

Marcin CHUDZIŃSKI

ANALIZA CZASU I WYDAJNOŚCI SPAWANIA STALI SUPERDUPELEKS

Streszczenie: Praca zawiera charakterystykę stali dupleks oraz ilościowe statystyki i prognozy jej zastosowania. Przedstawiono także teorię w zakresie obliczania czasu głównego i czasu całkowitego spawania na podstawie objętości wykonywanej spoiny oraz współczynnika czasu jarzenia się łuku i wydajności stapiania. W części badawczej wykonano analizę porównawczą czasu i wydajności spawania w pozycji PF złącza blach o grubości 8 mm ze stali superdupleks X2CrNiMoN25-7-4 (1.4410), spawanego różnymi metodami. Analiza czasów oraz wydajności spawania pozwoliła ustalić różnice w tym zakresie między możliwymi do zastosowania metodami spawania i potwierdzić kilkakrotnie wyższą wydajność metody 136 (FCAW) niż pozostałych badanych: 111 (SMAW) i 141 (GTAW).

Słowa kluczowe: stal dupleks, stal superdupleks, SAF 2507, X2CrNiMoN25-7-4 (1.4410), czas spawania, wydajność spawania

1. WPROWADZENIE

Stale dupleks (będące jedną z grup stali nierdzewnych) dzięki składowi i ferrytyczno-austenitycznej mikrostrukturze łączą zalety zarówno chromowej stali ferrytycznej, jak i chromowo-niklowej stali austenitycznej i dlatego charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi oraz odpornością na korozję [3–5].

Ogólne zastosowanie stali nierdzewnych wzrasta w tempie około 5% rocznie. Zastosowanie stali dupleks, wynoszące ok. 1% ogółu stali nierdzewnych w 2007 roku, ciągle się zwiększa. Prognozuje się, że w roku 2020 osiągnie poziom 4%. W ramach grupy obserwuje się też tendencję zmniejszającego się zastosowania podstawowego gatunku 2205 (67% ogółu stosowanych stali dupleks w 2004 roku do 47÷48% w roku 2008), a wzrostu użycia gatunków z podgrup: lean dupleks (2101 i 2304) oraz nieznacznie superdupleks (m.in. 2507). Mając na uwadze także niższą cenę stali dupleks w porównaniu ze stalami austenitycznymi (z uwagi na mniejszą zawartość deficytowego niklu i molibdenu), należy spodziewać się ugruntowania pozycji i dalszego wzrostu udziału i zastosowania tych materiałów. W zakresie blach stale superdupleks są obecnie najbardziej zaawansowaną podgrupą stali dupleks, dostępną do praktycznych zastosowań przemysłowych [1].

Blisko dwukrotnie wyższa wytrzymałość stali duplex w porównaniu ze stalami austenitycznymi pozwala redukować grubości elementów konstrukcji i w efekcie zmniejszać masę oraz koszty jej wykonania, a doskonalsza odporność korozyjna pozwala dłużej eksploatować obiekty lub stosować je z powodzeniem w środowiskach bardziej agresywnych chemicznie [3–5].

Przy zachowaniu ograniczeń w zakresie wartości energii liniowej spawania oraz temperatury międzyściegowej stale duplex mogą być z sukcesem spawane z wykorzystaniem większości konwencjonalnych metod spawania – także intensywnie rozwijającymi się i szeroko wdrażanymi obecnie w przemyśle metodami spawania laserowego czy plazmowego – lecz szerokie i uniwersalne zastosowanie znajdują przede wszystkim [3–5]:

- spawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego (GTAW, proces 141 wg PN-EN ISO 4063),
- spawanie łukowe elektrodą otuloną (SMAW, proces 111 wg PN-EN ISO 4063),
- spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonach (GMAW/FCAW, proces 135/136 wg PN-EN ISO 4063).

Dobór technologii spawania (opracowanie procedur spawalniczych) ma na celu zapewnić uzyskanie złącza o wymaganych właściwościach mechanicznych oraz wymaganej odporności korozyjnej przy jednoczesnym zapewnieniu możliwie najwyższej wydajności spawania [2, 6].

Cel przeprowadzonego badania to ustalenie i porównawcza analiza czasów oraz wydajności spawania stali superduplex metodami 141, 111 i 136.

2. WYDAJNOŚĆ I CZAS SPAWANIA

Wydajność spawania jest określana jako iloraz całkowitego czasu spawania do jednostki długości złącza bądź do zespołu/całego obiektu [6].

