

Spawanie metodą CMT (Cold Metal Transfer) w porównaniu z klasyczną metodą MAG w przemyśle motoryzacyjnym

The welding process CMT (Cold Metal Transfer) compared to the classical method of MAG in the automotive industry

Streszczenie

Obecnie jednym z wielu kierunków rozwoju zrobotyzowanych metod spawania jest łączenie cienkich blach z materiałów o jednakowych i różnorodnych właściwościach. Potrzeby przemysłu i łatwość zrobotyzowania metody MIG/MAG doprowadziły do szybkiego wdrożenia metody Cold Metal Transfer (CMT).

W artykule przedstawiono analizę metody CMT w odniesieniu do klasycznej metody MAG na przykładzie zrobotyzowanego spawania w przemyśle motoryzacyjnym. Do wykonania złączy próbnych zastosowano blachy ze stali S355MC o grubości 3 mm, które stanowią elementy składowe spawanej konstrukcji oparcia fotela samochodowego. Wykonane połączenia próbne, przy zróżnicowanej energii liniowej spawania, poddano badaniom makrostrukturalnym oraz pomiarom twardości. Wyniki pomiarów obrazują wpływ energii liniowej spawania oraz prędkości podawania spoiwa na geometrię spoin i szerokość strefy wpływu ciepła [1].

Słowa kluczowe: spawanie zrobotyzowane, CMT, MAG, makrostruktura, geometria spoin, twardość, SWC

Abstract

Nowadays combining thin steel sheet with the same and different materials properties is one of the main routes robotized of welding. The needs of industry and ease of robotized MIG/MAG led to the rapid implementation Cold Metal Transfer method (CMT).

The article presented the analysis CMT method in comparison to classical method of MAG based on robotized welding in the automotive industry. Welded test joints are made of sheet steel S355MC thickness of 3 mm, this material is used as a component for car seats. Welding connections were investigated in macrostructure test and hardness with differentiated the Welding Energy Input. The measurement results reflect the impact of Welding Energy Input and wire-feed speed on the geometry of the welds and heat affected zone width [1].

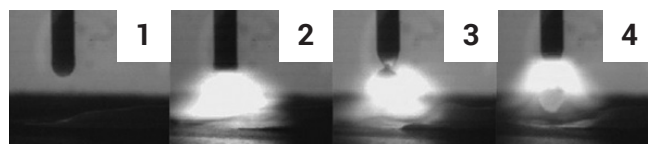
Keywords: robotic welding, CMT, MAG, macrostructure, geometry of welds, hardness, heat-affected zone

Wstęp

W standardowej metodzie MAG przenoszenie materiału dodatkowego w miejsce powstającej spoiny może mieć charakter kropłowo-zwarcioowy, mieszany tzw. globularny i natryskowy. Rodzaj przenoszenia kropli w łuku elektrycznym zależy w dużym stopniu od gęstości prądu jarzącego się łuku. Krytyczna gęstość prądu przy spawaniu w osłonie gazów, drutem o średnicy 1,0 mm wynosi ok. 200 A/mm² [5]. Poniżej tej granicy występuje przenoszenie kropłowo-zwarcioowe natomiast powyżej natryskowe. Zwiększenie wartości natężenia prądu zmniejsza rozmiar kropli.

Podczas procesu spawania MAG Standard do przepływu kropli dochodzi w następującej kolejności (rys. 1): 1 – dojście drutu do punktu startowego, 2 – start posuwu drutu

i doprowadzenie do zajarzenia się łuku, 3 – poprzez energię cieplną jarzenia się łuku elektrycznego dochodzi do topienia się drutu i opadaniu kropli do jeziora spawalniczego, 4 – przepływ kropli i topienie materiałów łączonych.



