

Właściwości połączeń spawanych ze stali dwufazowych – DP

Properties of dual-phase (DP) steels welded joints

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki analizy wartości równoważnika węgla C_{eq} stali dwufazowych DP ze stalami wielofazowymi CP i TRIP, konwencjonalnymi o wysokiej granicy plastyczności do obróbki plastycznej na zimno LAD+BD+YD i o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie. Przedstawiono również wyniki badań metalograficznych i wybranych właściwości mechanicznych złączy spawanych metodą spawania GTAW stali dwufazowych: DP600Z140+M, DP800Z140+M i DP1000Z140+M.

Abstract

The paper presents results the analyzes of carbon equivalent dual-phase C_{eq} steels with complex-phase CP and TRIP steels, conventional steels with high yield strength for cold forming LAD + BD + YD and steels with higher yield strength in quenched and tempered condition. It also presents the results of metallographic and selected mechanical properties of GTAW welded joints: DP600Z140+M, DP800Z140+M i DP1000Z140+M.

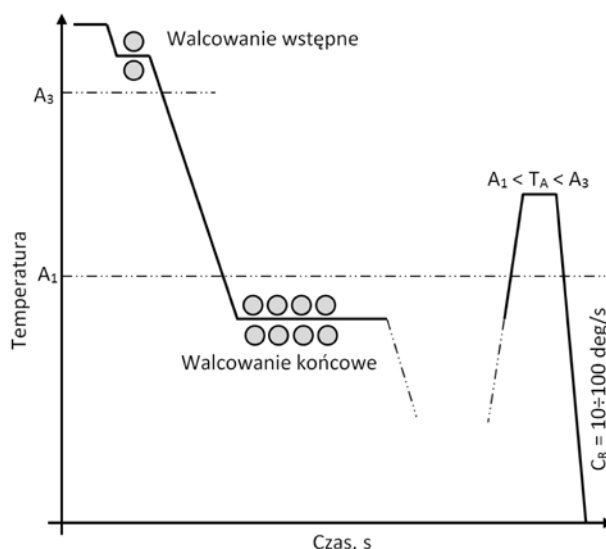
Charakterystyka stali DP i problemy jej spawalności

Zaawansowane stale o wysokiej wytrzymałości (AHSS – *Advanced High Strength Steel*) dzięki korzystnym właściwościom mechanicznym w odniesieniu do gęstości umożliwiają wyraźne zmniejszenie masy konstrukcji.

Analizowana stal stopowa jakościowa Litec DP Ruukki zaliczana jest do stali dwufazowych do obróbki plastycznej na zimno wg PN-EN 10346 [8]. Gatunki stali sklasyfikowano w normie według ich wzrastającej minimalnej wytrzymałości na rozciąganie R_m (tabl. I i II).

Mikrostruktura stali dwufazowych DP składa się z 30÷70% martenzytu w osnowie drobnoziarnistego, sferoidalnego ferrytu i 1÷5% metastabilnego austenitu szczątkowego. Warunkuje to wysoką wytrzymałość na rozciąganie do 1180 MPa (Arcelor Mittal Dual Phase 1180 HY) przy wydłużeniu względnym A_{80} do 27%. Mikrostruktura stali DP najczęściej powstaje w wyniku szybkiego nagrzania cienkich blach po walcowaniu na zimno do zakresu między A_c1 a A_c3 i kontrolowanym

chłodzeniu mgłą wodno-powietrzną do temperatury otoczenia (rys. 1). Drobne ziarno ferrytu uzyskiwane jest przez opóźnienie i zahamowanie rekryształizacji austenitu w obecności takich mikrodotyków stopowych jak: Al, V, Ti i Nb. PN-EN 10346 [8] metodą produkcji



Rys. 1. Schemat obróbki termomechanicznej stali Litec 600DP, 800DP i 1000DP użytych w eksperymencie, T_A – temperatura częściowej austenitacji, C_R – szybkość chłodzenia [5]

Fig. 1. Litec 600DP, 800DP i 1000DP steel thermo mechanical processing diagram used in the experiment, T_A – partial austenitizing temperature, C_R – cooling rate [5]

stali pozostawia w gestii wytwórcy, przy czym uzyskanie drobnoziarnistej struktury dwufazowej ferrytyczno-martenzytycznej wymaga stosowania optymalnego zakresu temperatury nagrzewania i przebiegu chłodzenia. Regulowane walcowanie z kolei pozwala obniżyć temperaturę walcówki przy zapewnieniu wymaganego zgniotu. W temperaturze pomiędzy A_{r3} i A_{r1} następuje przyspieszone chłodzenie.

