

ANDRZEJ KLIMPEL*, KRZYSZTOF LUKSA**
ŁUKASZ WARCABA***, TOMASZ SZOREK***, ADAM KIELBASIŃSKI***

ZROBOTYZOWANE SPAWANIE GMA ZŁĄCZY BLACH ZE STALI S690 I S960

W artykule przedstawiono wyniki badań technologii zrobotyzowanego spawania GMA drutem litym złączy teowych ze spoinami czołowymi blach grubości 10 mm ze stali S690 i S960. Wyniki badań jakości złączy próbnych spełniają wymagania norm, jednakże energia liniowa spawania zrobotyzowanego GMA nie różni się istotnie od energii liniowej spawania ręcznego GMA. Prawidłowy kształt ściegów spoin w spawaniu zrobotyzowanym można uzyskać przez zastosowanie średnich (w stosunku do dopuszczalnych) wartości energii liniowej spawania. Stwierdzono także, że w przypadku zrobotyzowanego spawania GMA złączy teowych ze spoinami czołowymi wymagane jest bardzo precyzyjne ustawienie palnika względem złącza. Uzyskane wyniki wskazują, że pełne wykorzystanie zalet spawania zrobotyzowanego – spawanie w górnym zakresie dopuszczalnych wartości energii liniowej spawania – napotyka ograniczenia technologiczne związane z niekorzystnym formowaniem ściegów spoiny przy większych prędkościach spawania.

Słowa kluczowe: stale konstrukcyjne ulepszone cieplnie, spawanie GMA, spawanie zrobotyzowane

1. WPROWADZENIE

Zastosowanie drobnoziarnistych stali konstrukcyjnych ulepszanych cieplnie umożliwia znaczne zmniejszenie masy konstrukcji, zwiększenie jej nośności oraz obniżenie kosztów produkcji. Stale te wyróżniają się dużymi wartościami granicy plastyczności przy niskiej temperaturze przejścia w stan kruchy. Typowymi stalami o takich właściwościach są stale S690QL i S960QL o strukturze odpuszczonego, niskowęglowego martenzytu. Równoważnik węgla tych stali może wynosić nawet do 0,8%, jednak mimo to stale te charakteryzują się dobrą spawalnością, pod warunkiem dokładnej kontroli energii liniowej spawania.

* Prof. dr hab. inż. }
** Dr inż. } Katedra Spawalnictwa Politechniki Śląskiej.

*** Mgr inż. – dyplomanci Katedry Spawalnictwa Politechniki Śląskiej.

W artykule przedstawiono wyniki badań zrobotyzowanego spawania GMA złączy blach ze stali S690QL i S960QL. Spawanie GMA na zrobotyzowanych stanowiskach spawalniczych pozwala zwiększyć wydajność spawania przy dokładnej regulacji energii liniowej spawania oraz zapewnia bardzo dużą powtarzalność warunków cieplnych spawania.