Całkowity czas spawania Tn zgodnie z techniczną normą czasu spawania dany jest wzorem [6]:

$$Tn = \frac{t_g}{W_j} \quad (1)$$

gdzie:

- t_g – czas główny spawania, h·m⁻¹ lub h·szt.⁻¹;
- W_j – współczynnik czasu jarzenia się łuku.

Współczynnik czasu jarzenia się łuku W_j zależny jest od stopnia automatyzacji procesu spawania. Wartości tego współczynnika zawarto w tabeli 1 [6].

Analiza czasu i wydajności spawania...

Tabela 1. Wartości współczynnika czasu jarzenia się łuku W_j [6]

Table 1. Arc glow time factor values W_j [6]

Stopień automatyzacji	Metody spawania możliwe do zastosowania (wg ISO 4063)	Współczynnik czasu jarzenia się łuku W_j
Spawanie ręczne	111, 141	0,20÷0,30
Spawanie zmechanizowane	135, 136	0,30÷0,50
Spawanie zautomatyzowane	121, 135, 136	0,50÷0,80
Spawanie zrobotyzowane	135, 136, 151	0,80÷0,95

Z kolei czas główny spawania t_g dany jest wzorem [6]:

$$t_g = \frac{G}{W_{st}} \quad (2)$$

gdzie:

- G – masa stopiwa (spoiny), $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ lub $\text{kg}\cdot\text{szt.}^{-1}$;
- W_{st} – wydajność stapiania, $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$.

Masa stopiwa (spoiny) G wyliczana jest z jej objętości [6]:

$$G = \frac{V \cdot \rho}{1000} \quad (3)$$

gdzie:

- V – objętość spoiny, $\text{cm}^3\cdot\text{m}^{-1}$ lub $\text{cm}^3\cdot\text{szt.}^{-1}$;
- ρ – gęstość właściwa, $\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$, dla stali $7,85 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$.

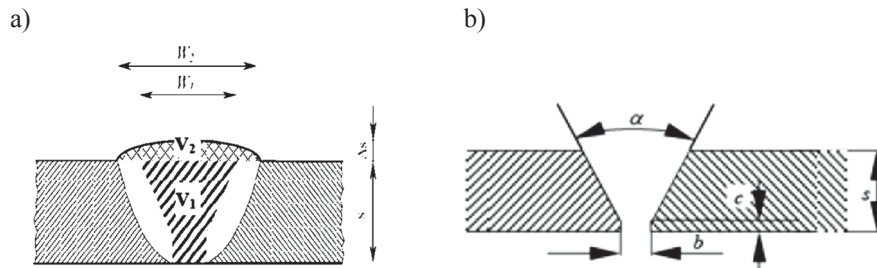
Objętość V jest sumą objętości rowka spawalniczego i nadlewu spoiny [6]:

$$V = V_1 + V_2 \quad (4)$$

gdzie:

- V_1 – objętość spoiny wewnątrz rowka spawalniczego, $\text{cm}^3\cdot\text{m}^{-1}$ lub $\text{cm}^3\cdot\text{szt.}^{-1}$;
- V_2 – objętość spoiny w nadlewie, $\text{cm}^3\cdot\text{m}^{-1}$ lub $\text{cm}^3\cdot\text{szt.}^{-1}$.

Na rysunku 1 przedstawiono zależność (4) dla spoiny czołowej z ukosowaniem na „Y”, takiej, którą przyjęto w złączach będących przedmiotem analizy wydajności. Zaprezentowano także geometrię rowka spawalniczego (wysokość progu c , odstęp blach b oraz kąt rowka spawalniczego α). Do obliczeń objętości spoiny w tym przypadku należy użyć poniżej przedstawionych zależności (5) oraz (6), wykorzystując też wzór (7) [6].



Rys. 1. Obliczanie objętości spoiny [6]:
 a) składniki objętości spoiny, b) geometria rowka spawalniczego
 Fig. 1. Weld volume calculation [6]: a) weld volume components, b) weld groove geometry

$$V_1 = s \cdot b + (s - c)^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

gdzie:

- s – grubość spoiny (blachy), mm;
- b – odstęp blach, mm;
- c – wysokość progu, mm;
- α – kąt rowka spawalniczego, °.

$$V_2 = 2/3 \cdot \Delta s \cdot W_2 \quad (6)$$

gdzie:

- Δs – wysokość nadlewu spoiny, mm;
- W_2 – szerokość lica spoiny, mm; $W_2 = W_1 + (2 \div 4)$.

$$W_1 = 2 \cdot (s - c) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + b \quad (7)$$

gdzie:

- s – grubość spoiny (blachy), mm;
- b – odstęp blach, mm;
- c – wysokość progu, mm;
- α – kąt rowka spawalniczego, °.

