

Właściwości złączy spawanych ze stali dwufazowej DP600 metodą MAG

Properties of dual phase steel joints of DP600 welded by MAG

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki statycznej próby rozciągania złączy, badań metalograficznych i pomiarów twardości spoin w złączach spawanych ze stali dwufazowej DP600 wykonanych z blachy o grubości 1,4 mm metodą MAG łukiem konwencjonalnym i łukiem pulsującym. Stwierdzono niewielki spadek twardości w strefie SWC i jego wpływ na położenie przelomu w próbkach rozciąganych złączy.

Słowa kluczowe: mikrostruktura, właściwości mechaniczne, stal dwufazowa, spawanie MAG

Abstract

In the present study, dual phase steel sheet with a thickness of 1,4 mm was subjected to MAG welding by conventional arc and pulsed arc. The results of the tensile tests, metallographic examination and hardness measurements of welds in joints are discussed. It was found that a hardness drop occur in the HAZ zone influencing on decrease strength and localized on place of break during tensile testing.

Keywords: microstructure, mechanical properties, dual phase steel, MAG welding

Wstęp

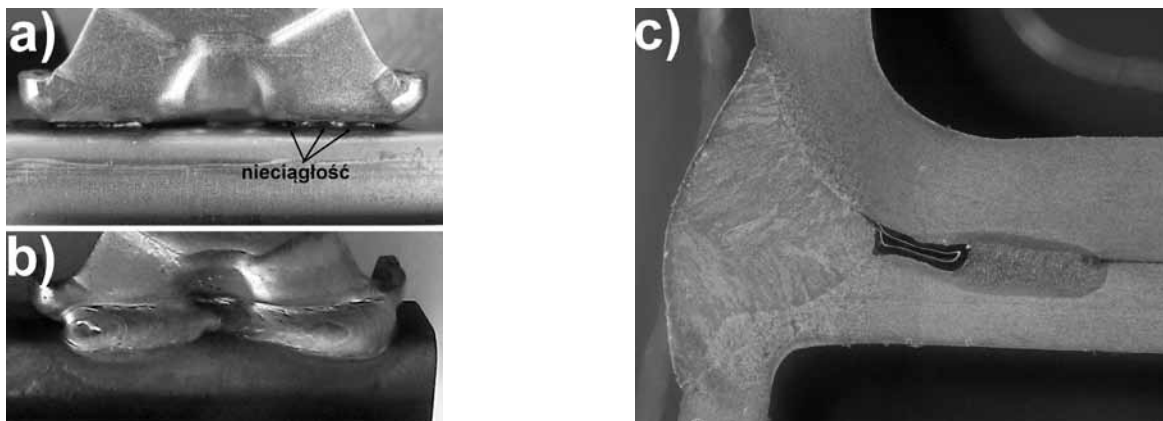
Do dwóch najważniejszych wymagań stawianych stalom stosowanym w przemyśle motoryzacyjnym zalicza się wysoką wytrzymałość i dobrą formowalność metodami przeróbki plastycznej. Wymagania te spełniają niskostopowe stale wielofazowe zaliczane do grupy stali AHSS (*Advanced High Strength Steel*). Obecnie najpowszechniej stosowane są stale dwufazowe ferrytyczno-martensytyczne (DP), ferrytyczno-bainityczne (FB) oraz trójfazowe TRIP [1]. Z grupy tych stali największe zastosowanie w przemyśle komponentów samochodowych znajdują stale ferrytyczno-

-martensytyczne (DP) o grubościach do 1,5 mm. Gatunki stali DP są stalami dwufazowymi, zawierającymi miękki ferryt, który zapewnia dobrą formowalność, oraz twardy martensyt, który zapewnia wysoką wytrzymałość materiału.

Podstawową metodą łączenia tych stali jest zgrzewanie elektryczne oporowe [1÷4], a obecnie coraz częściej także spawanie laserowe [5÷7]. Stosuje się również spawanie metodą MAG [8÷10]. Spoiny laserowe z niezgodnościami nieakceptowanymi poprawia się najczęściej także metodą spawania MAG. Przykładem takiego rozwiązania naprawczego jest złącze pokazane na rysunku 1. Z tych powodów rozpatrywano w artykule spawanie metodą MAG stali DP600.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak; dr inż. Piotr Białucki; dr inż. Wiesław Derlukiewicz; dr inż. Artur Lange – Politechnika Wrocławska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: piotr.bialucki@pwr.edu.pl



Rys. 1 Złącze komponentu samochodowego: a) spawane laserem z nieakceptowanymi niezgodnościami; b, c) naprawiane metodą MAG
Fig. 1. Joint of car component: a) laser welded car with unacceptable imperfections; b, c) repaired by MAG method

Charakterystyka materiału podstawowego

Do badań użyto stali DP600 o grubości 1,4 mm, składzie chemicznym podanym w tabelicy I i właściwościach mechanicznych zawartych w tabelicy II.