Rys. 1. Widok przejścia kropli do jeziora spawalniczego w procesie MAG [6]

Fig. 1. View transition drops into the weld pool in the process of MAG [6]

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Mirski, mgr inż. Piotr Pękala – Katedra Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: zbigniew.mirski@pwr.edu.pl

Tablica I. Skład chemiczny stali S355MC [11]**Table I.** The chemical composition of the steel S355MC [11]

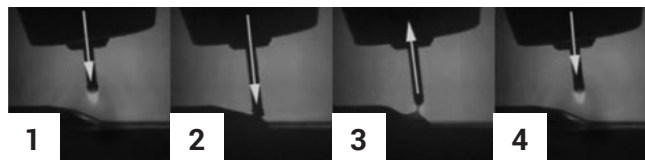
Oznaczenie	Skład chemiczny w % wag.								
	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Fe
S355MC	0,12	0,15	1,5	0,025	0,02	0,09	0,02	0,015	reszta

Tablica II. Właściwości mechaniczne stali S355MC [11]**Table II.** Mechanical properties of steel S355MC [11]

Oznaczenie	Granica plastyczności Re min [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Wydłużenie względne A [%]
S355MC	355	430-550	19-23

Metoda CMT jest rozwinięciem metod MIG/MAG polegającym na ograniczeniu energii cieplnej wprowadzanej podczas spawania, jest jednym z niskoenergetycznych procesów spawania. Ciepło wprowadzane jest niższe niż podczas standardowego, zwojowego procesu, osiągnięto to za pomocą kontrolowanego ruchu drutu elektrodowego, który cyklicznie rozpoczyna i wygasza łuk elektryczny. Impulsowe podawanie drutu podczas procesu CMT obrazuje rysunek 2. Cykl podawania kropli topionej elektrody jest następujący: 1 – start podawania drutu po dojeździe do punktu startowego, drut jest wysuwany od momentu zajarzenia się łuku elektrycznego do zwarcia z materiałem łączonym, podczas jarzenia się łuku dochodzi do topienia się elektrody i materiału łączonego

oraz powstania kropli z zachowaniem posuwu drutu w kierunku spoiny, 2 – zwarcie drutu z materiałem, 3 – cofnięcie drutu i oderwanie od drutu kropli, która pozostaje w ciekłym jeziorze spawalniczym, 4 – przy ruchu powrotnym drutu dochodzi do ponownego zajarzenia łuku elektrycznego [8].

**Rys. 2.** Cykl ruchu drutu spawalniczego w procesie CMT [8]**Fig. 2.** The movement cycle of welding wire in the process of CMT [8]


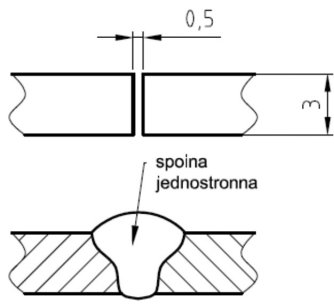
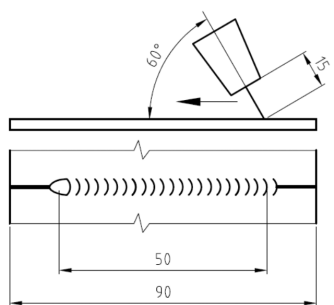
Materiał zastosowany w badaniach

Stal konstrukcyjna S355MC wg PN-EN 10149 jest stalią mikrostopową o podwyższonej granicy plastyczności, kształtowaną w procesie walcowania na gorąco. Skład chemiczny, właściwości mechaniczne podano odpowiednio

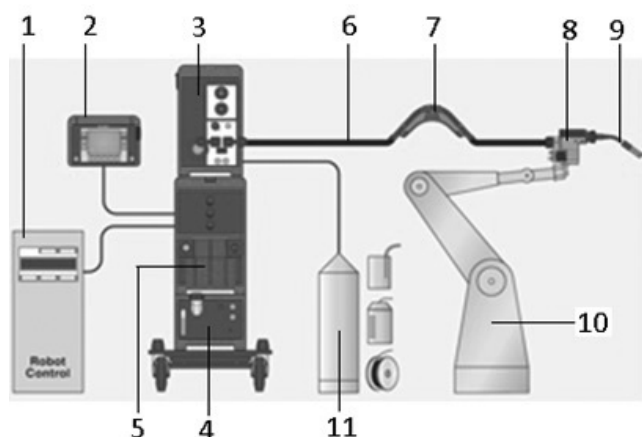
Tablica III. Zestawienie urządzeń wchodzących w skład stanowiska spawalniczego [6,15]**Table III.** Devices belonging to welding station [6,15]

