

Ocena możliwości spawania stali wysokowytrzymałych ulepszanych cieplnie

Evaluation of weldability of non-alloy high strength heat-treated steel

Streszczenie

W artykule przedstawiono ocenę możliwości wykonania doczołowych złączy spawanych niestopowej stali o wysokiej wytrzymałości przy wykorzystaniu zrobotyzowanego stanowiska do spawania wiązką lasera. W oparciu o badania mikrostruktury i pomiary twardości doczołowego złącza spawanego zidentyfikowano istotne czynniki wpływające na możliwość zastosowania tej technologii dla łączenia stali ulepszanych cieplnie o wysokiej wytrzymałości.

Słowa kluczowe: stal o wysokiej wytrzymałości; spawanie laserowe; robotyzacja

Abstract

The paper presents evaluation of weldability of non-alloy high strength heat-treated steel with the use of robotic station for laser welding. Based on the microstructure assessment and hardness distribution in butt welded joint, the key factors and properties for use of such welding technology are identified.

Keywords: high-strength heat-treated steels; laser welding; robotics

Wstęp

Wśród obecnie dostępnych stali konstrukcyjnych można wyróżnić m.in. stale ulepszone cieplnie. Wśród tych stali wg np. PN-EN 10025-6 dostępne są stale o gwarantowanej granicy plastyczności do 960 MPa. Z kolei w ofercie wytwórców stali np. SSAB, czy ThyssenKrupp znaleźć można stale o jeszcze wyższej wytrzymałości np. S1100, czy S1300. Stale te jednak charakteryzują się ograniczoną spawalnością, co wynika z wielu czynników. W odniesieniu do łukowych metod spawania obserwowany jest m.in. brak odpowiednich materiałów dodatkowych lub negatywny wpływ cieplnego cyklu spawalniczego na właściwości mechaniczne.

Analizując stan dostawy, tj. po ulepszeniu cieplnym można spodziewać się twardych struktur np. martenzytycznej, czy martenzytyczno-bainitycznej. Powoduje to, z jednej strony ograniczenie możliwości w zakresie obróbki skrawaniem podczas przygotowywania brzegów do spawania, a z drugiej negatywny wpływ oddziaływania ciepła. Wprowadzenie do stali zbyt dużej ilości ciepła powoduje jej odpuszczenie. Ciepło może być wprowadzone podczas spawania lub na skutek operacji cieplnych (zastosowanie zbyt wysokiej temperatury) podczas eksploatacji. Wówczas może dojść do znacznego obniżenia właściwości mechanicznych w wyniku odpuszczenia, a zatem i właściwości eksploatacyjnych wyrobu. Wskazuje to zatem, że kluczowym dla procesu spawania jest odpowiednie sterowanie ilością ciepła wprowadzonego

do materiału. Poprzez „odpowiednie sterowanie” należy tu rozumieć wprowadzanie na tyle dużej ilości ciepła, aby następowało topienie łączonych brzegów i tworzenie, po krystalizacji, spoiny przy zapewnieniu pełnego wtopienia, a na tyle małe, aby nie następowało odpuszczenie [2].

Mając na uwadze powyżej wskazane trudności, przeprowadzono próby spawania stali konstrukcyjnej ulepszonej cieplnie o granicy plastyczności 1300 MPa. Proces spawania prowadzono na zrobotyzowanym stanowisku spawalniczym. W artykule przedstawiono wyniki badań mikrostruktury przeprowadzone z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej. Dodatkowo, dla uzyskania informacji o zmianie właściwości mechanicznych w SWC przeprowadzono pomiary twardości metodą Vickers'a.

Schemat stanowiska do spawania wiązką laserową

W celu uzyskania wymaganych wydajności proces spawania prowadzony był z wykorzystaniem stanowiska zrobotyzowanego. Do spawania wykorzystano źródło laserowe IPG Photonics o mocy 6 kW zamontowane na ramieniu

Dr inż. Lechosław Tuz – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, mgr inż. Krzysztof Sulikowski – Roboty Przemysłowe Sp. o.o.

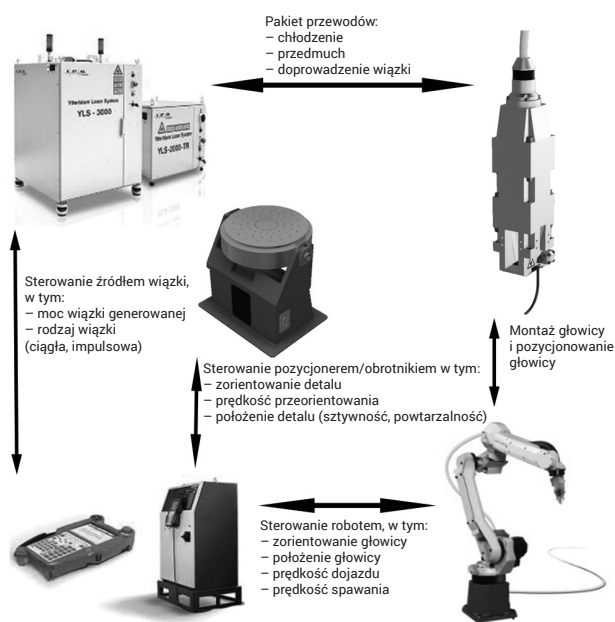
Autor korespondencyjny/Corresponding author: ltuz@agh.edu.pl