Stale DP mają małą ilość składników stopowych i małą wartość równoważnika węgla CEV = 0,23 (jak na stale o takiej wytrzymałości), dzięki temu mogą być łatwo spawane ze wszystkimi stalami stopowymi i zwykłymi stalami konstrukcyjnymi przy użyciu konwencjonalnych metod spawania łukowego.

Stale DP mogą być spawane podobnymi energiami liniowymi jak inne stale o podwyższonej wytrzymałości.

Stanowisko do spawania

Proces spawania został wykonany na zrobotyzowanym stanowisku przedstawionym na rysunku 2, składającym się ze sterowanego cyfrowo półautomatu spawalniczego MIG-MAG Lorch S SpeedPulse oraz robota spawalniczego Motoman EA1900N.

Spawano drutem G3Si1 o średnicy 1 mm w osłonie gazu M21 (82% Ar i 18% CO₂) o natężeniu przepływu 12 l/min. Długość wolnego wylotu drutu wynosiła 10 mm, a pochYLENIE uchwytu 10° w kierunku przeciwnym do

kierunku spawania. Próbkę mocowano w przyrządzie z zaciskami dźwigniowymi. Spawanie wykonywano bez podkładki.

Próby napawania, poprzedzające spawanie, miały na celu określenie parametrów procesu pozwalających na pełne przetopienie blach w ten sposób, aby przy spawaniu złączy doczołowych blach bez ukosowania krawędzi umożliwić swobodne formowanie się grani przy szczelinie w rowku spawalniczym w granicach do 0,5 mm.



Rys. 2. Zrobotyzowane stanowisko stosowane do badań złączy spawanych

Fig. 2. Robotic welding station used in test

Tablica I. Skład chemiczny stali DP600

Table I. The chemical composition of the steel DP600

Stal	C, % max	Si, % max	Mn, % max	P, % max	S, % max	Cr, % max	Al, % max
Dogal 600 DP	0,120	0,300	1,660	0,020	0,004	0,500	0,020

Tablica II. Własności mechaniczne stali DP600

Table II. Mechanical properties of the steel DP600

Stal	R _{p0,2} , MPa min-max	R _m , MPa min-max	A, % min
Dogal 600 DP	350÷480	600÷700	16

Dobór parametrów spawania

Wstępnie przyjęte parametry spawania zweryfikowano na podstawie wykonanych napoin przedstawionych na rysunku 3. Napoiny wykonano, stosując łuk konwencjonalny o natężeniu prądu 75 A i zmiennych prędkościach spawania od 40 do 60 cm/min (odpowiednia energia liniowa wynosiła 1,15, 1,38 i 1,72 kJ/mm) oraz stosując łuk pulsujący o natężeniu średnim 84 A i prędkości spawania 50 cm/min, co odpowiadało energii liniowej 1,79 kJ/mm.

Na podstawie przeprowadzonej oceny jakości napoin wybrano do wykonania złączy próbnych spawanie łukiem konwencjonalnym z prędkością 40 cm/min oraz spawanie łukiem pulsującym z prędkością 50 cm/min.

Złącza próbne wykonano na podstawie opracowanych instrukcji technologicznych spawania WPS.



