ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: MECHANIKA z. 70 Nr kol. 673

Andrzej KLIMPEL
Andrzej SZYMAŃSKI

TECHNOLOGIA SPAWANIA CIENKICH BLACH ZE STALI OOH23N28M3Cu METODĄ TIG i MIG

Streszczenie. Przedstawiono badania nad spawalnością blach ze stali OOH23N28M3Cu o grubości 3 i 6 mm według kryterium skłonności do pęknięć gorących. Podano parametry spawania złączy doczołowych blach metodą TIG i MIG oraz ich własności mechaniczne.

Wprowadzenie

Stale gatunku OOH23N28M3Cu o strukturze czysto austenitycznej (rys. 1) odporne są na działanie zimnych i gorących roztworów H_3PO_4 o dowolnym stężeniu wrzących kwasów HNO_3 i H_2SO_4.

Rys. 1. Mikrostruktura blach ze stali OOH23N28M3Cu w stanie dostawy. Widoczne węgliki na granicach i wewnątrz ziarn austenitu. Pow. 250x Traw. CrO_3

Fazy, które wydzielają się w tych stalach po długotrwałym wygrzewaniu w temperaturach powyżej około 500°C, to głównie węgliki $M_{23}C_6$ i krucha faza sigma [1, 2, 3].

W przypadku procesów spawania, cechujących się bardzo szybkim nagrzewaniem i nieco wolniejszym chłodzeniem metalu strefy wpływu ciepła jak i metalu spoiny, zjawiska te nie odgrywają istotnej roli z punktu widzenia spawalności stali austenitycznej o bardzo małej zawartości pierwiastków interstycyjnych [4, 5]. Poważnym natomiast problemem występującym przy spawaniu tych stali są pęknięcia gorące, których mechanizm tworzenia się nadal podlega intensywnym badaniom. Ogólnie jednakże przyjmuje się, że pęknięcia gorące powstają w wyniku segregacji pierwiastków stopowych, zanieczyszczeń i związków niemetalicznych przy krzepnięciu metalu spoiny jak i oddziaływaniu cyklu cieplnego w SWC oraz powstających równocześnie znacznych naprężeń skurczowych [6, 7, 8].

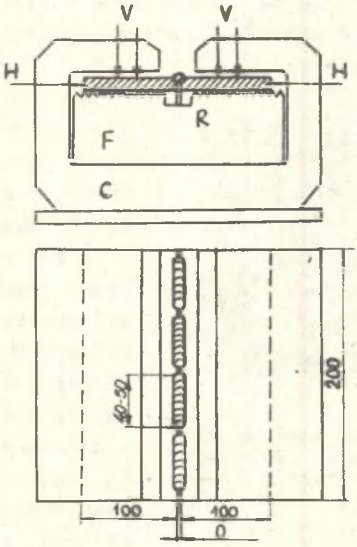
Ponieważ spawanie konstrukcji wiąże się zawsze z powstawaniem naprężeń spawalniczych przekraczających często granicę plastyczności stali, zwłaszcza w przypadku spawania grubych, silnie usztywnionych blach, zasadniczym środkiem zapobiegającym tworzeniu się pęknięć gorących jest stosowanie stali i dodatkowych materiałów spawalniczych o najwyższej czystości, a więc minimalnej zawartości P, S i O_2.

Równocześnie dzięki ograniczeniu zawartości węgla do wartości poniżej 0,03%, a ostatnio nawet do 0,01%, łącznie z tlenem i azotem [9], wyeliminowany jest całkowicie problem korozji międzykrystalicznej.

W artykule przedstawiono przebieg badań skłonności do pęknięć gorących blach i drutu ze stali 00H23N28M3Cu produkcji Huty Baildon oraz ustalono parametry spawania doczołowego blach o grubości 3 i 6 mm metodą TIG i MIG.