Stal AHSS znajduje zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym m.in. na: ramy i belki poprzeczne, belki pionowe, belki wzmocnienia bocznego oraz elementy bezpieczeństwa, najczęściej zgrzewane oporowo [1]. W ostatnich latach prowadzone są badania dotyczące spawalności tych stali.

Wytwórcy stali dwufazowych dopuszczają stosowanie wszystkich metod spawania łukowego, zalecając zwłaszcza metody MIG, TIG i PAW oraz zgrzewanie elektryczne oporowe. Metody te są szczególnie pożądane w przemyśle motoryzacyjnym, ze względu na małe rozmiary i grubość elementów wykonywanych z tych stali oraz układanie lokalnych spoin nośnych przenoszących wysokie obciążenia. Ze względów estetycznych wymagana jest z kolei wąska spoina oraz zachowanie wysokiej czystości i jakości spoin.

Do spawania stosowane są materiały dodatkowe gwarantujące uzyskanie wyższej wytrzymałości na rozciąganie złącza niż materiału podstawowego, jednak np. w przypadku stali DP800 i DP1000 wytrzymałość na rozciąganie spoiny może być niższa niż materiału rodzimego, wobec braku dostępnych materiałów o tak wysokim R_m [2, 4, 6].

Dla stali DP pokrytych powłoką cynkową zalecanymi metodami spawania są spawanie łukowe i wiązką laserową.

Równoważnik węgla C_e stali DP na tle innych stali

W celu oceny spawalności stali o wysokiej wytrzymałości porównano wartości równoważnika węgla C_e wg równania (1) stali dwufazowych DP (rys. 2) ze stalami wielofazowymi CP (Complex-phase) (rys. 3), typu TRIP (Transformation Induced Plasticity) (rys. 4), stalami konwencjonalnymi używanymi w przemyśle motoryzacyjnym o wysokiej granicy plastyczności do obróbki plastycznej na zimno LAD+BD+YD (rys. 5÷7)

Tablica I. Skład chemiczny (analiza wytopowa) stali dwufazowych do obróbki na zimno wg PN-EN 10346 [8]

Table I. The chemical composition of dual-phase steels for cold forming acc. to PN-EN 10346 [8]

Oznaczenie		Skład chemiczny, % mas.										
Gatunek stali		Symbol rodzaju naniesionej powłoki**	C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Al całkowite	Cr+Mo max.	Nb+Ti max.	V max.	B max.
Znak stali*	Numer stali											
HCT450X	1.0937	+Z, +ZF, +ZA	0,14	0,80	2,00	0,080	0,015	≤ 2,00	1,00	0,15	0,20	0,005
HCT500X	1.0939				2,20							
HCT600X	1.0941				2,50							
HDT580X	1.0936	+Z, +ZF	0,17	0,80	2,20	0,080	0,015	≤ 2,00	1,00	0,15	0,20	0,005
HCT780X	1.0943	+Z, +ZF, +ZA										
HCT980X	1.0944	+Z, +ZF, +ZA	0,23	0,80	2,20	0,080	0,015	≤ 2,00	1,00	0,15	0,20	0,005
			0,23									

* H – wyroby płaskie ze stali o wysokiej granicy plastyczności do obróbki plastycznej na zimno, C – wyroby walcowane na zimno, D – wyroby walcowane na gorąco, T XXX – minimalna wytrzymałość na rozciąganie R_m XXX, MPa, X – stal dwufazowa

**+Z, +ZF, +ZA- +Z – ogniowe powlekanie cynkiem, +ZF – ogniowe powlekanie stopem cynk-żelazo, +ZA – ogniowe powlekanie stopem cynk-aluminium

Tablica II. Właściwości mechaniczne stali dwufazowych do obróbki plastycznej na zimno wg PN-EN 10346 [8]

Table II. The mechanical properties of dual-phase steel for cold forming acc. to PN-EN 10346 [8]

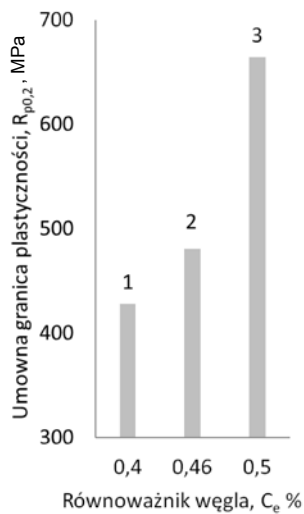
Oznaczenie		Właściwości mechaniczne		
Gatunek stali		Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie min. R_m , MPa	Wydłużenie min. $A_{80}^{a,b}$, %
Znak stali	Numer stali			
HCT450X	1.0937	260-340	450	27
HCT500X	1.0939	300-380	500	23
HCT600X	1.0941	340-420	600	20
HDT580X	1.0936	330-460	580	19
HCT780X	1.0943	450-560	780	14
HCT980X	1.0944	600-750	980	10

a – dla $t \leq 0,5$ mm wartość wydłużenia obniża się o 4%, dla $0,5 < t \leq 0,7$ mm obniża się o 2%.

b – dla powłok ZF wartość wydłużenia obniża się o 2%.