Rys. 3. Napoiny od strony lica wykonane z następującymi prędkościami: 1 – łuk konwencjonalny, prędkość 40 cm/min, 2 – łuk konwencjonalny, prędkość 50 cm/min, 3 – łuk konwencjonalny, prędkość 60 cm/min, 4 – łuk pulsujący, prędkość 50 cm/min

Fig. 3. Appearance of face welds made with following speeds: 1 – conventional arc, speed of 40 cm/min, 2 – conventional arc, speed of 50 cm/min, 3 – conventional arc, speed of 60 cm/min, 4 – pulsing arc, speed 50 cm/min

Badania wizualne

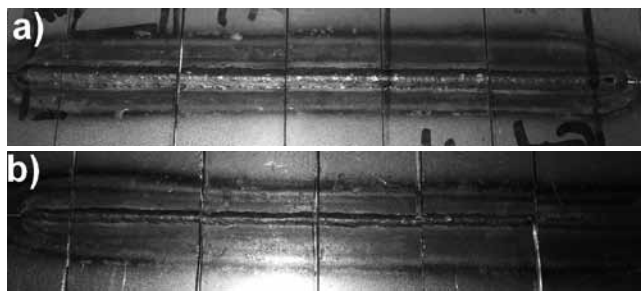
Na rysunkach 4 i 5 pokazano spoiny na próbkach do badań wytrzymałości złączy na rozciąganie wyciętych ze złączy próbnych.

Badania wizualne potwierdziły wysoką estetykę zarówno lica, jak i grani spoin w obu złączach. Obie spoiny spełniają poziom jakości B wg PN-EN ISO 5817.

Tablica III. Wyniki badań wytrzymałości złączy na próbkach poprzecznych

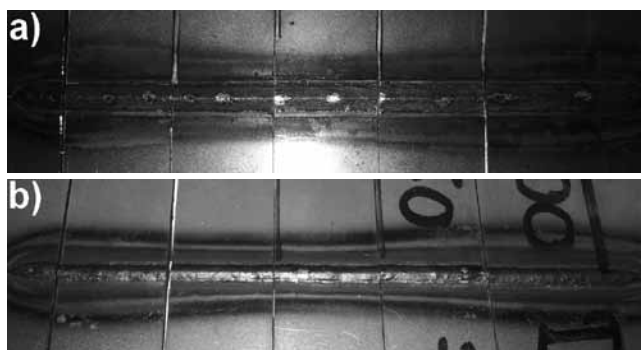
Table III. The results of transverse strength tests of joints

Numer próbki	Grubość, mm	Szerokość, mm	Powierzchnia, mm ²	F _m , N	R _m , MPa	Śr. R _m , MPa
Spawanie łukiem konwencjonalnym						
1	1,55	11,90	18,45	10390	563	563
2	1,45	12,10	17,55	9690	552	
3	1,50	12,05	18,08	10480	580	
4	1,45	12,00	17,40	9990	574	
5	1,55	12,00	18,60	10190	548	
Spawanie łukiem pulsującym						
1	1,5	11,95	17,93	10100	563	569
2	1,5	11,90	17,85	10140	568	
3	1,5	12,05	18,08	10350	573	
4	1,5	12,00	18,00	10320	573	
5	1,5	11,95	17,93	10190	568	



Rys. 4. Złącze spawane łukiem konwencjonalnym z prędkością 40 cm/min: a) lico, b) grań

Fig. 4. Joint welded with conventional arc at a speed of 40 cm / min: a) face b) back



Rys. 5. Złącze spawane łukiem pulsującym z prędkością 50 cm/min: a) lico, b) grań

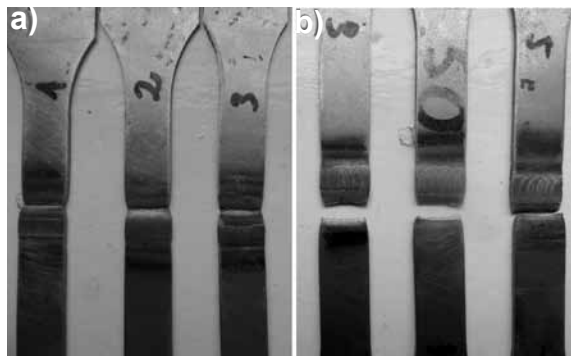
Fig. 5. Joint welded with pulsed arc at a speed of 50 cm/min: a) face b) back

Badania wytrzymałości na rozciąganie

Wytrzymałość złączy spawanych określono na podstawie statycznej próby rozciągania wykonanej na maszynie wytrzymałościowej Louis Schopper w zakresie pomiarowym do 2 kN. Badania przeprowadzono na próbkach poprzecznych, w których nadlewy lica i grani zostały obrobione do grubości materiału rodzimego. Wyniki próby rozciągania przedstawiono w tablicy III.