Nr	Nazwa	Producent	Model	Opis
1	Szafa elektryczna manipulatora	ABB	IRC5	zasilanie i sterowanie napędów osi manipulatora i osi zewnętrznych
2	Panel sterowania spawarki	Fronius	RCU 5000i	nastawa i kontrola parametrów procesu spawania
3	Podajnik drutu	Fronius	VR 7000-CMT MO/K	główny podajnik drutu, napęd sterowany cyfrowo, układ czterech rolek dociskowych
4	Chłodnica	Fronius	FK-4000-R-FC	chłodnica płynowa, chłodząca przewód prądowy i palnik spawalniczy
5	Źródło prądu spawalniczego	Fronius	TransPuls Synergic TPS 4000 CMT	inwerterowe źródło prądu, zasilane trójfazowo, sterowane cyfrowo, zakres prądu 3-400 A, napięcie robocze 14-34 V
6	Prowadzenie mediów spawalniczych	Fronius	6,25 m	wiązka uchwytu robota, MIG/MAG CMT, przewód prądowy chłodzony cieczą, przewody chłodzące palnik, przewód gazu ochronnego, prowadzenie drutu spawalniczego, przewody sygnałowe
7	Bufor drutu	Fronius	zestaw buforu drutu CMT	czujnik kontroli podawania drutu, prowadzenie drutu, przewód sygnałowy
8	Podajnik CMT	Fronius	Robacta Drive CMT	silnik asynchroniczny prądu przemiennego, bezprzekładniowe przeniesienie przeniesienie napędu realizujące ruch drutu procesu CMT
9	Palnik spawalniczy	Fronius	R5000	palnik chłodzony cieczą, doprowadzający gaz osłonowy i drut spawalniczy
10	Manipulator	ABB	IRB 2400	sześcioosiowy manipulator o udźwigu do 200 N
11	Pojemnik drutu spawalniczego	ESAB	OK Autrod 12.51	Ø 1,0 mm, G 38 3 C1 3Si1, pojemnik 250 kg

Tablica IV. Instrukcja technologiczna spawania
Table IV. Welding procedure

		INSTRUKCJA TECHNOLOGICZNA SPAWANIA (WPS)				Data aktualizacji: 25.03.2015		
		WPS Nr:	15/03/25/1	Inspektor lub jednostka inspekcyjna: Wydział Mechaniczny				
Wytwórca:	PWr	Sposób przygotowania złącza: I - bez ukosowania						
Miejscowość:	Wrocław	Specyfikacja materiału podstawowego: S355MC, blacha 90x45x3 mm						
Proces spawania:	135	Grubość materiału:	3 mm					
Źródło prądowe:	TransPuls Synergic TPS 4000 CMT	Pozycja spawania:	PA - podolna					
Manipulator:	ABB IRB 2400							
Postać materiału i rodzaj spoiny:	P/BW - blacha/czołowa							
Szczegóły przygotowania do spawania (schemat)								
Przygotowanie złącza:				Pozycja i kierunek spawania, nachylenie palnika				
								