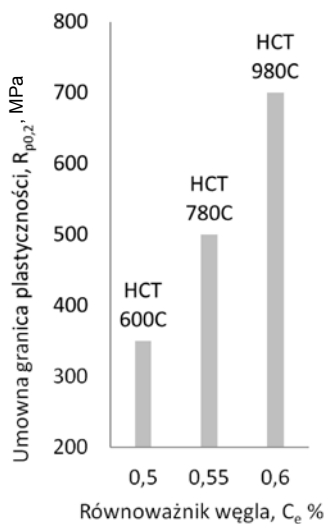
oraz stalami o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie np. S960Q (rys. 8).

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1)$$



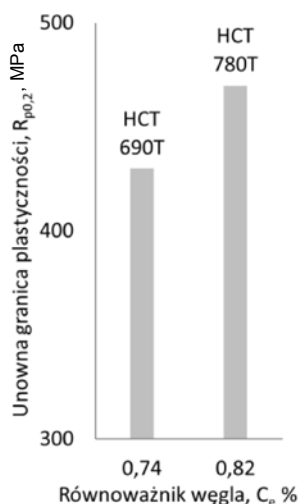
Rys. 2. Porównanie wartości równoważnika węgla C_e względem umownej granicy plastyczności R_{p0.2} dla stali dwufazowych DP; 1 – Litec 600DP, 2 – Litec 800DP, 3 – Litec 1000DP

Fig. 2. Comparison of the carbon equivalent C_e and yield strength R_{eH} for dual – phase steel; 1 – Litec 600DP, 2 – Litec 800DP, 3 – Litec 1000DP



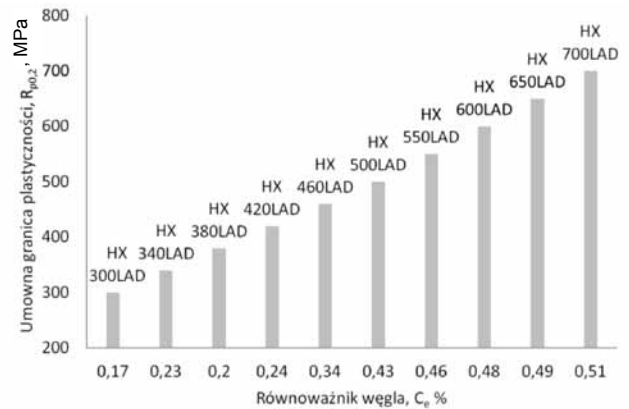
Rys. 3. Porównanie wartości równoważnika węgla C_e względem umownej granicy plastyczności R_{p0.2} dla stali wielofazowych CP

Fig. 3. Comparison of the carbon equivalent C_e and yield strength R_{eH} for complex phase steel



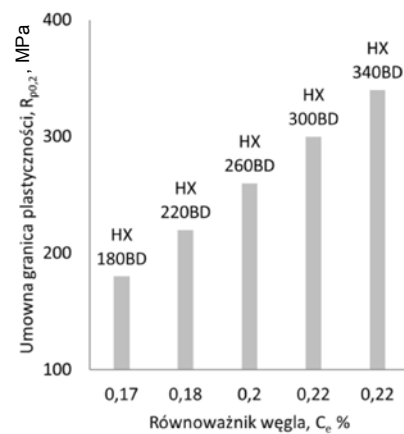
Rys. 4. Porównanie wartości równoważnika węgla C_e względem umownej granicy plastyczności R_{p0.2} dla stali typu TRIP (umacniane odkształceniem plastycznym)

Fig. 4. Comparison of the carbon equivalent C_e and yield strength R_{eH} for TRIP steel



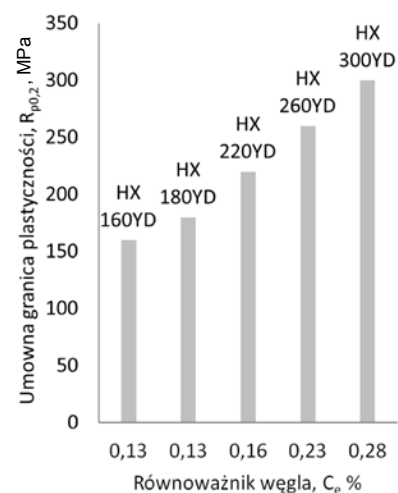
Rys. 5. Porównanie wartości równoważnika węgla C_e względem umownej granicy plastyczności R_{p0.2} dla stali niskostopowej/mikrostopowej LAD