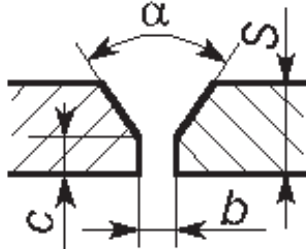
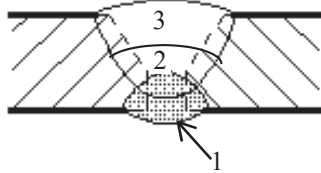
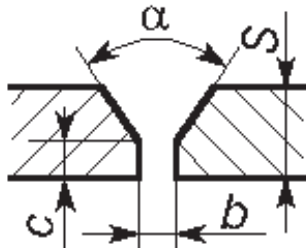
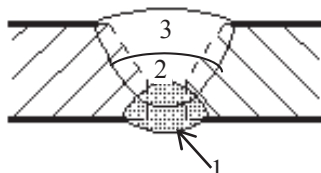
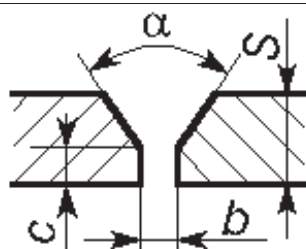
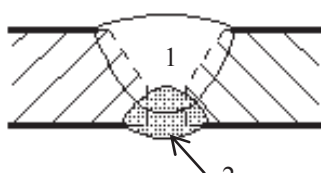
Wydajność stapiania (W_{st}) to ilość stopiwa uzyskana w czasie jarzenia się łuku (podawana w $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) z uwzględnieniem strat na rozpryski, powstawanie żużla, ogarki elektrody itd. Jest to współczynnik zależny od metody spawania, średnicy drutu elektrodowego oraz prądu spawania. W trakcie spawania można wyznaczyć wartość wydajności stapiania, dzieląc masę zużytego spoiwa przez czas spawania, dla którego to zużycie nastąpiło [6].

3. BADANIA WŁASNE

W celu ustalenia i porównawczej analizy czasów oraz wydajności jednostkowej spawania wykonano złącza spawane metodami 141, 111 i 136 w pozycji pionowej (PF wg PN-EN ISO 6947), związanej z najniższą wydajnością spawania. Złączom nadano oznaczenia związane z grubością blachy oraz pozycją

spawania (np. 136-8PF oznacza złącze blach grubości 8 mm wykonane w pozycji PF metodą 136). Zakładany sposób przygotowania krawędzi blach i budowę spoin dla poszczególnych złączy przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Przygotowanie krawędzi i budowa spoin złączy testowych
Table 2. Edges preparation and weld passes configuration of test joints

Złącze	Przygotowanie – szkic	Budowa spoiny – szkic (ściegi)
141-8PF	 <p>$c = 2 \text{ mm}, b = 2 \text{ mm}, \alpha = 65^\circ$</p>	
111-8PF	 <p>$c = 2 \text{ mm}, b = 2 \text{ mm}, \alpha = 65^\circ$</p>	
136-8PF	 <p>$c = 4 \text{ mm}, b = 0 \text{ mm}, \alpha = 70^\circ$</p>	

Do wykonania złączy wybrano blachy ze stali superdupleks SAF 2507 o oznaczeniu normatywnym X2CrNiMoN25-7-4 (1.4410). Dane o składzie chemicznym użytych blach zawiera tabela 3.

Tabela 3. Skład chemiczny blach użytych do wykonania złączy testowych
Table 3. Chemical composition of plates used for test joints

C, %	Mn, %	P, %	S, %	Si, %	Cu, %	Ni, %	Cr, %	Mo, %	N, %
0,015	0,810	0,0284	0,0003	0,325	0,202	5,560	25,177	3,815	0,2714