Nr próbki	Proces	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Prędkość podawania drutu [m/min]	Prędkość spawania [m/min]	Średnica spoiwa [mm]	Energia liniowa sp. [kJ/cm]	
1	Standard	184	21,1	9	0,7	Ø1,0	2,00	
2	Standard	191	22	9,5	0,7	Ø1,0	2,16	
3	Standard	198	23	10	0,7	Ø1,0	2,34	
4	Standard	204	23,9	10,5	0,7	Ø1,0	2,51	
5	Standard	236	26,7	11	0,7	Ø1,0	3,24	
1	CMT	185	14,5	9	0,7	Ø1,0	1,38	
2	CMT	191	15,1	10	0,7	Ø1,0	1,48	
3	CMT	197	15,7	11	0,7	Ø1,0	1,59	
4	CMT	218	16,5	12	0,7	Ø1,0	1,85	
5	CMT	230	17	13	0,7	Ø1,0	2,01	
Klasyfikacja spoiwa i nazwa handlowa: G383C13Si1 Ø1 mm, OK Autrod 12.51 ESAB				Dodatkowe informacje:				
				Rodzaj ściegu:	prosty			
Gaz osłonowy:	M21, 18,5% CO ₂	Korekcja długości łuku:	0%					
Przepływ gazu:	14 l/min	Korekcja dynamiki:	-0,4					
podkładka:	brak	Kąt ustawienia palnika:	60°					
Temp. podgrzewania wstępnego:	temperatura otoczenia	Odległość palnika od materiału:	15 mm					
Prędkość chłodzenia:	w powietrzu	Obróbka cieplna po spawaniu:	brak					

w tablicach I i II. Dla stali S355MC równowaznik węgla wynosi $CEV = 0,374 \%$, przy maksymalnej zawartości składu chemicznego, stanowi to zachowanie warunku dobrej spawalności metalurgicznej materiału.



Rys. 3. Schemat podłączenia urządzeń na stanowisku: 1 - szafa elektryczna manipulatora, 2 - panel sterowania spawarki, 3 - podajnik drutu, 4 - chłodnica, 5 - źródło prądu spawalniczego, 6 - prowadzenie mediów spawalniczych, 7 - bufor drutu, 8 - podajnik CMT, 9 - palnik spawalniczy, 10 - manipulator, 11 - pojemnik drutu spawalniczego [6]
Fig. 3. Connections diagram: 1 - robot controller, 2 - control panel, 3 - wire feed unit, 4 - cooling unit, 5 - power source, 6 - package of welding media, 7 - wire buffer, 8 - feeder CMT, 9 - welding torch, 10 - manipulator, 11 - container of welding wire [6]

Stanowisko spawalnicze

Schemat urządzeń wchodzących w skład zrobotyzowanego stanowiska spawalniczego pokazano na rysunku 3. Krótką charakterystykę elementów składowych stanowiska zamieszczono w tablicy III.

Dobór warunków i parametrów spawania

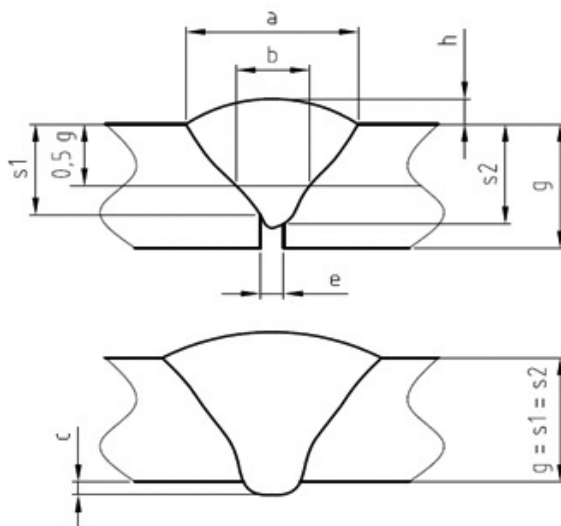
Ze względu na grubość blach równą 3 mm, przygotowano je bez ukosowania krawędzi. Założono wykonanie spoin czołowych, jednostronnych z pojedynczym prostym ścięciem. Ze względu na grubość blach, brak ukosowania, rodzaj spoiny I oraz średnicę drutu elektrodowego ($\varnothing 1,0 \text{ mm}$), dobrano odstęp między blachami równy 0,5 mm.