Fig. 5. Comparison of the carbon equivalent C_e and yield strength R_{eH} for LAD steel



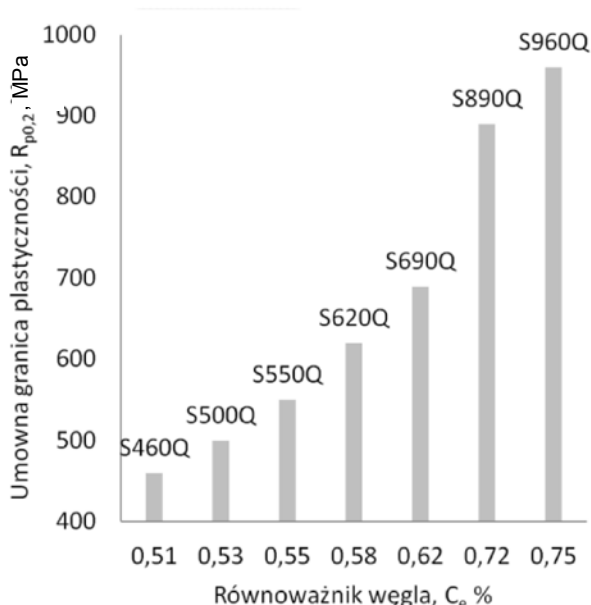
Rys. 6. Porównanie wartości równoważnika węgla C_e względem umownej granicy plastyczności R_{p0.2} dla stali utwardzanej niskotemperaturowo/stal bake-hardening BD

Fig. 6. Comparison of the carbon equivalent C_e and yield strength R_{eH} for bake-hardening steel



Rys. 7. Porównanie wartości równoważnika węgla C_e względem umownej granicy plastyczności R_{p0.2} dla stali tzw. IF bez atomów w położeniach międzywęzłowych YD

Fig. 7. Comparison of the carbon equivalent C_e and yield strength R_{eH} for IF steel



Rys. 8. Porównanie wartości równoważnika węgla C_e względem umownej granicy plastyczności R_{p0.2} dla stali o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie

Fig. 8. Comparison of the carbon equivalent C_e and yield strength R_{p0.2} for of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition steel

Stale dwufazowe DP, mając wyższą o 60÷90% granicę plastyczności od niestopowych stali konstrukcyjnych zwykłej jakości przeznaczonych do spawania cechują się umiarkowaną wartością równoważnika węgla C_e, sugerującą ich dobrą spawalność metalurgiczną.

Próby spawania stali DP

Badania wykonano w celu określenia wpływu metody łączenia TIG i PAW na parametry wytrzymałościowe złącza.

Badania spawalności przeprowadzono na stali Litec 600DP, Litec 800DP i Litec 1000DP firmy Ruukki, których skład chemiczny określony za pomocą spektrometru jarzeniowego LECO GDS 500A przedstawiono w tablicy III.

Stacynną próbę rozciągania zastosowanych do spawania blach o grubości 1,2 mm wykonano na maszynie Instron 5585H (tabl. IV). Przedstawiono uśrednione wartości z 3 próbek pobranych wzdłuż kierunku walcowania.

Fotografie mikrostruktury stali Litec 600DP, 800DP i 1000DP użytych do wykonania złącza spawanego przedstawiono odpowiednio na rysunkach 9÷11. Obserwację mikrostruktury prowadzono na zglądach metalograficznych trawionych 3% Nitałem przy zastosowaniu elektronowego mikroskopu skaningowego SEM JOEL JSM-6100. Objętość względną faz w mikrostrukturze określono za pomocą komputerowej analizy obrazu w systemie NIS Elements 3.1.

Porównaniu poddano przygotowane na I bez odstępów doczołowe złącza blach o grubości 1,2 mm spawane z pełnym przetopem bez materiału dodatkowego metodą TIG i PAW w pozycji podolnej. Jako gaz osłony stosowano Argon 5.0 wg PN-EN ISO 14175 [10]. Możliwymi do stosowania materiałami dodatkowymi są te, które są przeznaczone do spawania stali niskostopowych, np.: AWS A5.28 ER 100S-G, AWS A5.28 ER 11XS-X, AWS A5.28 ER 12XS-X, DIN SGNiMoCr2 wg PN-EN ISO 16834 [13]. Parametry spawania plazmowego (PAW) techniką z jeziorkiem

Tablica III. Skład chemiczny zastosowanych w badaniach stali dwufazowych Ruukki

Table III. The chemical composition used in the studies of dual-phase steel Ruukki