2. WCZEŚNIEJSZE BADANIA

Wysokowytrzymałe drobnoziarniste stale konstrukcyjne ulepszone cieplnie S690QL i S960QL charakteryzują się korzystną strukturą odpuszczonego niskowęglowego martenzytu o dużej udarności, a ich tendencja do pęknięć wodorowych (zimnych) w złączach spawanych jest wyraźnie mniejsza aniżeli złączy ze stali w stanie normalizowanym, o zbliżonym równoważniku węgla [6]. Pomimo dużej wartości równoważnika węgla Ce stale te należą do grupy stali dobrze spawalnych pod warunkiem przestrzegania ustalonych zaleceń technologicznych w czasie spawania [3]. Aby uniknąć pęknięć wodorowych w spoinie i strefie wpływu ciepła (SWC), należy odpowiednio sterować ilością ciepła wprowadzonego do złącza spawanego, kontrolować czas przebywania obszaru złącza spawanego w zakresie temperatury 800 – 500°C, rodzaj uzyskanej struktury złącza spawanego, a także ograniczyć ilość wodoru wprowadzonego do złącza w wyniku procesu spawania. Na skutek rozpuszczenia mikrododatków w osnowie stali w obszarze SWC obszar przemian na wykresie CTPc przesuwają się w kierunku dłuższych czasów stygnięcia, zwiększając hartowność SWC. Dla stali drobnoziarnistych o dużej wytrzymałości czas ten przyjmuje się w granicach od 5 do 20 s. Krótsze czasy stygnięcia sprzyjają powstawaniu pęknięć zimnych, natomiast dłuższe powodują spadek udarności SWC. Struktura martenzytyczno-bainityczna powstająca w obszarach poddanych cyklowi cieplnemu spawania różni się od drobnoziarnistej, oryginalnej struktury stali, co może być przyczyną pogorszenia właściwości plastycznych SWC, szczególnie przy spawaniu z dużą energią liniową. Przyczyną pogorszenia udarności może być również pojawienie się struktury ferrytu z wyspami martenzytyczno-austenitycznymi [3]. Obszar SWC złącza nagrzewany jest zwykle do temperatury wyższej niż temperatura odpuszczania stali podczas jej wytwarzania. Powoduje to pojawienie się w SWC obszaru o zmniejszonej twardości i wytrzymałości. W celu ograniczenia tego zjawiska należy dokładnie kontrolować ilość wprowadzonego ciepła do złącza spawanego [1, 4, 12].

W zależności od składu chemicznego i warunków obróbki cieplnej uzyskuje się stale o różnych wartościach granicy plastyczności i różnym udziale składników strukturalnych (tabl. 1).

Tablica 1

Struktury konstrukcyjnych stali drobnoziarnistych ulepszanych cieplnie [4]
Metallographic structures of high strength, fine-grained structural steels [4]

Gatunek stali	Udział struktury [%]			
	ferrytyczna	perlityczna	bainityczna	martenzytyczna
S460NL/ML	10	90	0	0
S690QL	0	0	86	14
S960QL	0	0	25	75
S1100QL	0	0	0	100

Cykl cieplny spawania może być kontrolowany przez sterowanie ilością wprowadzonego ciepła oraz dobór temperatury podgrzewania wstępnego i temperatury międzyściegowej. Zmniejszenie naprężeń w złączy spawanym osiąga się przez ograniczenie oddziaływania naprężeń własnych złączy już wykonanych na złącza wykonywane oraz ograniczanie oddziaływania ciężaru własnego elementów spawanych.

Temperatura podgrzania wstępnego zależy od gatunku stali oraz warunków odprowadzenia ciepła ze złącza. Podgrzanie wstępne sprzyja także usunięciu wodoru ze złącza i ograniczeniu naprężeń własnych w złączy spawanym. Przekroczenie dopuszczalnej temperatury międzyściegowej powoduje pogorszenie właściwości złącza. Do spawania stali drobnoziarnistych o dużej wytrzymałości są stosowane materiały dodatkowe o granicy plastyczności odpowiadającej materiałowi rodzimemu oraz zwykle o wyższym współczynniku C_e niż współczynnik C_e materiału rodzimego, ponieważ metal spoiny nie jest poddawany ulepszeniu cieplnemu [8]. Oznacza to, że pękanie wodorowe może występować także w obszarze spoin, a nie tylko w SWC [2]. Zaleca się, aby materiały spawalnicze do spawania stali drobnoziarnistych o dużej wytrzymałości nie zawierały więcej niż $5 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ wodoru dyfundującego [7]. Z kolei do spawania ściegów graniowych zalecany jest materiał dodatkowy o mniejszej wytrzymałości niż wytrzymałość materiału rodzimego. W praktyce ściegi graniowe wykonuje się często drutem G4Si1, którego stopiwo, ułożone w osłonie mieszanki M21, ma granicę plastyczności nie mniejszą niż 460 MPa.