Wszystkie próbki z badanych złączy uległy zerwaniu poza obszarem spoiny (w SWC). Jak można zauważyć (tabl. III), złącza nie wykazały istotnych różnic w wytrzymałości na rozciąganie niezależnie od rodzaju zastosowanego łuku, a ich średnia wartość wyniosła 563÷569 MPa. Przykładowe próbki po próbie rozciągania przedstawiono na rysunku 6.

Na uwagę zasługuje fakt, że pomimo zastosowania spoiwa o niższych właściwościach wytrzymałościowych (G3Si1) niż spawana stal DP600 przełom w rozciąganych złączach nastąpił poza spoiną w SWC.



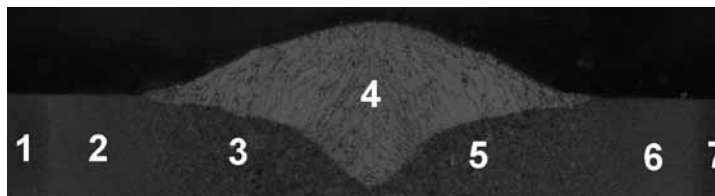
Rys. 6. Próbkę złączy spawanych po próbie rozciągania: a) spawanych łukiem konwencjonalnym, b) łukiem pulsującym
Fig. 6. Samples of welded joints after tensile test: a) conventional arc welding, b) pulsed arc

Pomiary twardości

Pomiar twardości wykonano metodą Vickersa za pomocą twardościomierza Sinowon HVS-1000, stosując obciążenie 1 kG (9,8 N). Pomiary wykonano w siedmiu obszarach makrostruktury złączy pokazanych na rysunku 7, a wyniki przedstawiono na rysunku 8. Każdy punkt (rys. 8) jest średnią z trzech pomiarów w danym obszarze złącza.

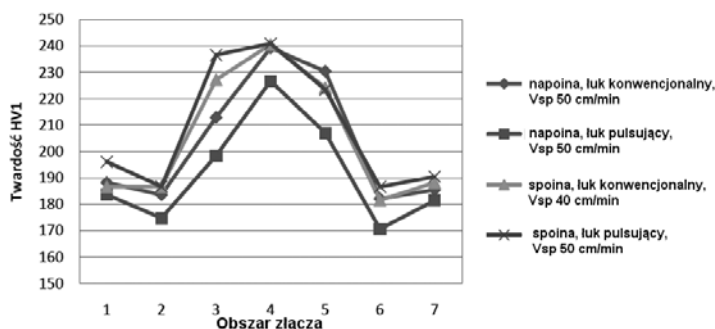
Z rozkładów twardości HV1 przedstawionych na rysunku 8 wynika, że w strefie SWC w obszarze rekrytalizacji nastąpiło niewielkie (ok. 5%) zmniejszenie twardości w porównaniu z twardością materiału rodzimego. Rozkłady twardości w spoinach i napoinach mają taki sam przebieg, a zmierzone twardości są do siebie zbliżone. Największą twardość wynoszącą 240 HV1 zanotowano w spoinach.

Rys. 9. Mikrostruktura materiału rodzimego stali DP600. Pow. 500x. Traw. odczynnikami La Pera
Fig. 9. The microstructure of the base material of steel DP600. Magn. 500x. Etch. with reagent La Pera



Rys. 7. Układ obszarów napoin (również złączy spawanych), w których wykonano po trzy pomiary twardości

Fig. 7. Layout areas of welds (as well welded joints) in which was performed three points of hardness measurements

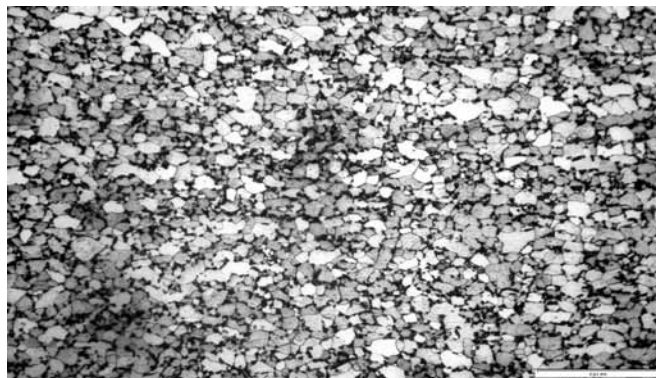


Rys. 8. Rozkład twardości w złączach spawanych i napoinach: 1, 7 – materiał rodzimy; 2, 6 – SWC z rekrytalizacją; 3, 5 – SWC gruboziarnista; 4 – spoina
Fig. 8. Distribution of hardness in the welded joints; 1, 7 – base material; 2, 6 – SWC with recrystallization; 3, 5 – SWC coarse; 4 – seam

Badania metalograficzne

Do obserwacji mikrostruktury połączeń spawanych wykorzystano mikroskop świetlny Olympus CK40M. Obserwacje przeprowadzono przy powiększeniach z zakresu 50÷500 razy na zgładach metalograficznych nietrawionych oraz trawionych głównie odczynnikiem 5% Nitalu.