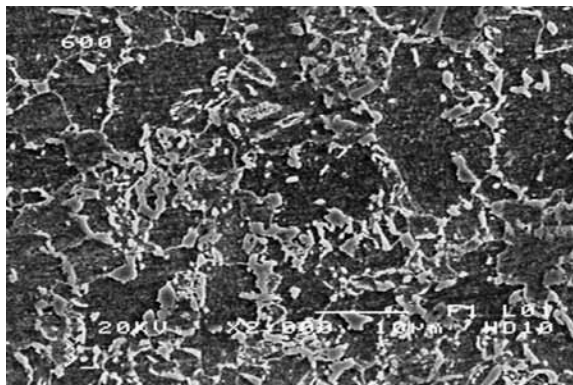
Oznaczenie			Skład chemiczny, % mas.									
Gatunek stali		Symbol rodzaju naniesionej powłoki	C	Si	Mn	P	S	Al całkowite	Cr+Mo	Nb+Ti	V	B
Znak stali	Znak stali											
Litec 600DP	HCT600X	Z140+M*	0,09	0,21	1,87	0,0065	0,00	0,0273	0,0058	0,0023	0,0063	0,001
Litec 800DP	HCT780X	Z140+M*	0,13	0,27	1,88	0,0046	0,00	0,0304	0,0087	0,0017	0,01	0,001
Litec 1000DP	HCT980X	Z140+M*	0,15	0,22	1,80	0,0067	0,00	0,0292	0,176	0,0041	0,0118	0,001

* Oznaczenie M odnosi się do wykonanej powłoki, w tym przypadku określa powłokę cynkową Z z „Małym kwiatem cynkowym”

Tablica IV. Właściwości mechaniczne zastosowanych w badaniach stali dwufazowych Ruukki, wg badań własnych

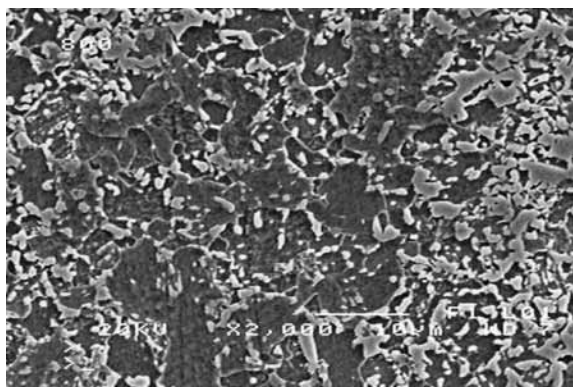
Table IV. The mechanical properties used in the studies of dual-phase steel Ruukki, acc. to the own research

Oznaczenie		Właściwości mechaniczne		
Gatunek stali		Umowna granica plastyczności R _{p0.2} , MPa	Wytrzymałość na rozciąganie R _m , MPa	Wydłużenie A ₈₀ , %
Znak stali	Znak stali			
Litec 600DP	HCT600X	428-448	694	22
Litec 800DP	HCT780X	481-488	845	16
Litec 1000DP	HCT980X	664-675	1030	11



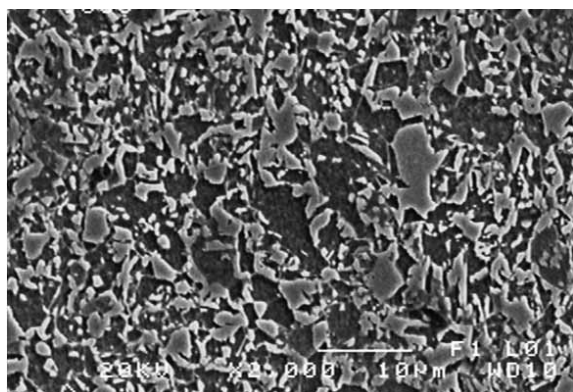
Rys. 9. Mikrostruktura stali 600DP. Objętość względna: ferrytu ~66%, martenzytu ~33%, austenitu szczątkowego ~1%

Fig. 9. Microstructure of steel 600DP. The relative volume of: ferrite ~ 66%, martensite ~ 33% and retained austenite ~1%



Rys. 10. Mikrostruktura stali 800DP. Objętość względna: ferrytu ~55%, martenzytu ~44%, austenitu szczątkowego ~1%

Fig. 10. Microstructure of steel 800DP. The relative volume of: ferrite ~ 55%, martensite ~ 44% and retained austenite ~1%



Rys. 11. Mikrostruktura stali 1000DP. Objętość względna: ferrytu ~41%, martenzytu wysepkowego ~58%, austenitu szczątkowego ~1%

Fig. 11. Microstructure of steel 1000DP. The relative volume of: ferrite ~ 41%, martensite ~ 58% and retained austenite ~1%