Badania skłonności do pęknięć gorących złączy spawanych

Skłonność do pęknięć gorących złączy doczołowych spawanych metodą TIG i MIG wyznaczono przy użyciu próby Schnadt-Fisco (rys. 2).



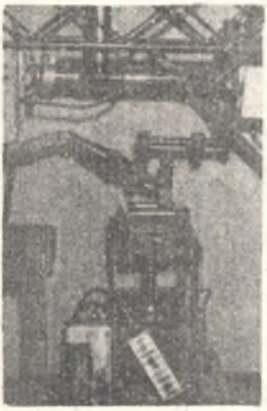
Rys. 2. Próba Schnadt-Fisco

Materiały użyte w badaniach zestawiono w tablicy 1. Próbki o wymiarach 100x200x8 mm mocowano sztywno w przyrządzie przy różnych odstępach między brzegami blach i z przygotowaniem brzegów na I lub V. Próbki łączono czterema krótkimi ściegami o długości około 40 mm układanymi kolejno jeden po drugim, po ostygnięciu poprzedniego ściegu do temperatury około 50°C, dla

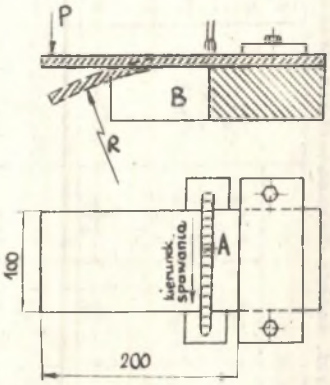
Tablica 1

Skład chemiczny materiałów użytych do badań

Materiał	Skład chemiczny								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Blacha g = 3 mm	0,04	1,55	0,37	0,013	0,015	22,78	29,82	2,98	3,00
Blacha g = 6 mm	0,034	1,57	0,77	0,013	0,012	24,47	27,5	2,73	3,35
Drut Φ = 1,2 mm	0,045	1,72	0,46	0,018	0,014	26,0	28,50	2,93	3,66



Rys. 3. Stanowisko dla przeprowadzenia próby Transvarestraint



Rys. 4. Zasada wykonania próby Transvarestraint

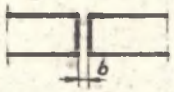
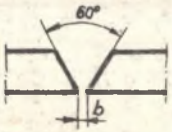
powiększenia ostrości próby. Za miarę skłonności do pęknięć przyjęto stosunek długości pęknięć do długości ściegów ułożonych przy określonej energii liniowej łuku i geometrii złącza. Wyniki pomiarów zestawiono w tablicy 2 i 3.

Badania skłonności do pęknięć gorących blach

Skłonność do pęknięć gorących blach ze stali 00H23N28M3Cu o grubości 3 i 6 mm ustalono metodą Transvarestraint [10] (rys. 3). Próbki o wymiarach 250x80xg mm umieszczone w uchwycie specjalnie wykonanego do tego celu przyrządu (rys. 4) przetapiano metodą TIG bez dodatku stopiwa, przy czym w punkcie B drogi łuku wymuszano trwałe odkształcenie o wielkości zależnej od promienia krzywizny wymiennego bloku C. Przetapianie prowadzono ze stałą energią liniową łuku, przy której w próbie Schnadt-Fisco nie wystąpiły pęknięcia gorące (tablica 2).

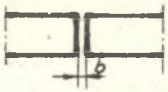
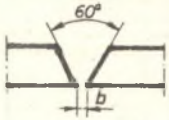
Tablica 2