Warstwy wypełniające spoin wykonuje się drutem o nieco mniejszej wytrzymałości niż wytrzymałość materiału rodzimego. W wyniku dość dużego stopnia wymieszania stopiwa z materiałem rodzimym (około 20 – 30%) uzyskuje się właściwości wytrzymałościowe złącza nie gorsze niż materiału rodzimego. Zapewniona jest również większa udurowienie złącza, lepsza odporność na pękanie zimne oraz mniejsze naprężenia własne w złączy [9]. Pomimo istotnego postępu w produkcji stali drobnoziarnistych ulepszanych cieplnie, poprawy ich spawalności oraz stosowania niskowodorowych procesów spawania pękanie wodorowe jest wciąż głównym problemem związanym ze spawalnością tej grupy stali i wymaga dalszych badań.

3. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

3.1. Zakres badań

Badano technologię zrobotyzowanego spawania GMA złączy teowych blach grubości 10 mm ze stali S960QL i S690QL ze spoinami czołowymi oraz ręcznego spawania GMA złącza doczołowego blach grubości 10 mm ze stali S960QL. Na zrobotyzowanym stanowisku spawano złącza na miedzianej podkładce formującej grań (stal 690QL) i bez podkładki (stal 960QL). Ręczne spawanie GMA stali S960QL wykonano bez podkładki. Badania technologii prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 15614-1.

3.2. Materiały stosowane do badań

Materiał dodatkowy do badań dobrano – zgodnie z zaleceniami producentów blach – tak, aby właściwości materiału dodatkowego odpowiadały właściwościom spawanych blach (tabl. 2).

Tablica 2
Właściwości materiałów dodatkowych użytych do spawania stali S690QL i S960QL metodą GMA
Mechanical properties of consumables for GMA welding of S690QL and S960QL steels

Gatunek blach	Gatunek drutu	$R_{0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	KV [J]		Sposób spawania
					20°C	–40°C	
S690QL	Mn3Ni1CrMo	≥690	≥790	≥16	≥80	≥47	spawanie zrobotyzowane
S960QL	Mn4Ni2CrMo	≥885	≥940	≥14	≥70	≥47	spawanie zrobotyzowane
S960QL	T894ZMM1H5	>960	980 – 1180	>8	≥55 (0°C)	≥47	spawanie ręczne
Średnica drutu: 1,2 mm; gaz osłonowy: M21.							

3.3. Wykonanie złączy próbnych

Parametry spawania złączy próbnych (tabl. 3) dobrano na podstawie badań wstępnych polegających na układaniu prostych ściegów na dokładnie oczyszczonej powierzchni blach złączy (*bead-on-plate*) [8, 10]. Za kryteria oceny parametrów spawania przyjęto kształt przekroju poprzecznego ściegu, wygląd lica

ściegu oraz wartość energii liniowej spawania w zakresie wartości dopuszczalnych przez producenta blach [10, 12].

Tablica 3

Parametry spawania GMA złączy próbnych blach ze stali S690QL i S960QL
GMA welding parameters of S690QL and S960QL steel test joints