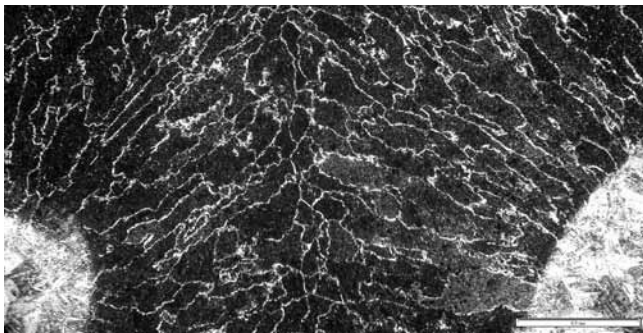
Strukturę materiału rodzimego pokazano na rysunku 9. Jest to typowa struktura stali dwufazowej ferrytyczno-martensytycznej. Do ujawnienia składników struktury stali użyto odczynnika La Pera. Stal DP600 charakteryzuje się dużą drobnoziarnistością struktury i dla rozróżnienia jej poszczególnych składników wskazana jest obserwacja na mikroskopie przy powiększeniach większych niż 500x.



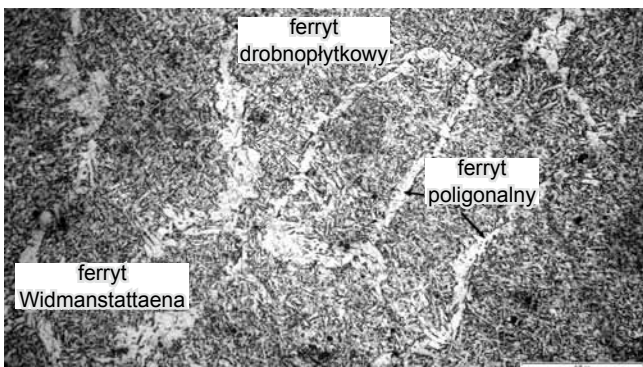
Charakterystyczny wygląd struktury spoiny pokazano na rysunku 10.

Spoina ma strukturę grubokrystaliczną z dendrytami ukierunkowanymi w przybliżeniu prostopadle do linii wtopienia. Oddzielne grupy dendrytów mają taki sam ogólny kierunek wzrostu. Grupy dendrytów mają wyraźne granice określające ziarna (rys. 11) z ferrytem poligonalnym oraz wnętrzem ziaren z ferrytem drobnopłytkowym i niewielką ilością ferrytu Widmanstättena.

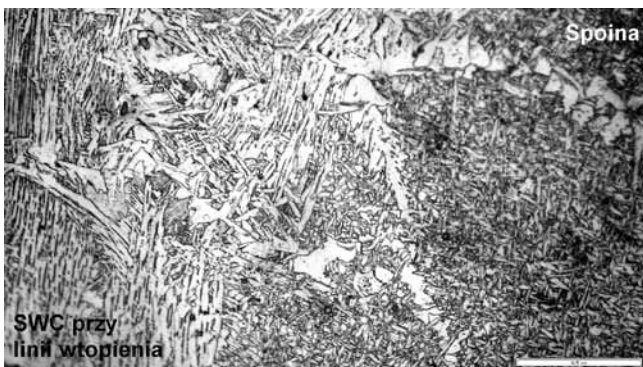
Przy linii wtopienia, w strefie wpływu ciepła występu-



Rys. 10. Mikrostruktura fragmentu spoiny wykonanej łukiem konwencjonalnym z prędkością spawania 40 cm/min. Pow. 50x. Traw. 5% Nitałem
Fig. 10. The microstructure of the weld made by a conventional arc welding at a speed of 40 cm / min. Magn. 50x. Eatch. with 5% Nital