Tablica V. Parametry spawania plazmowego PAW

Table V. PAW welding parameters

Rodzaj i natężenie prądu, A	30 DC(-)
Napięcie łuku, V	68,6
Prędkość spawania, mm/s	2
Natężenie przepływu gazu plazmowego, l/min	0,3±0,5
Natężenie przepływu gazu ochronnego, l/min	4+6
Rodzaj i średnica elektrody wolframowej, mm	d 1,0, W + Th
Kształt i wymiary dyszy plazmowej, mm	d 11

Tablica VI. Parametry spawania TIG

Table VI. TIG welding parameters

Rodzaj i natężenie prądu, A	30 DC(-)
Napięcie łuku, V	11,5
Prędkość spawania, mm/s	3
Natężenie przepływu gazu ochronnego, l/min	4+6
Rodzaj i średnica elektrody wolframowej, mm	d 1,6 W + Th

spoiny urządzeniem EWM Microplasma 50 zawarto w tablicy V, natomiast spawania elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego na urządzeniu ESAB Origo TA24 (TIG) w tablicy VI.

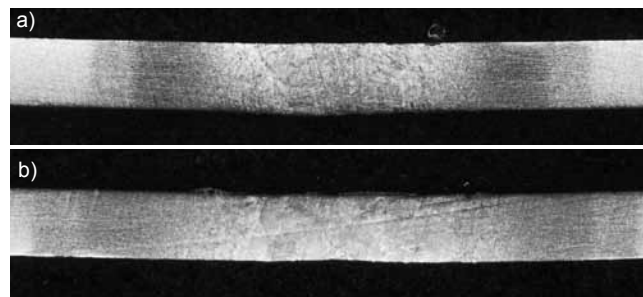
Badania złączy

Ocenę złączy przeprowadzono na podstawie:

- badań nieniszczących wg PN-EN 571-1 [12],
- badań makro- i mikroskopowych wg PN-EN 1321 [9],
- statycznej próby rozciągania wg PN-EN ISO 4136 [14]
- badań mikrotwardości metodą Vickersa wg PN-EN ISO 9015-2 [15].

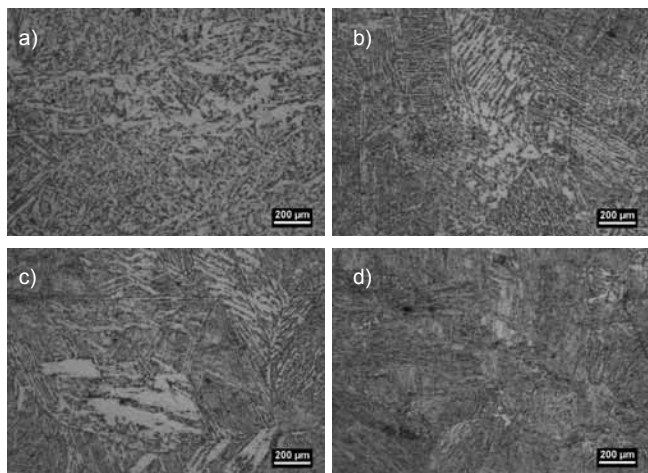
Badania penetracyjne wg PN-EN 571-1 [12] nie wykazały niezgodności – połączenia zakwalifikowano do poziomu akceptacji 1.

Wynik badań makroskopowych przedstawiono na przykładzie złącza spawanego wykonanego ze stali Litec 600DP na rysunku 12. W wyniku przeprowadzonych badań mikroskopowych zaobserwowano strukturę martenzytyczną w obszarze strefy wpływu ciepła. Przemiana martenzytyczna jest wynikiem dużej szybkości chłodzenia, która przechładza austenit do temperatury przemiany martenzytycznej Ms. W przypadku stali dwufazowych zawartość węgla jest niska (maksymalnie 0,23% dla stali HCT980X), a wraz ze spadkiem udziału węgla temperatura początku przemiany martenzytycznej wzrasta (dla stali Litec 600DP 0,09%C, Ms = 440°C) i dla zawartości węgla 0,23% wynosi ok. 390°C [5]. Cienkościenne połączenia wykonane z blach o grubości 1,2 mm oddają szybko ciepło, a złożony skład chemiczny dodatkowo zwiększa



Rys. 12. Połączenie spawane ze stali Litec 600DP: a) spawane metodą PAW, b) spawane metodą TIG.

Fig. 12. Macrostructure of Litec 600DP steel joints: a) PAW welded, b) TIG welded.