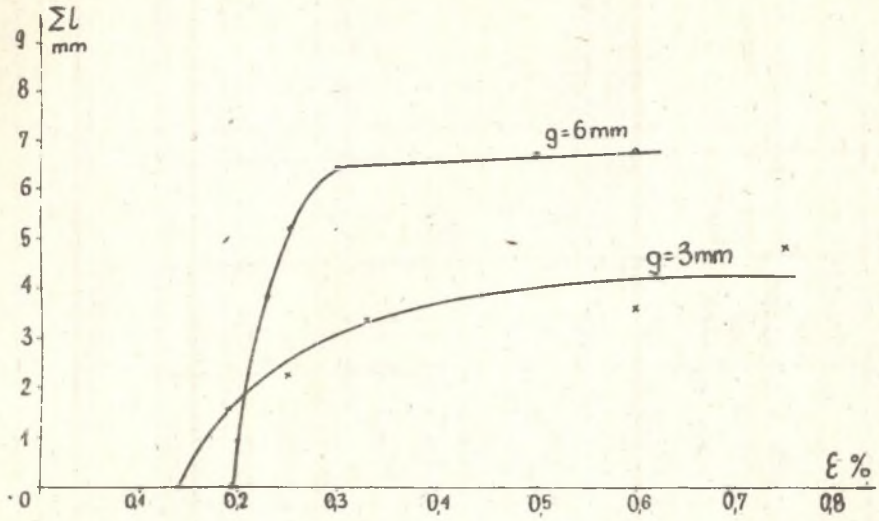
Wyniki badań skłonności do pęknięć gorących metodą Schnadt-Fisco złączy spawanych metodą TIG

Przygotowanie krawędzi blach	Grubość blachy mm	Odstęp pomiędzy blachami b mm	Parametry spawania: Prąd spawania (A)	Napięcie łuku (V)	Szybkość spawania ($\frac{cm}{min}$)	Natężenie przepływu argonu $\frac{l}{min}$	$\frac{E_{max}}{E_{min}}$ kJ/cm	Względna ilość pęknięć %	Rodzaj pęknięć	Uwagi
	6	2	200-210	12-14	8,3	12	21,2/18,0	5,2	kraterowe	brak pęknięć w spoinie
	6	2	180-190	12-14	11,7	12	13,6/11,7	4,1	"	"
	6	1	200-210	12-14	8,3	12	21,2/18,0	0	brak pęknięć	"
	6	1	180-190	12-14	11,7	12	13,6/11,7	0	"	"
	3	1	120-130	11-12	11,7	12	8,0/6,76	0	"	"
	3	0	120-130	11-12	11,7	12	8,0/6,76	0	"	"
	6	1	180-190	12-14	11,7	12	13,6/11,07	6,2	kraterowe	brak pęknięć w spoinie
	6	1	160-170	12-14	11,7	12	12,2/9,84	3,1	"	"
	6	0	180-190	12-14	11,7	12	13,6/11,07	0	brak pęknięć	"
	6	0	160-170	12-14	11,7	12	12,2/9,84	0	"	"

Tablica 3

Wyniki badań skłonności do pęknięć gorących metodą Schnadt-Fisco złączy spawanych metodą MIG

Przygotowanie krawędzi blach	Grubość blachy (mm)	Odstęp pomiędzy blachami (mm)	Parametry spawania: Prąd spawania (A)	Napięcie łuku (V)	Szybkość spawania ($\frac{cm}{min}$)	Natężenie przepływu argonu ($\frac{l}{min}$)	$\frac{E_{max}}{E_{min}}$ kJ/cm	Względna ilość pęknięć %	Rodzaj pęknięć	Uwagi
	6	2	200-210	22-24	26	12	11,6/10,15	6,2	kraterowe	brak pęknięć w spoinie
	6	2	180-190	20-22	26	12	9,64/8,3	5,3	"	"
	6	1	200-210	22-24	26	12	11,6/10,15	8,3	"	"
	6	1	180-190	20-22	27	12	9,64/8,3	5,0	"	"
	3	1	120-130	18-20	27	12	5,77/4,8	4,1	"	"
	3	0	120-130	18-20	28	12	5,77/4,8	3,0	"	"
	6	1	150-160	20-22	25	12	7,68/7,20	10,8	"	"
	6	1	130-140	18-20	25	12	6,72/5,61	6,1	"	"
	6	0	150-160	20-22	26	12	7,68/7,20	12,0	"	"
	6	0	130-140	18-20	25	12	6,72/5,61	5,2	"	"