Rys. 11. Mikrostruktura spoiny wykonanej łukiem pulsującym. Pow. 500x. Traw. 5% Nitałem
Fig. 11. The microstructure of the weld made by a pulsed arc welding. Magn. 50x. Eatch. with 5% Nital



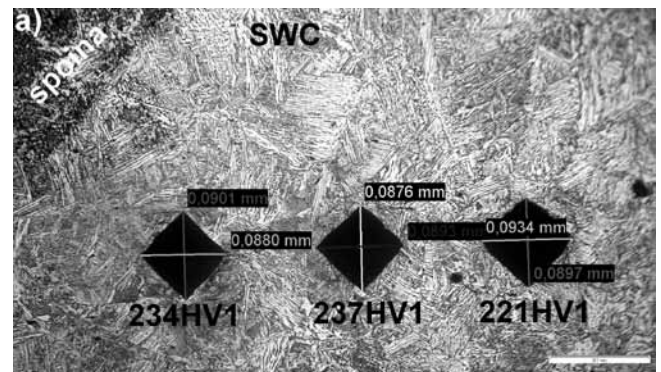
Rys. 12. Struktura złącza spawanego łukiem pulsującym w obszarze na granicy między materiałem rodzimym i spoiną. Pow. 500x. Traw. 5% Nitałem

Fig. 12. The structure of the pulsed arc welded joint in the area on the border between the parent material and the weld. Magn. 500x. Eatch. with 5% Nital

je gruboziarnista struktura materiału rodzimego z wyraźnymi cechami struktury Widmanstättena (rys. 12).

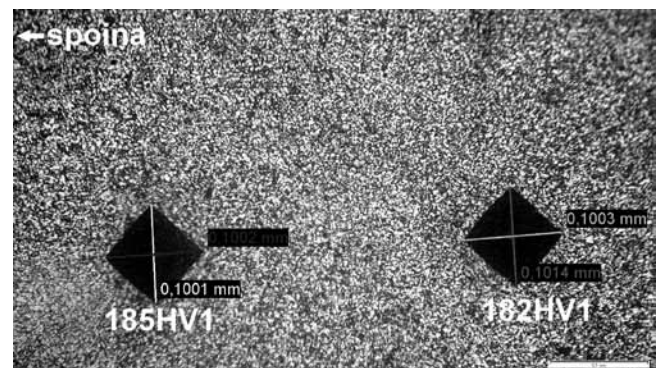
W strefie wpływu ciepła blisko linii wtopienia występuje gruboziarnista struktura materiału rodzimego (rys. 13a), która jest efektem przegrzania materiału ciepłem spawania. Występuje w niej ferryt płytkowy w układzie Widmanstättena oraz bainit (rys. 13b).

W strefie SWC w obszarze normalizowania występuje wyraźne rozdrobnienie ziaren, ale też mniejsza jest twardość (rys. 14).



Rys. 13. Struktura obszaru przegrzania w strefie SWC blisko linii wtopienia spoiny wykonanej łukiem pulsującym; a) pow. 200x, b) pow. 500x. Traw. 5% Nitałem

Fig. 13. The structure of the overheated area in the HAZ close to the border fusion zone of the weld made of pulsed arc; a) magn. 200x, b) magn. 500x. Eatch. with 5% Nital



Rys. 14. Struktura obszaru normalizowania w strefie SWC spoiny wykonanej łukiem pulsującym z prędkością 50 cm/min. Pow. 200x. Traw. 5% Nitałem

Fig. 14. Structure of normalizing area in the HAZ of joint made of the pulsed arc. Magn. 200x. Eatch. with 5% Nital

Podsumowanie

Dobre parametry spawania umożliwiły wykonanie złączy doczołowych z blach o grubości 1,4 mm ze swobodnym formowaniem grani przy szczelinach w rowku spawalniczym do 0,5 mm. Jakość spoin oceniana wizualnie spełniała wymagania wymiarów granicznych dla poziomu B wg PN-EN ISO 5817.

Spawanie metodą MAG stali DP600 spoiwem G3Si1 zapewnia wytrzymałość złączy doczołowych na rozciąganie na poziomie 560 MPa, mniejszą niż wytrzymałość materiału rodzimego, która wynosi min. 600 MPa, pomimo tego przełom próbek rozciąganych następował poza spoiną w strefie SWC w obszarze obniżonej twardości.