Rys. 13. Mikrostruktura złączy spawanych stali Litec 1000DP: a) spoina złącza spawanego metodą PAW (struktura ferrytyczno-perlityczna o cechach struktury Widmannstättena) b) SWC złącza spawanego metodą PAW c) spoina złącza spawanego metodą TIG (struktura Widmannstättena z wydzieleniami martenzytu) d) SWC złącza spawanego metodą TIG (gruboiglasty martenzyt)

Fig. 13. Microstructure of welded joints of Litec 1000DP steel: a) weld in PAW joint (ferritic – pearlitic structure with Widmannstätten features), b) HAZ in PAW joint, c) weld in TIG joint (Widmannstätten structure with isolated martensite), d) HAZ in TIG joint (coarse and acicular crystals of martensite)

Tablica VII. Wyniki badań statycznej próby rozciągania złączy spawanych

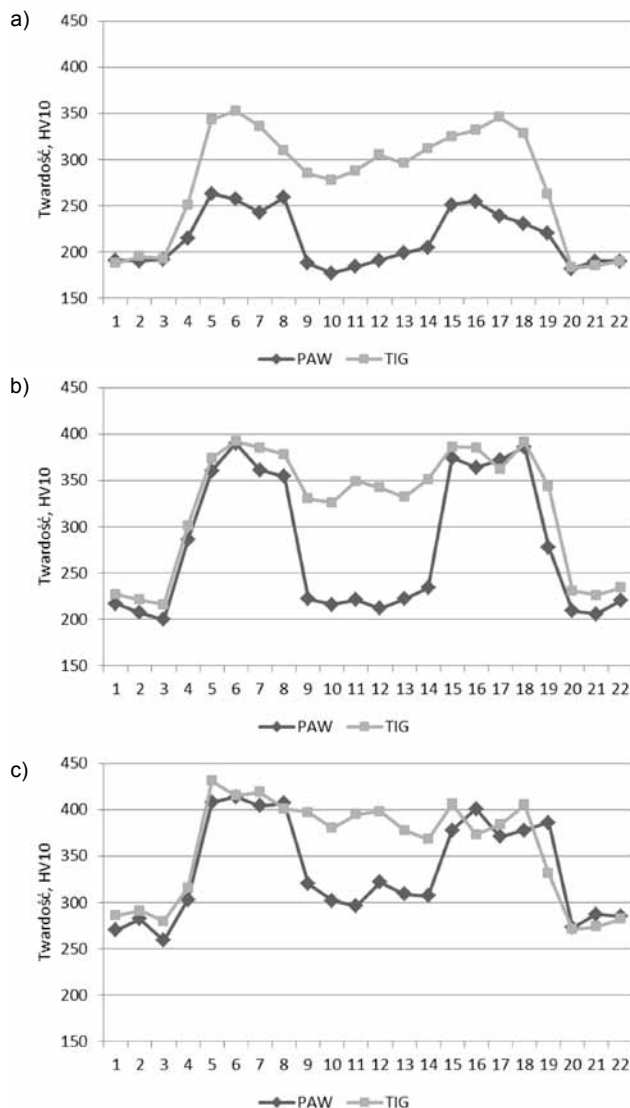
Table VII. The results of the static tensile test of welded joints

Oznaczenie		Właściwości mechaniczne	
Gatunek stali		Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa
Znak stali	Metoda spawania		
Litec 600DP	PAW	377-405	615
Litec 800DP	PAW	461-484	820
Litec 1000DP	PAW	636-647	1009
Litec 600DP	TIG	371-384	607
Litec 800DP	TIG	456-469	806
Litec 1000DP	TIG	611-627	1002

hartowność, co przyczynia się do powstania struktury martenzytycznej. Przykładowe, obserwowane mikrostruktury przedstawiono na rysunku 13.

Wyniki statycznej próby rozciągania złączy zawarto w tablicy VII. Obserwowany jest wzrost wytrzymałości złącza spawanego wraz ze wzrostem wytrzymałości na rozciąganie materiału rodzimego.

Wyniki pomiarów twardości HV10 złączy spawanych przedstawiono na rysunku 14. Wzrost twardości złącza spawanego ze stali Litec 1000DP do poziomu 431 HV10



Rys. 14. Wyniki pomiarów twardości HV10 złączy spawanych a) ze stali Litec 600 DP, b) ze stali Litec 800 DP, c) ze stali Litec 1000 DP

Fig. 14. Results of HV10 hardness measurement for welded joints of: a) Litec 600 DP steel, b) Litec 800 DP steel, c) Litec 1000 DP steel

wskazuje na konieczność zmniejszenia szybkości chłodzenia po spawaniu. Stal ta zawiera największą ilość mikrododatków stopowych, co może powodować podhartowania w strefie wpływu ciepła. Złącza wykonane metodą TIG charakteryzowały się wyższą twardością HV10 w spoinie niżeli spoiny w złączach wykonane metodą PAW. Zwiększona temperatura łuku plazmowego oraz koncentracja wiązki powoduje, że po spawaniu złącze stygnie z mniejszą prędkością niż w przypadku spawania TIG, gdzie występuje mniejsza gęstość energii (rys. 12).