Rys. 5. Zależność sumy długości pęknięć od odkształcenia dla badanych blach. Próba Transvarestraint

Tablica 4

Wyniki badań skłonności do pęknięć gorących metodą Transvarestraint blach ze stali 00H23N28M3Cu

Grubość blachy (mm)	Odkształcenie względne % / Ogólna długość pęknięć mm							E kJ/cm	Próg pękania ε_p [%]
3	0,75 / 4,7	0,6 / 3,5	0,33 / 3,3	0,25 / 2,2	0,20 / 1,9	0,18 / 1,5	0,14 / 0,0	8	0,14
6	0,6 / 6,6	0,5 / 6,5	0,33 / 6,4	0,25 / 5,2	0,23 / 3,8	0,20 / 0,90	0,18 / 0,0	12	0,18

Jako miarę skłonności do pęknięć gorących przyjęto tę wielkość odkształcenia ε_p, przy której nie występują już pęknięcia. Wyniki pomiarów podano na rys. 5 i w tablicy 4.

Technologia spawania metodą TIG

Badania nad ustaleniem parametrów spawania doczołowego metodą TIG blach ze stali 00H23N28M3Cu o grubości 3 i 6 mm wykonano wykorzystując wyniki pomiarów skłonności do pęknięć gorących, przy czym jakość złączy oceniano kolejno przez:
- oględziny zewnętrzne,
- badania rentgenowskie,
- badania mechaniczne.

Złącza próbne o wymiarach 400x150xg spawano przy użyciu półautomatu PT1-500, stosując drut dodatkowy Φ 1,2 gatunku 00H23N28M3Cu a grań spoiny formowano za pomocą podkładki miedzianej. Energię liniową łuku utrzymywano w czasie spawania na poziomie nie wyższym od energii ustalonej w badaniach skłonności do pęknięć gorących (tablica 2). Złącza o prawidłowym kształcie spoiny, gładkim i równym licu i co najmniej 2 klasie wadliwości według PN-74/M-69772, poddano badaniom mechanicznym obejmującym statyczną próbę rozciągania, statyczną próbę gięcia i badania udarności KV na próbkach o wymiarach 5x10 mm (tylko dla blach o g = 6 mm). Wyniki badań mechanicznych złączy zestawiono w tablicy 5, a zalecane parametry spawania metodą TIG w tablicy 6.

Technologia spawania metodą MIG

Złącza próbne blach ze stali 00H23N28M3Cu o grubości 3 i 6 mm, spawane metodą MIG drutem Φ1,2 gatunku 00H23N28M3Cu, wykonano według tych samych kryteriów jak złącza spawane metodą TIG. Do spawania stosowano półautomat BS1-315.

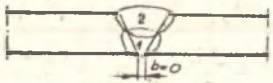
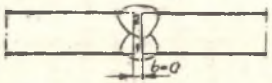
Własności mechaniczne złączy podano w tablicy 7, a zalecane parametry spawania metodą MIG w tablicy 8.

Analiza wyników badań

Dostarczone przez Hutę Baildon blachy i drut spawalniczy posiadają wymaganą zawartość zasadniczych pierwiastków stopowych, niestety zawartość węgla, szczególnie w przypadku drutu spawalniczego, przewyższa wyraźnie graniczną wartość 0,03% (tablica 1). Uwzględniając jednak fakt, że przy spawaniu metodą TIG i w mniejszym stopniu metodą MIG, następuje wypalenie węgla, stopiwa mają zawartość węgla niższą od materiału dodatkowego. Równocześnie wyraźnie wyższa zawartość chromu w spoiwie niż w spawanych blachach, powinna zapewnić odporność korozyjną stopiw nie niższą od materiału rodzimego.