Przy wykonywaniu połączeń próbnych metodami MAG Standard i CMT zachowano podobne warunki spawania. Dobór natężenia prądu spawania dla obu metod mieścił

się w zakresie 180 – 240 A. Charakterystyka napięciowa była automatycznie dobierana do zadanej wartości natężenia prądu, prędkości podawania drutu oraz stosowanej metody (Standard lub CMT). Wykonano po 5 złączy próbnych, z rosnącymi wartościami prędkości podawania drutu. Wszystkie pozostałe parametry, warunki spawania oraz użyte materiały i urządzenia zawarto w Instrukcji Technologicznej Spawania WPS (tablica IV).

Badania makrostruktury połączeń spawanych

Badania metalograficzne połączeń spawanych wykonano na przekrojach poprzecznych, pobranych w połowie długości złączy. Próbki szlifowano na wodnych papierach ściernych SiC oraz polerowano stosując wodną zawiesinę tlenku glinu. Próbki do badań makroskopowych trawiono w 30% roztworze chlorku żelaza III (FeCl_3). Do obserwacji i pomiarów spoin użyto mikroskopu świetlnego firmy Struers oraz oprogramowania Welding Exper wersja 2.70, przy powiększeniu 45x. Zestawienie wyników pomiarów zamieszczono w tablicach V i VI. Oznaczenia wymiarów spoin pokazano na rysunku 4. W oznaczeniu spoiny podano proces i prędkość podawania spoiwa w m/min (np. S9 - Standard 9 m/min). Przykładowe makrostruktury spoin pokazano na rysunkach 5 i 6.



Rys. 4. Oznaczenia wymiarów spoin
Fig. 4. Dimensions of the welds

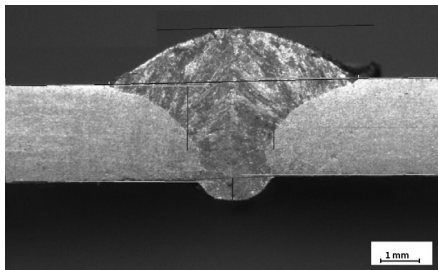
Tablica V. Zestawienie wymiarów spoin wykonanych metodą CMT Standard
Table V. The dimensions of the welds made CMT Standard

Wymiary spoin [mm]									
Lp	Oznaczenie spoiny	wtopienie s1	szerokość lica a	wtopienie s2	szerokość spoiny w połowie grubości blach b	odstęp od strony grani e	wyciek grani c	wysokość spoiny h	Średnie wtopienie $(s1 + s2) / 2$
1	S9	2,60	6,10	2,79	1,41	-	-	1,86	2,70
2	S9,5	2,21	6,52	2,29	1,33	0,43	-	2,08	2,25
3	S10	3,04	6,86	3,00	1,56	-	0,22	1,99	3,02
4	S10,5	2,98	7,75	3,00	2,69	-	0,66	1,66	2,99
5	S11	3,02	9,16	3,00	2,59	-	0,60	1,50	3,01

Pomiary twardości

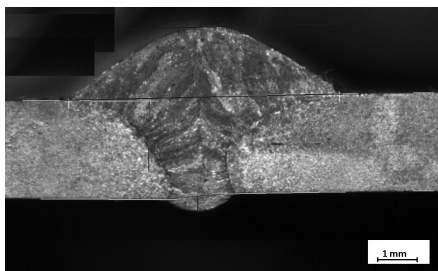
Pomiary twardości połączeń spawanych wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 10 kG (HV 10). Pomiarów dokonano wg normy PN-EN ISO 6507-1:2007 Metale – Pomiar twardości metodą Vickersa, część 1: Metody badań. Użyto twardościomierza firmy Fritz Heckert. Schemat przeprowadzenia pomiarów przedstawiono na rysunku 9. Pomiarów dokonano z odstępem 1 mm, symetrycznie po obu stronach osi spoiny. Rysunki 10 i 11 obrazują rozkłady twardości w złączach spawanych. Pomiary o numerach: -1, 0, 1 wykonano w obszarze spoiny, na rysunkach 10 i 11 zaznaczono wartość średnią tych pomiarów. Średnia twardość materiału rodzimego wynosiła 155 HV 10.