Podsumowanie

Dwufazowe stale zaliczane do grupy stali o wysokiej wytrzymałości, mając wyższą granicę plastyczności od niestopowych stali konstrukcyjnych zwykłej jakości przeznaczonych do spawania, cechują się umiarkowaną wartością równoważnika węgla C_e ,

kąta która może wskazywać na ich dobrą spawalność metalurgiczną.

Zastosowanie natężenia prądu spawania na poziomie 30÷35 A w metodzie TIG do łączenia blach ze stali DP o grubości 1,2 mm bez materiału

dotychczasowego umożliwiła uzyskanie pełnego przetopu i wymaganej wartości umownej granicy plastyczności i wytrzymałości. Z kolei wysoka jakość stali DP (niska zawartość węgla, siarki i fosforu) ma wpływ na niską wadliwość złączy.

W strefie wpływu ciepła zaobserwowano wzrost twardości ponad 350 HV₁₀, nawet do 440 HV₁₀. Dopuszczalna graniczna wartość twardości w strefie wpływu ciepła złącza stali DP wg PN-EN 15614-1 [16]

wynosi 450 HV. Zmniejszenie energii liniowej spawania powinno wpłynąć na ograniczenie tej wartości.

Wzrost objętości względnej martenzytu w strefie wpływu ciepła w wyniku spawania stanowiący przyczynę wzrostu twardości w mikroobszarach jest efektem małej pojemności cieplnej blach o niewielkiej grubości i przez to dużej prędkości chłodzenia złącza po spawaniu.

Literatura

- [1] Baryliszyn P., Janus K., Noack T., Nowacki J.: Neuartiges Konzept zur Schweißparameterregelung beim widerstandspunktschweißen, *Przegląd Spawalnictwa* 11/2011, s 21-28.
- [2] Bhadeshia H.K.D.H.: Application of Phase Transformation Theory to Welding, POSCO Lectures, 16th February 2008.
- [3] Hofmann H., Mattissen D., Schaumann T. W.: Advanced cold rolled steels for automotive applications, *Steel Research International*, Issue 1/2009 717.
- [4] Konspekt Ruukki, *Welding of dual phase steels*, 2012.
- [5] Krajewski S., Nowacki J.: Modelowanie właściwości dwufazowych stali DP z zastosowaniem sztucznej inteligencji, *Inżynieria Materiałowa* 6/2012.
- [6] Lis A.K., Gajda B.: Modeling of the DP and TRIP microstructure in the CMnAlSi automotive steel, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 15, Issue 1-2, 2006.
- [7] Miernik K., Bogucki R., Pytel S.: Wpływ temperatury hartowania na mikrostrukturę i własności mechaniczne stali DP. *Czasopismo Techniczne – Mechanika*, (2-M/2009 Zeszyt 6), (2009).
- [8] PN-EN 10346:2011 Wyroby płaskie stalowe powlekane ogniowo w sposób ciągły. Warunki techniczne dostawy.
- [9] PN-EN 1321:2000 Spawalnictwo. Badania niszczące metalowych złączy spawanych. Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych.
- [10] PN-EN 14175:2009 Materiały dodatkowe do spawania – Gazy i mieszane gazów do spawania i procesów pokrewnych.
- [11] PN-EN 15614-1: Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Badanie Technologii spawania. Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu.
- [12] PN-EN 571-1:1999 Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Zasady ogólne.
- [13] PN-EN ISO 16834:2012 pt. Materiały dodatkowe do spawania – Druty elektrodowe, druty, pręty i stopiwa do spawania łukowego w osłonie gazu stali o wysokiej wytrzymałości – Klasyfikacja.
- [14] PN-EN ISO 4136:2011 Badania niszczące złączy spawanych metali – Próba rozciągania próbek poprzecznych.
- [15] PN-EN ISO 9015-2:2011 Badania niszczące złączy spawanych metali – Badanie twardości – Część 2: Badanie mikro-twardości złączy spawanych łukowo.
- [16] Yi H. L., Lee K. Y., Bhadeshia H. K. D. H.: Stabilisation of ferrite in hot rolled δ-TRIP steel, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 2/2011 528.

Podziękowanie

Praca została zrealizowana w ramach poddziałania 8.2.2 „Regionalne Strategie Innowacji”, Działania 8.2 „Transfer wiedzy” Priorytet VIII „Regionalne Kadry Gospodarki” POKL woj. lubuskie „Stypendia naukowe dla doktorantów kształcących się na kierunkach uznanych za szczególnie istotne z punktu widzenia rozwoju województwa lubuskiego”.