Nr ściegu	Natężenie prądu spawania [A]	Napięcie spawania [V]	Prędkość spawania [mm/s]	Energia liniowa [kJ/mm]
Ręczne spawanie GMA spoiny czołowej blach S960QL grubości 10 mm				
1	130	18,8	3,03	0,806
2 – 6	220	25,2 – 25,4	6,35 – 6,70	0,827 – 0,873
Drut: DR-SG 100X (Megafil 1100) o średnicy 1,2 mm; gaz osłonowy: EN 439: M21 (Ar+18%CO ₂), natężenie przepływu: 16 l/min; wolny wylot elektrody: 20 mm; temperatura podgrzewania wstępnego: 100°C; temperatura międzyściegowa: 100°C				
Zrobotyzowane spawanie GMA spoiny czołowej w złączy teowym blach S960QL grubości 10 mm				
1	155	22,4	3,15	0,88
2 – 5	200 – 210	28,2 – 28,4	6	0,76 – 0,78
p	210	28,3	6	0,79
Drut EN ISO 16834-A: G 89 6 M Mn4Ni2CrMo (FLIESS ED-FK 1000) o średnicy 1,2 mm; gaz osłonowy: EN 439: M21 (Ar+18%CO ₂), natężenie przepływu: 16 l/min; wolny wylot elektrody: 20 mm; temperatura podgrzewania wstępnego: 75÷100°C; temperatura międzyściegowa: maks. 175°C; wykonano podpawanie grani (ścieg p)				
Zrobotyzowane spawanie GMA spoiny czołowej w złączy teowym blach S690QL grubości 10 mm				
1	180	22,8	3,35	1,3
2 – 5	210 – 220	28,4	6,0	0,8
Drut: EN ISO 16834-A: GMn3Ni1CrMo/FLIESS ED – FK 1 SG-690 o średnicy 1,2 mm; gaz osłonowy: EN 439: M21 (Ar+18%CO ₂), natężenie przepływu: 16 l/min; wolny wylot elektrody: 20 mm; temperatura podgrzewania wstępnego: 55÷75°C; temperatura międzyściegowa: 200–225°C; spawano na podkładce miedzianej				

3.4. Badania nieniszczące złączy

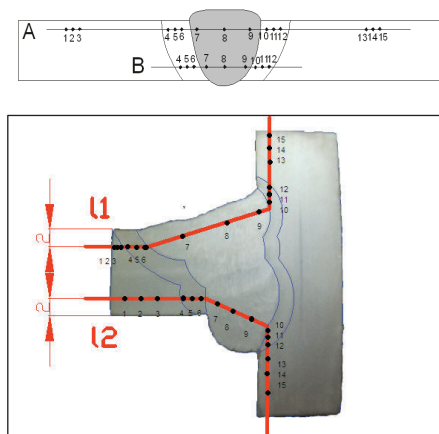
Badania wizualne złączy prowadzone zgodnie z normą PN-EN 970 nie wykazały wad. Badania penetracyjne (złącze spawane ręcznie) wykonane zgodnie z normą PN-EN 571 oraz badania magnetyczno-proszkowe (złącza spawane na stanowisku zrobotyzowanym) wykonane zgodnie z normą PN-EN 1290 również nie wykazały wad w złączach.

Ocenę badanych złączy metodą radiograficzną (złącze spawane ręcznie) i ultradźwiękową (złącza spawane na stanowisku zrobotyzowanym) przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 5817. Wszystkie złącza próbne spełniały wymagania poziomu jakości B.

3.5. Badania twardości

Badania twardości prowadzono wzdłuż 2 linii pomiarowych (rys. 1) po 3 pomiary w każdej strefie złącza spawanego. Największe wartości twardości w każdym z wykonanych złączy próbnych nie przekraczały wartości dopuszczalnych (tabl. 4).

3.6. Badania właściwości mechanicznych złącza doczołowego



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiaru twardości

Fig. 1. Layout of hardness test points

Badano również właściwości mechaniczne złącza doczołowego blach ze stali S960QL. W próbie rozciągania próbki zostały zerwane w obszarze spoiny, jednakże wytrzymałość na rozciąganie złączy (tabl. 5) była na poziomie wytrzymałości materiału rodzimego i materiału dodatkowego (tabl. 2). Wyniki próby zginania złącza doczołowego od strony lica i grani były pozytywne – przy kącie gięcia 180° nie stwierdzono żadnych pęknięć i naderwań. Wynik próby udarności złącza doczołowego, wykonanej w temperaturze 20°C , był także pozytywny. Praca łamania kV wynosiła 54 J w spoinie i 67 J w SWC.

3.7. Badania metalograficzne

W badaniach makroskopowych przekroju poprzecznego badanych złączy próbnych (rys. 2) nie stwierdzono żadnych wad wewnętrznych, a układ poszczególnych ściegów był prawidłowy. Badania mikroskopowe obszaru złącza (rys. 3) potwierdziły spodziewaną strukturę bainityczno-martenzyticzną.