Szerokość strefy wpływu ciepła wyznaczono na podstawie rozkładów twardości, uwzględniając odległość punktów



Rys. 5. Makrostruktura złącza nr 4, metoda MAG Standard, natężenie prądu 204 A, napięcie łuku 23,9 V, prędkość podawania drutu 10,5 m/min, prędkość spawania 0,7 m/min

Fig. 5. Macrostructure connection No 4, MAG standard, current 204 A, the arc voltage 23.9 V, the wire feed speed of 10.5 m/min, the welding speed of 0.7 m/min

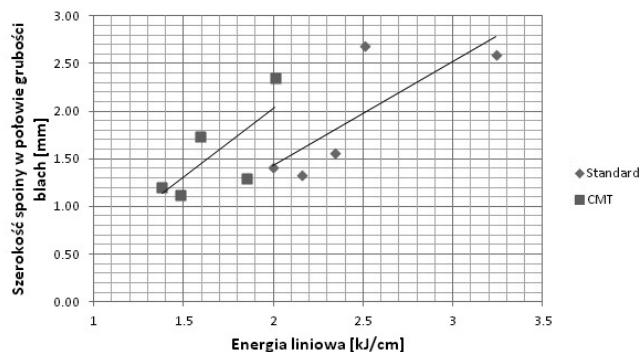


Rys. 6. Makrostruktura złącza nr 5, metoda MAG CMT, natężenie prądu 230 A, napięcie łuku 17 V, prędkość podawania drutu 13 m/min, prędkość spawania 0,7 m/min

Fig. 6. Macrostructure connection No 5, MAG CMT, current 230 A, the arc voltage 17 V, the wire feed speed of 13 m/min, the welding speed of 0.7 m/min

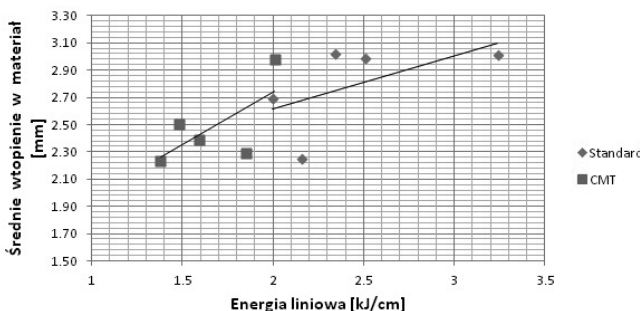
pomiarowych. Rozkład twardości HV 10 w złączach próbnych był symetryczny po obu stronach spoiny. Szerokość strefy wpływu ciepła w zależności od energii liniowej spawania oraz prędkości podawania spoiwa pokazano na rysunkach 12 i 13. Szerokość SWC w próbnych złączach wykonanych metodą MAG Standard wynosiła ok. 4 – 5,2 mm, a w metodzie MAG CMT zmniejszyła się do wartości ok. 2,2 – 3,6 mm.

Podczas wykonywania złączy metodą CMT rozprysk kropeł był minimalny. Brak rozprysków był zauważalny podczas jarzenia się łuku elektrycznego oraz podczas kontroli stanu osprzętu spawalniczego. Przy stosowaniu procesu CMT zaobserwowano dłuższy czas pracy dysz gazowych, mniejsze zużycie układów elektrycznych i pneumatycznych, krótszy czas rutynowego sprzątania cel spawalniczych i układów pozycjonujących detale.



