 gas (CO₂ 100%), the welding hardness values in weld deposit, HAZ in the vicinity of the root and at the surface area increased but did not exceed the maximum allowed limit of 350HV10.

The use of a higher number of rows in the case of shielding gas C1 produced greater expansion of the HAZ, but the thermal cycling effects generated by overlapping rows did not significantly affect the strength and toughness properties of the welded joint.

The rigorous control of the thermal energy introduced during welding (heat input and temperature between the layers) allowed the hardness values to be kept at the maximum limit allowed for both shielding gases, the most favourable values being recorded for the linear energy between 0.38 and 1.81 kJ/mm.

The results of the impact test indicated lower values of tearing force at the weld level and at the fusion line when using the M21 shielding gas.

Although the percentage of ferrite in HAZ increased relative to the percentage of austenite when C1 gas was used (60 – 69% Ferrite), the results of the mechanical tests performed indicated acceptable values for the properties of the welded joint.

The high activity of the shielding gas C1 and the pronounced rutile character of the tubular wires led to lower toughness values, which can only be acceptable for working temperatures above 0°C.

Bibliografie/References

- [1] Kou, S., 2003. Welding Metallurgy, Second Edition by John Wiley & Sons, Inc, ISBN 0-471-43491-4
- [2] Sproesser, G. et al. Sustainable welding process selection based on weight space partitions, Procedia CIRP 40 (2016) pp 127 – 132
- [3] Pires, I., Quintino, L., Miranda, R.M.,. Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate, Materials and Design, 2007, vol. 28, issue 5, pp 1623-1631
- [4] Voiculescu, I., Geanta, V., Vasile, I.M., Aliaje feroase pentru structuri sudate (Ferrous Alloys for Welded Structures), Ed. BREN, București, 2016
- [5] Jana, S., Effect of heat input on the HAZ properties of two duplex stainless steels, Journal of Materials Processing Technology, 33, 3 (1992) pp 247-261
- [6] Besliu, M. M., Voiculescu, I., Solomon Gh., Effects of Dilution on Weld Overlays Realized with Flux-Cored Arc Welding (FCAW) Process Using 309LV Filler Metal on the S235JR Steel, UPB, Sci. Bull.Series B-Chemistry and Materials Science,

- [7] Nowacki, J., Zajac, P., Microstructure and corrosion resistance of the duplex steel wide-gap one-side fluxcored welded joints, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* Vol. 29, Issue 2 (2008) pp 191-198
- [8] Nowacki, J., Ferritic-austenitic steel and its weldability in large size constructions, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* Vol. 32, Issue 2 (2009) pp 115-141
- [9] Cruz-Crespo A., et al., Microstructure behavior in GMAW 2205 duplex steels welding for offshore applications, 2022, *Mineria y Geologia*, Vol 38, Issue 2, pp 132-140
- [10] Amudarasan, N.V., Palanikumar, K. and Shanmugam, K. Tensile and Impact Properties of AISI 304L Stainless Steel Welded Joints Using Austenitic and Duplex Stainless-Steel Filler Metal. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2012 Vol 1 (9) pp 1-5
- [11] Raffi, M., Madhusudhan, R., Srinivasa Rao, K., Effect of Welding Process on Microstructure, Mechanical and Pitting Corrosion Behaviour of 2205 Duplex Stainless Steel Welds, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 330 (2018) 012026 doi:10.1088/1757-899X/330/1/012026
- [12] SR EN 10028-7:2008 – Produse plate din oțel pentru recipiente sub presiune. Partea 7: Oțeluri inoxidabile
- [13] Muzaka, K., et al. A Study on Prediction of Welding Quality Using Mahalanobis Distance Method by Optimizing Welding Current for A Vertical Position Welding, *Procedia Engineering* 174 (2017) pp 60 – 67
- [14] SR EN ISO 6947:2011- Sudare și procedee conexe. Poziții de sudare
- [15] SR EN 1011-1:2009 – Sudare. Recomandări pentru sudarea materialelor. Partea 1: Ghid general pentru sudarea cu arc electric
- [16] SR EN ISO 14175:2008- Materiale consumabile pentru sudare. Gaze și amestecuri de gaze pentru sudarea prin topire și procedee conexe
- [17] Kikani, P., Study of Shielded Gases for MIG Welding, *Journal of Materials & Metallurgical Engineering* (2016) ISSN: 2321-4236, Vol. 6, Issue 1, pp 6-10
- [18] Rontescu, C., Iacobescu, G., Sudarea prin topire, Editura Bren (2019) Vol.II, ISBN 978-606-610-225-4
- [19] Zhang, Z. et al. The influence of microstructural evolution on selective corrosion in duplex stainless steel flux-cored arc welded joints, *Corrosion Science* 120 (2017) pp 194–21
- [20] ASTM E3-11(2017)- Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens
- [21] A923 – 14 (2022) Test Methods for Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Duplex Austenitic/Ferritic Stainless Steels
- [22] Kobayashi, D.Y., Wolyneć, S., Evaluation of the Low Corrosion Resistant Phase Formed During the Sigma Phase Precipitation in Duplex Stainless Steels, *Materials Research* (1999), Vol. 2, No. 4, pp 239-247
- [23] ASTM E562- Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count
- [24] A932/A932M- 01(2019) Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Amorphous Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method with Sheet Specimens
- [25] A928/A928M- 14 Specification for Ferritic/Austenitic (Duplex) Stainless Steel Pipe Electric Fusion Welded with Addition of Filler Metal
- [26] SR EN ISO 4136:2013 – Încercări distructive ale sudurilor din materiale metalice. Încercarea la tracțiune transversală
- [27] SR EN ISO 9016:2013 – Încercări distructive ale îmbinărilor sudate din materiale metalice. Încercarea la încovoiere prin șoc. Poziția epruvetei, orientarea creștăturii și examinare
- [28] SR EN ISO 6507-1:2006 – Materiale metalice. Încercarea de duritate Vickers. Partea 1: Metodă de încercare

Pentru citare:

Puchianu, M., Voiculescu, I., Feier, A., Research on the influence of shielding gas in correlation with welding parameters on the mechanical properties of stainless-steel duplex joints for the shipbuilding industry, Sudura, nr. 2 (2024), year XXXIV, 4-16



NEWSLETTER

Buletin informativ editat de Asociația de Sudură din România



Nu uitați!

Informații noi despre activitățile ASR sunt prezentate lunar în **ASR Newsletter**, accesibil pe **www.asr.ro**