Tablica 4

Wyniki badań twardości złączy próbných
Results of hardness tests

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Złącze doczołowe stali S960QL – ręczne spawanie metodą GMA															
L A	330	330	330	325	394	397	302	294	309	366	339	314	327	333	330
L B	–	–	–	317	360	370	345	297	306	330	317	306	–	–	–
Złącze teowe ze spoiną czołową stali S960QL – zrobotyzowane spawanie GMA															
L 1	387	390	357	357	354	354	351	354	345	370	342	336	360	360	380
L 2	390	357	351	363	370	370	366	351	370	366	357	345	387	387	366
Złącze teowe ze spoiną czołową stali S690QL – zrobotyzowane spawanie GMA															
L 1	253	306	251	247	253	235	309	238	247	236	253	306	285	294	306
L 2	292	283	285	254	272	236	262	253	247	272	225	228	264	281	283

Tablica 5

Wyniki próby rozciągania
Results of tensile test

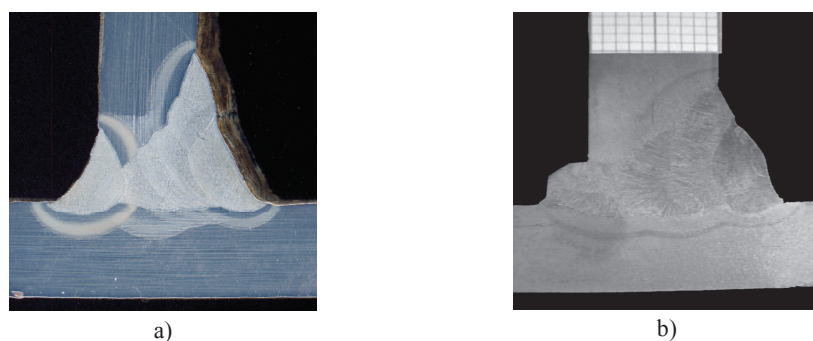
Nr próbki	Wymiary przekroju próbki [mm]	Pole powierzchni przekroju próbki [mm ²]	Siła niszcząca próbkę [kN]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Miejsce zerwania próbki
1	7,9/25,0	197,5	196,8	996	spoina
2	7,8/24,9	194,2	186,0	997	spoina
3	8,0/24,9	199,2	196,8	988	spoina

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Badania technologii spawania GMA blach ze stali gatunku S690QL i S960QL wykazały ich dobrą spawalność mimo dużego równoważnika węgla Ce. Odpowiednio dobrana temperatura podgrzewania wstępnego oraz kontrola temperatury międzyściegowej sprawiają, że w złączach nie występują pęknięcia wodorowe (zimne).

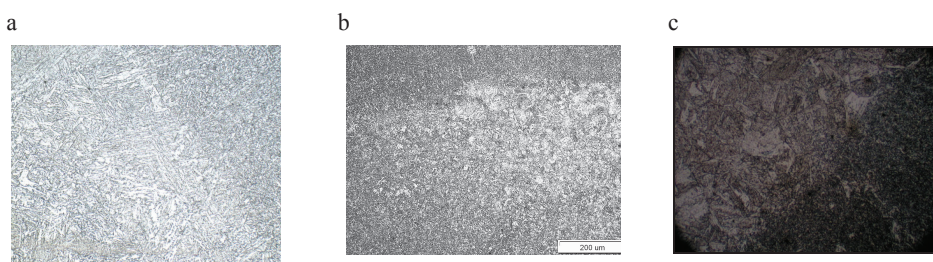
Wyniki badań mechanicznych złącza doczołowego blach ze stali S960QL, spawanego ręcznie GMA w pozycji podolnej drutem proszkowym MEGAFIL 1100, były zgodne z wymaganiami norm. Miejszem zerwania wszystkich próbek w próbie rozciągania statycznego złącza był obszar spoiny, jednakże ich wytrzymałość była na poziomie wytrzymałości materiału rodzimego (tabl. 5). Bardzo dobre właściwości plastyczne złączy zostały potwierdzone w próbach zginania i badania uderzeniowego. Największa twardość występuje w SWC i wynosi tylko 397 HV10 (tabl. 4, rys. 1). Badania makro- i mikroskopowe złączy wykazały popraw-