Rys. 7. Wpływ energii liniowej spawania na szerokość spoiny w połowie grubości blach ze stali S355MC

Fig. 7. Impact heat input on the weld width at half the thickness of steel sheets S355MC



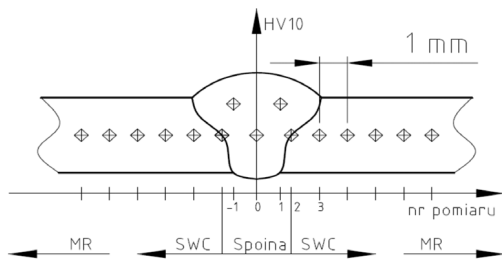
Rys. 8. Wpływ energii liniowej spawania na średnie wtopienie w materiał rodzimy S355MC

Fig. 8. Impact heat input on average penetration in the native material S355MC

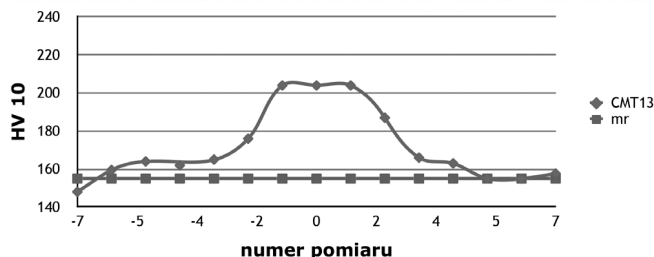
Tablica VI. Zestawienie wymiarów spoin wykonanych metodą MAG CMT

Table VI. The dimensions of the welds made MAG CMT

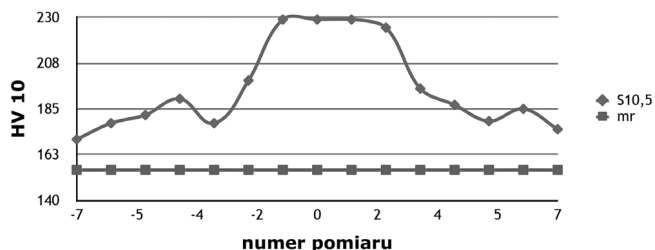
Wymiary spoin [mm]									
Lp	Oznaczenie spoiny	wtopienie s1	szerokość lica a	wtopienie s2	szerokość spoiny w połowie grubości blach b	odstęp od strony grani e	wyciek grani c	wysokość spoiny h	Średnie wtopienie (s1 + s2) / 2
1	CMT 9	2,17	6,76	2,30	1,20	0,63	-	1,55	2,24
2	CMT 10	2,31	6,03	2,69	1,12	0,66	-	1,77	2,50
3	CMT 11	2,42	7,37	2,35	1,74	0,67	-	2,02	2,39
4	CMT 12	2,12	7,46	2,46	1,29	0,44	-	2,28	2,29
5	CMT 13	2,98	8,23	2,98	2,35	-	0,41	2,12	2,98



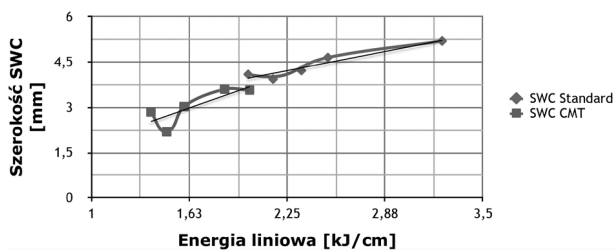
Rys. 9. Schemat pomiarów twardości HV 10
Fig. 9. Diagram of hardness measurements HV 10



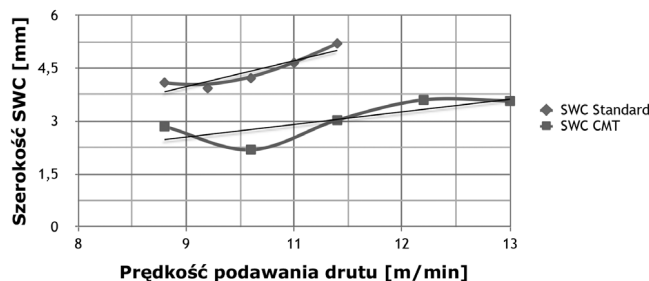
Rys. 11. Rozkład twardości HV 10 w złączu nr 5, metoda MAG CMT
Fig. 11. The function of hardness in the connector No 5, MAG CMT