Podobne wyniki otrzymali autorzy pracy [8], którzy stwierdzili, że materiał spoiwa nie wywiera dużego wpływu na wytrzymałość statyczną ani zmęczeniową złączy doczołowych badanych stali TRIP i DP, ponieważ wszystkie złącza pękały w zmiękzonej strefie wpływu ciepła.

Niemniej jednak do wykonywania złączy doczołowych wskazane byłoby stosowanie spoiwa o wyż-

szej granicy plastyczności, np. spoiwa AWS: A5.28 ER 10XS-X zalecanego przez producenta stali [12]. Spoiwo G3Si1 może nadawać się natomiast do złączy ze spoinami pachwinowymi, np. złączy zakładkowych, w których wytrzymałość złączy można regulować przekrojem spoiny.

W granicach stosowanych energii liniowych spawania ($1,15 \div 1,79$ kJ/mm) zarówno łukiem konwencjonalnym, jak i łukiem pulsującym, nie wystąpiły prędkości stygnięcia złączy sprzyjające dużemu zróżnicowaniu twardości w złączu. W złączach nie wystąpiły struktury hartownicze. Twardość materiału rodzimego wynosiła ok. 190 HV1, a największa twardość występująca w spoinie ok. 240 HV1. W strefie wpływu ciepła występuje obszar o twardości nieco mniejszej niż twardość materiału rodzimego, wynoszącej ok. 180HV1.

Strefa zmian strukturalnych w badanych złączach jest ogólnie szeroka zarówno w obszarze gruboziarnistym jak i w obszarze normalizowanym czy też rekrystalizowanym i wynosi łącznie 1,8 mm w złączu spawanym z największą energią liniową.

Literatura

- [1] Khan M. I., Kuntz M. L., Biro E., Zhou Y.: Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Advanced High Strength Steels. *Materials Transactions*, Vol. 49, No. 7 (2008) s. 1629-1637.
- [2] Senkara J.: Współczesne stale karoseryjne dla przemysłu motoryzacyjnego i wytyczne technologiczne ich zgrzewania. *Przegląd Spawalnictwa* 11/2009, s. 3-7.
- [3] Ma C., Chen D.L., Bhole S.D., Boudreau G., Lee A., Biro E.: Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel. *Materials Science and Engineering A* 485 (2008) 334-346.
- [4] Ambroziak A., Tobota A., Tokarz K., Kustroń P.: Badania cienkościennych połączeń stalowych zgrzewanych punktowo oraz spajanych otworowo. *Przegląd Spawalnictwa*, 2008, nr 5, s. 6-11.
- [5] Farabi N., Chen D.L., Li J., Zhou Y., Dong S.J.: Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joint. *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 1215-1222.
- [6] Kavamura H.A., Batalhab G.F.: Mechanical strength evaluation for Nd-YAG laser and electric resistance spot weld (ERSW) joint under multiaxial loading. *Journal of materials processing technology* 201 (2008) 507-514.
- [7] Węglowski M.S., Stano S.: Właściwości złączy spawanych laserowo ze stali HDT580X. Vol. 29, nr 1 *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 2009.
- [8] Kapustka N., Conrardy C., Babu S., Albright C.: Effect of GMAW Process and Material Conditions on DP 780 and TRIP 780 Welds. *Welding Journal*. June 2008, Vol. 87, s. 135-148.
- [9] Burns T.J.: Weldability of a Dual-Phase Sheet Steel by the Gas Metal Arc Welding Process. Thesis of Master of Applied Science. Waterloo, Ontario, Canada, 2009.
- [10] Ramazani A., Li Y., Mukherjee K., Prahl U., Bleck W., Abdurakhmanov A., Schleser M., Reisinger U.: Microstructure evolution simulation in hot rolled DP600 steel during gas metal arc welding. *Computational Materials Science* 68 (2013) 107-116.
- [11] Materiały firmowe SSAB Swedish Steel. Dogal 600 i 800 DP. Stal o extra i ultra wysokiej wytrzymałości. 08.01.2010r. www.ssab.com/...dogal/pl/300_Dogal%20600%20i%20800%20DP.pdf. 5.04.2014.
- [12] Materiały firmowe SSAB Swedish Steel. Docol DP/DL Zimnowalcowana stal dwufazowa. 13.02.2014r. www.ssab.com/Global/DOCOL/...docol/pl/201_Docol%20DP,%20DL.pdf. 5.04.2014.