ny kształt spoiny i brak jakichkolwiek wad wewnętrznych, rozrost ziarna w SWC oraz wymaganą martenzyczno-bainityczną strukturę spoiny (rys. 2 i 3).



Rys. 2. Widok makrostruktury przekroju poprzecznego złączy stali S960QL (a) i S690QL (b) spawanych metodą GMA na stanowisku zrobotyzowanym

Fig. 2. Macrostructure of S960QL welded joint (a) and S690QL welded joint (b)



Rys. 3. Mikrostruktura obszaru linii stopienia: a) złącze stali S960QL spawane ręcznie GMA drutem rdzeniowym MEGAFIL 1100, b) złącze stali S960QL spawane na stanowisku zrobotyzowanym drutem Mn4Ni2CrMo, c) złącze stali S690QL spawane na stanowisku zrobotyzowanym drutem Mn3Ni1CrMo

Fig. 3. Microstructure of the fusion line area: a) welded joint of S960QL steel. Manual GMA welding. Wire – MEGAFIL 1100; b) welded joint of S960QL steel. Robotic GMA welding. Wire – Mn4Ni2CrMo; c) welded joint of S690QL steel. Robotic GMA welding. Wire – Mn3Ni1CrMo

Badania technologii zrobotyzowanego spawania GMA w pozycji podolnej złączy teowych blach ze stali S690QL i S960QL ze spoinami czołowymi wykazały, że w celu zapewnienia wymaganej jakości złączy konieczne jest dokładne sterowanie cyklem cieplnym spawania oraz precyzyjne ustawienie odległości i kąta palnika GMA względem spawanego złącza. W procesie spawania ręcznego GMA spawacz robi to intuicyjnie.

Użycie zbyt dużej energii liniowej spawania ściegu graniowego (w granicach dopuszczalnych przez producenta stali) może spowodować powstanie poduszki

ciekłego metalu, izolującej krawędzie rowka spawalniczego od bezpośredniego oddziaływania łuku spawalniczego. Może to być przyczyną przyklejeń w obszarze grani złącza. Spawanie GMA w pozycji podolnej złączy teowych blach ze stali S960QL ze spoiną czołową bez podkładki jest możliwe, jednak powtarzalność wyników nie jest zadowalająca z uwagi na trudności w uzyskaniu wymaganej jakości złączy w obszarze grani. Opisane w artykule złącze wykonano techniką z podpawaniem grani. Technika ta jest zalecana do spawania GMA na stanowisku zrobotyzowanym. Badania jakości złączy wykazały, że kształt przekroju poprzecznego spoiny jest prawidłowy, a spoina spełnia wymagania poziomu jakości B. Maksymalna twardość w złączy spawanym wynosi 390 HV i jest mniejsza niż dopuszczalna, wynosząca 420 HV. Badania mikroskopowe wykazały rozrost ziarna w SWC oraz wymaganą martenzyczno-bainityczną strukturę spoiny.