Do spawania metodą 136 dobrano drut proszkowy rutyłowy o średnicy \varnothing 1,2 mm w odmianie PW (przeznaczony do spawania w pozycjach przymusowych PF/PC), dedykowany do spawania stali 1.4410 oraz 1.4501. Drut ten oznaczony jest wg PN-EN ISO 17633-A symbolem T 25 9 4 N L P M21 2. Do spawania metodą 141 użyto drutu o średnicy \varnothing 2,0 mm oznaczonego W 25 9 4 N L zgodnie z normą PN-EN ISO 14343. Do spawania metodą 111 użyto elektrod rutyłowych o średnicy \varnothing 2,5 mm oznaczonych E 25 9 4 N L R 3 2 wg normy PN-EN 1600. Deklarowany przez producentów spoiw skład chemiczny stopiwa przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Skład chemiczny stopiwa użytych spoiw (wg atestów producenta)

Table 4. Weld metal chemical composition for used consumables (acc. producer certificates)

Metoda spawania	C, %	Mn, %	P, %	S, %	Si, %	Cu, %	Ni, %	Cr, %	Mo, %	N, %
141	0,014	0,36	0,016	0,0007	0,38	0,085	9,34	25,15	3,91	0,235
111	0,030	0,06	0,018	0,0050	0,62	0,080	10,3	24,80	4,30	0,270
136	0,030	0,93	0,018	0,0008	0,74	0,060	9,72	25,06	3,80	0,210

Złącza wykonywano dwustronnie, z wycinaniem przez szlifowanie strony spawanej w drugiej kolejności i czyszczeniem przez szlifowanie między poszczególnymi ściegami.

Zakresy parametrów energetycznych spawania dobrano na podstawie ogólnych wytycznych dotyczących zalecanej maksymalnej energii liniowej łuku ($0,5 \div 1,5 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$) [4, 5] oraz obszarów stabilności łuku (uwzględniając specyfikę związaną z pozycją spawania PF – najwyższa energia, lecz najniższe prądy z obszaru stabilnej pracy i ściegi zakosowe). Jako gaz osłonowy w metodzie 136 wybrano mieszanekę M21 wg PN-EN ISO 14175 o składzie 82% Ar i 18% CO₂. Założono dla wszystkich ściegów i złączy maksymalną temperaturę międzyściegową 100°C.

W tabeli 5 zawarto parametry energetyczne poszczególnych ściegów i całych złączy testowych (prąd spawania, napięcie łuku i prędkość spawania). W tabeli 5 przedstawiono także uzyskane energie liniowe łuku dla ściegów i całych złączy (liczone bez współczynnika metody spawania [4]).

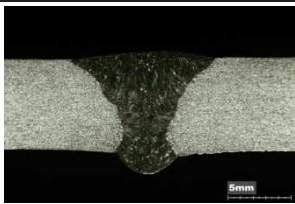
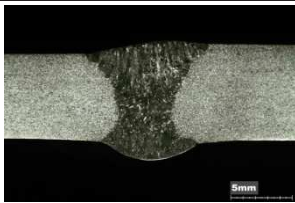
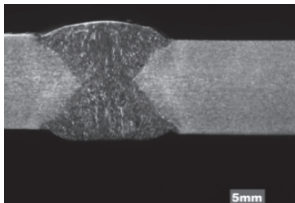
Tabela 5. Zestawienie parametrów energetycznych spawania dla złączy testowych

Table 5. Summary of welding energy parameters for test joints

Złącze/ścieg	Średnie napięcie łuku U , V	Średni prąd spawania I , A	Średnia prędkość spawania V_s , mm·s ⁻¹	Średnia energia łuku dla ściegu Q , kJ·mm ⁻¹	Średnia energia łuku dla złącza Q , kJ·mm ⁻¹
141-8PF/1	9,81±0,10	84,41±0,81	0,57	1,44±0,03	1,56±0,14
141-8PF/2	10,72±0,08	103,63±1,03	0,72	1,54±0,02	
141-8PF/3	11,11±0,07	100,24±0,69	0,65	1,71±0,03	
111-8PF/1	19,84±0,40	54,82±2,93	1,17	0,93±0,04	0,94±0,07
111-8PF/2	20,32±0,55	81,61±3,33	1,91	0,87±0,04	
111-8PF/3	20,61±0,58	81,47±4,83	1,64	1,02±0,05	
136-8PF/1	23,66±0,09	149,10±2,89	2,29	1,54±0,04	1,59±0,06
136-8PF/2	23,74±0,10	150,56±2,83	2,19	1,63±0,04	

W tabeli 6 zaprezentowano obrazy zglądów makroskopowych przekroju złącza oraz uzyskane rzeczywiste wydajności stapiania W_{st} .