Tablica 5

Własności mechaniczne złączy doczołowych spawanych metodą TIG

	Oznaczenia złącza próbnego	$\frac{R_{m_{max}} - R_{m_{min}}}{R_{m_{śr}}^{*}}$ $\frac{daN}{mm^2}$	Miejsce zerwania próbki	Kąt gięcia α^{o}		Udarność spoiny KV $\frac{da}{cm^2}$	Udarność materiału KV $\frac{daJ}{cm^2}$
				od strony lica	od strony grani		
	C	$\frac{69,2 - 62,6}{65,2}$	w spoinie lub swc	180	180	-	-
	D_1	$\frac{64,4 - 62,8}{63,5}$	w spoinie lub swc	180	180	12,8	15,2
	D_2	$\frac{66,3 - 61,8}{64,4}$	w spoinie	180	180	11,9	15,2

* wynik średni z pięciu pomiarów

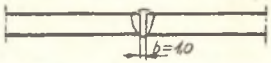
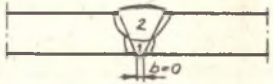
Tablica 6

Optymalne parametry spawania doczołowego blach ze stali 00H23N28M3Cu metodą TIG

Oznaczenie złącza próbnego	Grubość blachy mm	Numer warstwy	Natężenie prądu spawania A	Napięcie łuku V	Szybkość spawania cm/min	Natężenie przepływu argonu l/min	$\frac{E_{max}}{E_{min}}$ kJ/cm	Średnica drutu (mm)
C	3	1	120-130	11-12	11,7	12	8,00/6,76	1,2
D_1	6	1	180-190	12-14	11,7	12	13,6/11,7	1,2
		2	200-210	12-14	8,3	12	21,2/18,0	1,2
D_2	6	1	160-170	12-14	11,7	12	12,20/9,84	1,2
		2	180-190	12-14	11,7	12	13,6/11,07	1,2

Tablica 7

Własności mechaniczne złączy doczołowych spawanych metodą MIG

	Oznaczenie złącza próbnego	$\frac{R_{m_{max}} - R_{m_{min}}}{R_{m_{śr}}}$ *	Miejsce zerwania próbki	Kąt gięcia α^{o}		Udarność spoiny KV $(\frac{daJ}{cm^2})$	Udarność materiału rodzimego KV $(\frac{daJ}{cm^2})$
				od strony lica	od strony grani		
	A	$\frac{66,2 - 63,9}{64,8}$	w spoinie	180	180	-	-
	B_1	$\frac{56,4 - 53,7}{54,9}$	poza spoiną	180	180	10,2	15,2
	B_2	$\frac{58,4 - 55,7}{53,0}$	poza spoiną	180	180	10,5	15,2

* wynik średni z pięciu pomiarów

Tablica 8

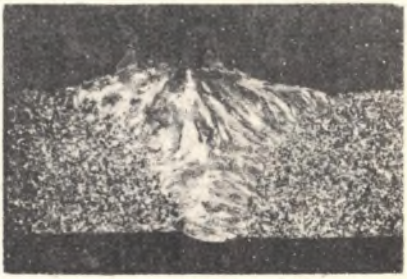
Optymalne parametry spawania doczołowego blach ze stali 00H23N28M3Cu metodą MIG

Oznaczenie złącza próbnego	Grubość blachy mm	Numer warstwy	Natężenie prądu spawania A	Napięcie łuku V	Szybkość spawania cm/min	Natężenie przepływu argonu l/min	$\frac{E_{max}}{E_{min}}$ kJ/cm	Średnica drutu mm
A	3	1	120-130	20-22	35-45	12	4,11/3,81	1,2
B_1	6	1	115-125	20-22	30-40	12	4,60/4,125	1,2
		2	115-125	20-22	30-40	12	4,60/4,125	1,2
B_2		1	200-220	24-26	30-40	12	8,23/8,58	1,2
		2	200-220	24-26	30-40	12	8,23/8,58	1,2