Z kolei badania technologii spawania GMA na stanowisku zrobotyzowanym złącza teowego blach S690QL na podkładce miedzianej wykazały, że optymalny kształt grani spoiny uzyskano na podkładce z rowkiem o wymiarach 3×5 mm. Większe wymiary rowka podkładki powodują ściekanie nadtopionego metalu blach do rowka. Wyniki badań jakości złączy próbnych wykazały prawidłowy kształt spoin oraz spełnienie wymagań poziomu jakości B. Największa twardość w złączy spawanym wynosi 309 HV – blisko linii stopienia spoiny. Porównanie przyjętych parametrów spawania ręcznego złącza doczołowego oraz parametrów spawania złącza teowego na stanowisku zrobotyzowanym (tabl. 3) wskazuje, że wartości energii liniowej oraz parametry spawania są podobne mimo użycia różnych gatunków drutu i spawania różnych złączy. Zwiększenie prędkości spawania na stanowisku zrobotyzowanym powodowało gorsze formowanie ściegu spoiny.

LITERATURA

- [1] **Adamczyk J.**, Manufacturing of mass-scale products from structural microalloyed steels in integrated production lines, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, vol. 20, no. 1 – 2, s. 399 – 402.
- [2] **Alexandrov B. T., Theis K., Streitenberger M., Herold H., Martinek I.**, Cold Cracking in Weldments of Steel S690 QT, IIW. Doc. 1673-04 (ex-doc. IX-2115-04), *Welding in the World*, 2005, vol. 49, no. 5/6, s. 64 – 73.
- [3] **Brózda J.**, Nowoczesne stale konstrukcyjne i ich spawalność, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 1995, nr 4.
- [4] **Hildebrand J., Werner F.**, Change of structural condition of welded joints between high-strength fine-grained and structural steels, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2004, no. 2, s. 87 – 95.
- [5] **Kielbasiński A.**, Technologie spawania GMA złączy doczołowych drutem litym i proszkowym blach ze stali wysokiej wytrzymałości, praca dyplomowa, Politechnika Śląska 2008.
- [6] **Musgen B.**, High strength quenched and tempered steels – production, properties and applications, *Metal Construction*, 1985, no. 8, s. 495 – 500.

- [7] **Nevasmaa P.**, Hydrogen induced cracking in high – strength multipass weld metal – predicting the cracking risk and necessary precautions for safe welding, IIW Doc. IX – 2066 – 03.
- [8] **Sampath K.**, How to Choose Electrodes for Joining High-Strength Steels, *Welding Journal*, 2007, vol. 86, no. 7, s. 26 – 28.
- [9] **Szorek T.**, Technologia spawania zrobotyzowanego GMA spoiny czołowej w złączu teowym blach ze stali S960, praca dyplomowa, Politechnika Śląska 2008.
- [10] Thyssen Krupp, Steel XABO – Material Specifications 245, 2005, December.
- [11] **Warcaba Ł.**, Technologia zrobotyzowanego spawania GMA spoin czołowych blach ze stali S690 w złączach teowych na podkładce usuwalnej, praca dyplomowa, Politechnika Śląska 2008.
- [12] Weldox Welding, Materiały informacyjne firmy SSAB Oxelsönd.

Praca wpłynęła do Redakcji 9.07.2009

Recenzent: prof. dr hab. inż. Jan Pilarczyk

ROBOTIC GMA WELDING OF S690 AND S960 BUTT JOINTS

S u m m a r y

High strength, fine-grained structural steels S690 and S960 poses the good weldability provided that the welding procedure includes recommendations of the steel manufacturer. Findings of the robotic GMA welding technology of butt weld T-joints of 10 mm thick S690 and S960 steel plates are presented in the article. Results of quality examinations of welded joints meet the requirements of standards, however parameters of welding and the heat input at robotic GMA welding do not differ essentially from parameters and heat input of manual GMA welding. The correct shape of weld beads at the robotic GMA welding can be obtained in the range of mean heat input (in the range of heat input advisable by steel producers). It was also found that in the case of robotic GMA welding of the v-groove T-joint of plates the limited access of GMA welding torch to welded joints area, requires very precise positioning of welding torch to the welded joint. Results of investigations show that full utilization of robotic welding advantages – welding in the upper range of welding parameters meets the technological-linked limitations connected with abnormal building of weld beads when welding with the higher welding speeds.

Key words: high strength, fine-grained structural steels, GMA welding, robotic welding