Tabela 6. Zglądy makroskopowe przekroju złącza oraz uzyskane wydajności stapiania W_{st}
Table 6. The macroscopic cross-sectional images of joints and the gained melting efficiency W_{st}

Złącze	Zgląd makroskopowy przekroju złącza	Wydajność stapiania W_{st} , kg·h ⁻¹
141-8PF		0,3
111-8PF		0,6
136-8PF		1,7

Wykorzystując dane zawarte w rozdziale 2, wykonano obliczenia, których wyniki zestawiono w tabeli 7. Zawiera ona kalkulację czasu głównego t_g w h·m⁻¹ (czasu jarzenia się łuku) i czasu całkowitego spawania Tn w h·m⁻¹ złączy spawanych stali superdupelks w pozycji pionowej PF. Tabela obejmuje czasy spawania dla trzech porównywanych metod spawania: 141, 111 i 136. Zawiera także w ostatniej kolumnie wyliczenie wydajności spawania poszczególnymi metodami, będącej odwrotnością czasu całkowitego spawania Tn .

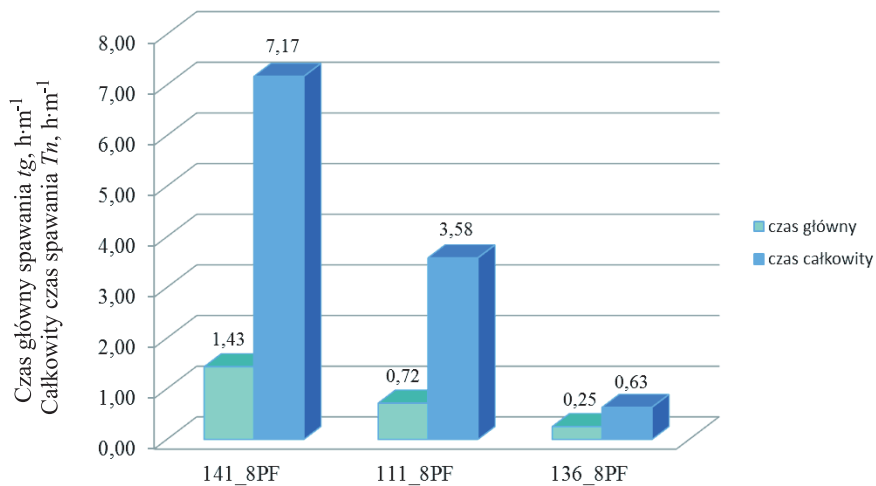
Tabela 7. Porównanie czasów spawania i wydajności spawania stali superdupleks metodami 111, 141 i 136

Table 7. Comparison of welding time and welding efficiency for superduplex steel welded by 111, 141 and 136 processes

Złącze	s , mm	G , kg·m ⁻¹	W_{st} , kg·h ⁻¹	t_g , h·m ⁻¹	W_j	Tn , h·m ⁻¹	Wydajność spawania, m·h ⁻¹
141-8PF	8	0,43	0,30	1,43	0,20	7,17	0,14
111-8PF	8	0,43	0,60	0,72	0,20	3,58	0,28
136-8PF	8	0,43	1,70	0,25	0,40	0,63	1,58

4. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Na wykresie (rys. 2) przedstawiono porównanie czasów głównych i czasów całkowitych spawania złącza w pozycji PF metodami 141, 111 i 136.

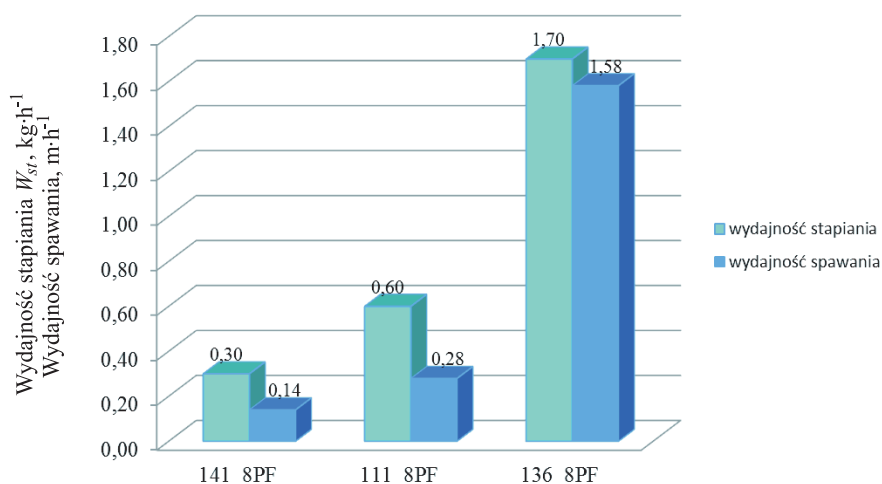


Rys. 2. Porównanie czasów głównych i czasów całkowitych spawania różnymi metodami złącza stali superdupleks w pozycji PF