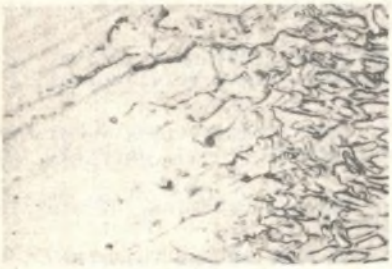
Badania skłonności do pęknięć gorących metodą Schnadt-Fisco wykazały, że złącza spawane metodą TIG posiadają mniejszą skłonność do pęknięć gorących niż złącza spawane metodą MIG. W obu metodach spawania, nawet przy silnym usztywnieniu złączy, nie stwierdzono pęknięć gorących w spoinach, a jedynie pęknięcia kraterowe (tablica 2, 3). Przy spawaniu metodą TIG pęknięcia kraterowe zanikały nawet przy dużych energiach liniowych łuku, gdy odstęp między brzegami blach był równy zero przy ukosowaniu na V (g = 6 mm) lub 1 mm przy ukosowaniu na I, a więc zgodnie z zaleceniami technologicznymi przygotowania złączy do spawania metodą TIG.

Blacha o grubości 3 mm ujawniła wyraźnie niższy próg pękania niż blacha o grubości 6 mm, jednakże wzrost długości pęknięć jak i maksymalne długości pęknięć są wyższe przy tych samych stopniach odkształcenia w blachach o grubości 6 mm (tablica 4, rys. 5). Ponieważ próg pękania jest, zwłaszcza w przypadku blachy o grubości 3 mm, niższy od granicy odkształcenia ustalonej przy wyznaczaniu umownej granicy plastyczności, blachy te muszą być spawane w ten sposób, aby utworzone naprężenia spawalnicze nie wywołały odkształceń przekraczających odkształcenie graniczne. Spawanie złączy próbnych prowadzono więc przy maksymalnym obniżeniu energii liniowej łuku przez zmniejszenie parametrów prądowych spawania a równoczesnym silnym usztywnieniu złącza w pełni symulującym rzeczywiste warunki spawania konstrukcji. Okazało się, przez dokładne oględziny zewnętrzne i badania penetracyjne, że w żadnym złączu nie wystąpiły pęknięcia gorące (rys. 6, 7). Równocześnie mała energia liniowa łuku wywołała nieznaczne zmiany strukturalne w wąskich SWC objawiające się głównie rozpuszczaniem węglików i azotków w osnowie austenitycznej (rys. 6, 7, 8, 9) występujących w dość znacznej ilości w materiale rodzimym, prawdopodobnie w wyniku niewłaściwej obróbki cieplnej po procesie przeróbki plastycznej blach.

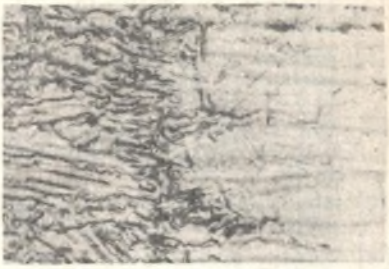
Rys. 6. Makrostruktura złącza wykonanego metodą TIG. Grubość złącza 6 mm. Trawienie CrO_3. Powiększenie 4x



Rys. 7. Makrostruktura złącza wykonanego metodą MIG. Grubość złącza 6 mm. Trawienie CrO_3. Powiększenie 4x



Rys. 8. Obraz mikroskopowy strefy przejścia spoiny wykonanej metodą TIG. Trawienie CrO_3. Powiększenie 250x



Rys. 9. Obraz mikroskopowy strefy przejścia spoiny wykonanej metodą MIG. Od strony spoiny widoczny austenit w układzie dendrytycznym. Od strony materiału austenit z małą ilością wydzieleń wewnątrz i po granicach ziarn. Trawienie CrO_3. Powiększenie 250x