robota firmy Fanuc. Sterownie parametrami spawania realizowane było za pomocą układu sterowania robota. Dodatkowo stanowisko wyposażone było w laserowy układ śledzenia rowka. System ten wykorzystywany był do szybkiego programowania trajektorii spawania. Na rysunku 1 przedstawiono schemat połączenia poszczególnych elementów stanowiska, a na rysunku 2 model przykładowej celi spawalniczej. Cechą charakterystyczną takiej celi jest szczelne odgródnienie od otoczenia w celu uniknięcia zagrożenia utraty zdrowia i życia w wyniku działania promieniowania odbitego.

Wykorzystanie ramienia robota spawalniczego jako manipulatora ramieniem spawalniczym umożliwia szybkie, dokładne i powtarzalne przemieszczanie głowicy laserowej wzdłuż łączonych brzegów (rys. 3). Daje to możliwość wykonywania precyzyjnych połączeń zarówno w cienkościennych elementach, jak i znacznie grubszych konstrukcjach. Dodatkowo wykorzystanie wiązki laserowej pozwala na prowadzenie procesu spawania bezdotykowo, a przy wykorzystaniu odpowiednich układów optycznych odległość głowicy od spawanego elementu może wynosić nawet kilkaset milimetrów. Z kolei wykorzystanie systemów komputerowego wspomaganie procesów technologicznych, gdzie zdefiniowane są wszystkie elementy stanowiska, pozwala przeprowadzić szybkie projektowanie trajektorii spawania i wstępnie zweryfikować poprawność stosowanego oprzyrządowania (na etapie projektu, a nie prób spawania).

Materiał do badań

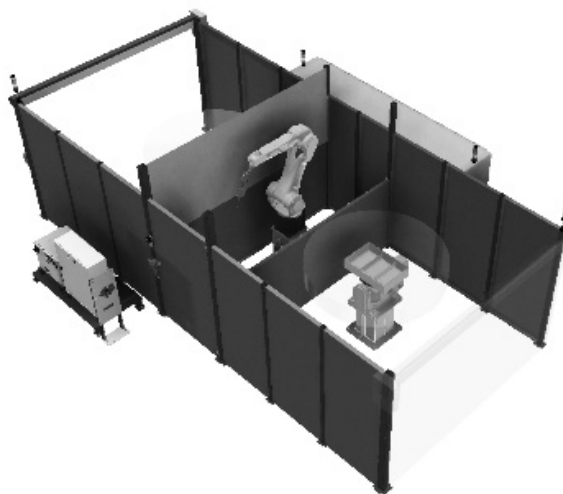
Materiałem do badań były blachy o grubości 4 mm ze stali o granicy plastyczności 1300 MPa o składzie chemicznym i wybranych właściwościach mechanicznych zawartych



Rys. 1. Schemat integracji elementów stanowiska zrobotyzowanego spawania wiązką laserową

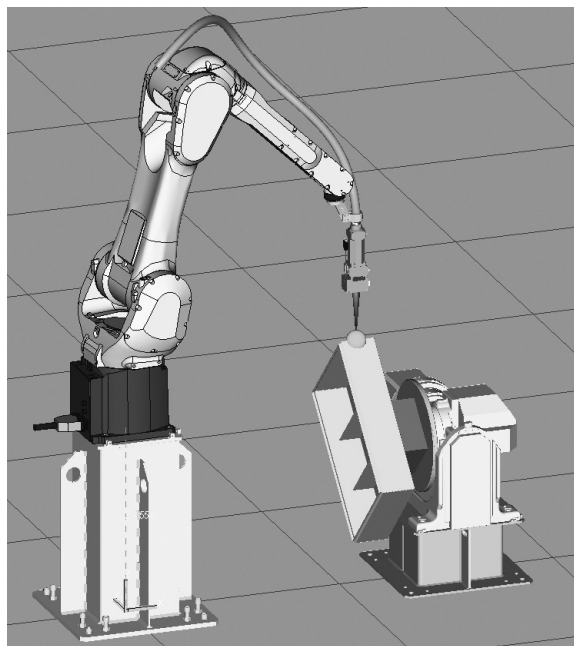
Fig. 1. Scheme of key elements for laser welding station

w tabelcy I. Blachy do spawania wycinano strumieniowosciernie, a następnie oczyszczono z pozostałości rdzy i innych zabrudzeń. Tak przygotowane elementy zestawiono ciętymi brzegami i połączone spoinami szczelnymi na końcach. Proces spawania przeprowadzono prędkością 2 m/min przy mocy wiązki 4 kW. W wyniku procesu spawania uzyskano złącze doczołowe z pełnym wtopieniem i równomierną regularną grania.