Fig. 2. Comparison of main welding time and total welding time for superduplex steel PF joints welded using different processes

Jednostkowy czas główny spawania t_g w pozycji PF metodą 136 jest najkrótszy ($0,25 h \cdot m^{-1}$). Spawanie metodą 111 wymaga blisko trzykrotnie więcej czasu głównego, a metodą 141 – prawie sześciokrotnie więcej. Porównanie czasów całkowitych spawania wypada jeszcze mniej korzystnie dla metod 111 i 141 z uwagi na o połowę niższy współczynnik czasu jarzenia się łuku W_j dla tych metod w porównaniu ze współczynnikiem dla metody 136. W związku z tym całkowity jednostkowy czas spawania T_n metodą 136 to $0,63 h \cdot m^{-1}$, metodą 111: $3,58 h \cdot m^{-1}$, a metodą 141 aż $7,17 h \cdot m^{-1}$.

W celu pełniejszego zaprezentowania powyższych wartości czasu całkowitego spawania na wykresie (rys. 3) przedstawiono także jego odwrotność – wydajność spawania. Parametr ten wskazuje, ile godzin potrzeba na wykonanie metra bieżącego spoiny. Metodą 136 w analizowanych warunkach wykonać można $1,58 m$ gotowej spoiny w ciągu godziny, metodą 111: $0,28 m \cdot h^{-1}$, a metodą 141 – tylko $0,14 m \cdot h^{-1}$.



Rys. 3. Porównanie wydajności stapiania i wydajności spawania złączy stali superdupleks spawanych różnymi metodami w pozycji PF

Fig. 3. Comparison melting efficiency and welding efficiency for superduplex steel PF joints welded using different processes

Metoda spawania 136 daje ponad pięciokrotnie wyższą wydajność spawania w pozycji PF w porównaniu z metodą 111 i ponad dziesięciokrotnie w porównaniu z metodą 141. W podobny sposób kształtuje się porównanie wydajności stapiania W_{st} , czyli masy spoiwa, która może być „wbudowana” w spoinę w jednostce czasu. Dla porównywanych metod została ona wyznaczona dzięki wykonanym próbom spawania. Wartości ustalonych w ten sposób wydajności stapiania dla metod 111, 141 i 136 przedstawiono także na rysunku 3.

LITERATURA

- [1] CHARLES J., CHEMELLE P.: The history of duplex developments, nowadays DSS properties and duplex market future trends. Duplex Stainless Steels Conference, Beaune, Francja, 2010.
- [2] CIECHACKI K., GIĘTKA T., CHUDZIŃSKI M.: Analiza czasu i kosztów spawania zbiornika magazynowego. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 51(5), 2012, 211–212.
- [3] GIĘTKA T., CIECHACKI K., CHUDZIŃSKI M.: Zastosowanie stali duplex w przemyśle spożywczym. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 52(2), 2013, 122–124.
- [4] KARLSON L.: Spawanie stali typu duplex – przegląd aktualnych zaleceń. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 5, 2012, 50–60.
- [5] NOWACKI J.: Stal duplex w konstrukcjach spawanych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa, 2013.
- [6] PILARCZYK J. (red.): Poradnik inżyniera – Spawalnictwo. Tom 1. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa, 2003.

TIME AND EFFICIENCY ANALYSIS OF SUPERDUPLEX STEEL WELDING

Summary: This paper contains the characteristics of duplex steel and the quantitative statistics and forecasts for its use. There is presented theory of calculating main welding time and total welding time based on the volume of the weld, time factor of the arc's glow and melt efficiency. The comparative analysis of the welding time and efficiency in the PF position of the 8mm sheet metal joint of X2CrNiMoN25-7-4 (1.4410) superduplex stainless steel welded by various processes was performed. Analysis of welding times and weld efficiency has allowed us to determine the differences between the applicable welding processes and to confirm several times higher efficiency of the 136 process (FCAW) from the other examined: 111 (SMAW) and 141 (GTAW).

Key words: duplex steel, superduplex steel, SAF 2507, X2CrNiMoN25-7-4 (1.4410), welding time, welding efficiency