Badania mechaniczne złączy, obejmujące statyczną próbę rozciągania, statyczną próbę gięcia i próbę udarności dla złączy o g = 6 mm, potwierdziły prawidłowy dobór warunków spawania. Wytrzymałość na rozciąganie złączy mieściła się w granicach wytrzymałości materiału rodzimego (R_m = 53÷65 daN/mm^2), a plastyczność określona próbą gięcia, tak od strony lica jak i od strony grani, nie była niższa od materiału rodzimego. Stwierdzono natomiast spadek udarności KV spoin w stosunku do materiału rodzimego, jednakże udarność nadal pozostała na poziomie w zupełności wystarczającym do przeniesienia obciążeń dynamicznych konstrukcji. Badania odporności korozyjnej złączy badanych blach wykonanych metodą TIG i MIG według opracowanej technologii spawania, przeprowadzone przez Instytut Chemii Nieorganicznej, wykazały doskonałą ich odporność na działanie kwasu fosforowego, kwasu fluorokrzemowego, kwasu siarkowego oraz chlorku baru. Jedynie w przypadku kwasu fluorowodorowego tak złącza spawane jak i materiał rodzimy uległ szybkiej korozji [12].

LITERATURA

[1] Eysymontt J. i inni: Wydzielanie i rozpuszczanie fazy sigma i węglika $M_{23}C_6$ w stalach OH24M24TCu podczas wyżarzania przy temperaturach do 1300°C. Prace Instytutów Hutniczych, 1973, Nr 4.

[2] Morisot C., Honnorat Y.: Mecanismes de precipitation de la phase σ dans les alliages superrefractaires. Memoir Scientifique Rev. Metall. 1972, Nr 10.

[3] Kachowskij N.I.: Swarka wysokolegirowanych staliej. Wyd. Technika, Kijew 1975.

[4] Polgary S.: Resistance to intercrystalline corrosion in stainless steel weld metal. Svetsaren 1972, t. 8, nr 1-2.

[5] Pinnow K.E., Moskowitz A.: Corrosion resistance of stainless steel weldments. Weld. Journal, 1970, Nr 6.

[6] Borland J.C., Younger R.N.: Some aspects of cracking i welded Cr-Ni austenitic steels - a survay of literature. Brit. Weld.Journal, 1960, Nr 7 s. 22-59.

[7] Lundin C.D., De Long W.T., Spond D.F.: Ferrite fissuring relationship in austenitic stainless steel weld metals. Weld. Journal, 1975, Nr 12, s. 867-871.

[8] Hull F.C.: Effect of delta ferrite on the hot cracking of stainless steel. Weld. Journal, 1967, t. 46, nr 9.

[9] Welding of ELI steel. Welding Design and Fabrication 1976, Nr 5, s. 71-72.

[10] Senda T., Matsuda F.: Fundamental Investigations on Solidification Crack Susceptibility for Weld Metals with Trans-Varestraint Test. Transaction of I.W.S, t. 2, Nr 2, 1971.

[11] Klimpel A., Mazur W.: Skłonność do pęknięć gorących austenitycznego stopiwa elektrod otulonych ES 23-28-3Cu. Przegląd Spawalnictwa 1976, nr 9.

[12] Krzysztofowicz K.: Praca badawcza IChN 9/03/TI, 1975.

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ТОНКИХ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ 00Н23N28М3Cu МЕТОДАМИ TIG И MIG

Р е з ю м е

Представлены исследования по свариваемости листовой стали 00Н23N28М3Cu толщиной 3 и 6 мм на основании критерия склонности к образованию трещин. Даны режимы сварки стыковых швов методами TIG и MIG (вольфрамовым и плавящимся электродом в среде аргона), а также приведены механические свойства соединений.

THE THIN SHEETS WELDING TECHNOLOGY OF 00H23N28M3Cu TYPE STEEL USING TIG AND MIC METHODS

S u m m a r y

The investigations of weldibility of 00H23N28M3Cu type steel sheets of 3 and 6 mm thickness has been presented on the background of hot cracking susceptibility criterion.

The welding conditions of butt joints welded using TIG and MIG methods and their mechanical properties have been established.