Rys. 10. Rozkład twardości HV 10 w złączu nr 4, metoda MAG Standard
Fig. 10. The function of hardness in the connector No 4, MAG Standard



Rys. 12. Wpływ energii liniowej spawania na szerokość SWC
Fig. 12. Impact heat input on the width of the heat-affected zone



Rys. 13. Wpływ prędkości podawania drutu na szerokość SWC
Fig. 13. Impact wire feed speed on the width of the heat-affected zone

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Porównanie zrobotyzowanego spawania metodą MAG Standard i MAG CMT wykazało, że sposób dozowania spoiwa i przechodzenia kropli w łuku elektrycznym ma znaczący wpływ na powstałą geometrię spoiny i szerokość strefy wpływu ciepła w złączach doczołowych, o grubości 3 mm, ze stali S355MC.
- Osiągnięcie tej samej szerokości spoiny w połowie grubości spawanego materiału jest możliwe przy mniejszej energii liniowej za pomocą metody CMT. Osiągnięcie tej samej szerokości lica spoiny jest możliwe przy mniejszej energii liniowej za pomocą metody CMT, w zakresie pracy, do maksymalnej, stosowanej wartości natężenia prądu spawania metodą CMT.
- Metoda MAG Standard umożliwia osiągnięcie większego wtopienia w materiał rodzimy. Przy tych samych prędkościach podawania drutu osiąga się większe wtopienie w materiał rodzimy aniżeli w przypadku metody MAG CMT.
- Pomiary twardości metodą Vickersa HV 10 obrazują mniejszy wpływ procesu CMT w porównaniu z procesem MAG Standard na szerokość strefy wpływu ciepła. Ogólnie można stwierdzić, że SWC w metodzie MAG CMT jest węższa o 1,5 – 2 mm, w zależności od parametrów spawania.

Literatura

- [1] Pękala P.: Analiza technologii spawania w procesie CMT (Cold Metal Transfer) w porównaniu z klasyczną metodą MAG, Praca magisterska pod kier. prof. Z. Mirskiego, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.
- [2] Pilarczyk J. (red.): Poradnik Inżyniera – Spawalnictwo tom 2, WNT, Warszawa 2005.
- [3] Dąbrowski A.: Urządzenia spawalnicze – Budowa i charakterystyki, Przegląd Spawalnictwa, nr 7/2010, s. 24-32.
- [4] www.tecweld.pl, dostęp w dniu 25.04.2015.
- [5] Pilarczyk J. (red.): Poradnik Inżyniera – Spawalnictwo tom 1, WNT, Warszawa 2003.
- [6] www.fronius.com, dostęp w dniu 26.04.2015
- [7] Wilden J., Bergmann J. P., Reich S., Goecke S.: Beztopnikowe niskotemperaturowe spajanie lekkich konstrukcji różnoimennych metodą sterowanego łuku zvarciowego, Przegląd Spawalnictwa, nr 9/2007, s. 77-81.
- [8] Grzybicki M., Jakubowski J.: Badania porównawcze spawania blach ze stali karoseryjnej metodami CMT oraz MIG/MAG, Przegląd Spawalnictwa, nr 10/2009, s. 32-36.
- [9] Bruckner J.: Metoda CMT – rewolucja w technologii spawania, Przegląd Spawalnictwa, nr 7-8/2009, s. 24-28.
- [10] Kudła K., Wojsyk K.: Normowana energia liniowa a ilość ciepła wprowadzanego podczas spawania, Przegląd Spawalnictwa, nr 12/2010, s. 21-25.
- [11] www.universal-stal.pl, dostęp w dniu 26.04.2015
- [12] Dobrzański L. A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, Warszawa 2002.
- [13] www.harispal.pl, dostęp w dniu 09.05.2015, Madej Ł. (prezentacja): Korzystna struktura krystaliczna w strefie wpływu ciepła.
- [14] www.automatykaonline.pl, dostęp w dniu 16.05.2015.
- [15] www.ABB.com, dostęp w dniu 16.05.2015.