Rys. 2. Przykładowa celi spawalnicza do spawania wiązką laserową – model w środowisku RoboGuide. Stanowisko dwustronne z przesuwającą kurtyną wyposażone w 2-osiowy pozycjoner

Fig. 2. Example of laser welding station with the use of robot – designed with Roboguide software



Rys. 3. Przykład modelowania procesu technologicznego spawania dla stanowiska do spawania wiązką laserową wyposażonego w robot spawalniczy zintegrowany z pozycjonerem 2-osiowym. Na pozycjonerze zamontowany detal – obudowa

Fig. 3. Example of the welding process design for laser welding station with robot and 2-axis manipulator

Tabela I. Skład chemiczny i wybrane właściwości mechaniczne stali S1300QL wg SSAB i Thyssen Krupp, analiza wytopowa, % wag.

Table I. Chemical composition and selected mechanical properties of S1300QL steel acc. to SSAB and ThyssenKrupp data sheet, % wt.

C	Si	Mn	Cr	Ti	Ni	Mo	Nb	V	Cu	S	N	P	B
≤0,25	≤0,50	≤1,40	≤0,80	0,02	≤2,00	≤0,70	0,04	≤0,08	0,10	max 0,005	max 0,006	0,01 ±0,02 (≤0,015)	max 0,005
Granica plastyczności, R_{eH} [MPa]				Wytrzymałość na rozciąganie, R_m [MPa]					Wydłużenie, A [%]				
1300				1400÷1700					8				

Ocena wizualna i badania makroskopowe

Ocenę wizualną złącza spawanego przeprowadzono w oparciu o PN-EN ISO 17637 stosując wymagania poziomu jakości B wg PN-EN ISO 13919-1. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe lico spoiny (a) oraz przekrój poprzeczny złącza spawanego (b). Lico i grań mają regularny kształt. W badaniach makroskopowych widoczne jest obustronne niewielkie zapadnięcie lica mogące stanowić karb w przypadku pracy zmęczeniowej. Spoina charakteryzuje się symetrycznym kształtem i równomierną szerokością (ok. 0,65 mm). Współczynnik kształtu złącza b/h wynosi ok. 0,16. Szerokość strefy wpływu ciepła nagrzanej powyżej A_{c1} nie przekracza 0,3 mm i jest wyraźnie zarysowana. W odległości do ok. 1 mm obserwowano odmienne zachowanie się stali podczas trawienia. Wskazuje to, że poza „klasyczną SWC”, tj. w obszarze nagrzania poniżej A_{c1} następuje zmiana właściwości będąca skutkiem oddziaływania cieplnego.

Badania mikroskopowe

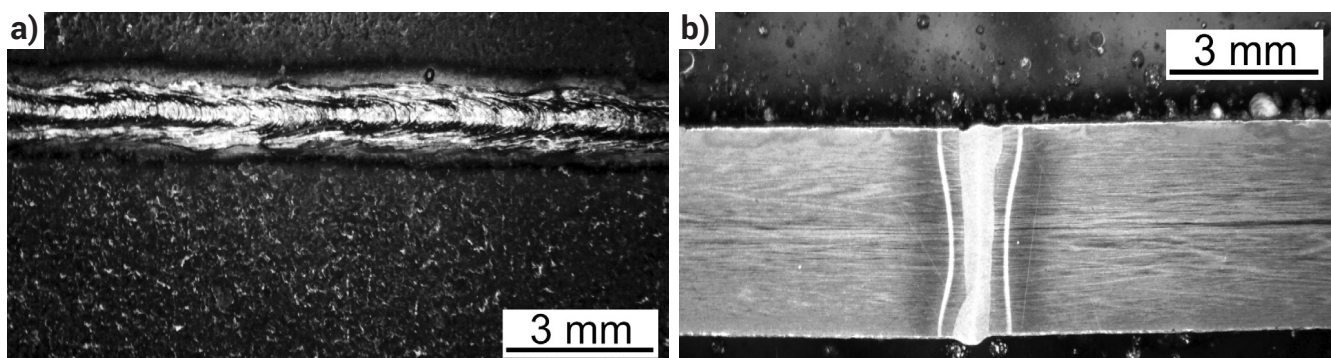
Materiał rodzimy charakteryzuje się drobnoziarnistą strukturą martenzytyczną z dyspersyjnymi wydzieleniami węglków i węglikoazotków występującymi na granicach listew martenzytu i w ich wnętrzu. Obecność tych wydzieleni wynika ze składu chemicznego stali i jest skutkiem dodatku V i Nb.

Złącze spawane w obszarze SWC charakteryzuje się trzema wyraźnymi strefami: przegrzania, normalizacji i bardzo wąskiej częściowego przekrystalizowania. W tych obszarach obserwowana jest struktura martenzytyczna. W obszarze

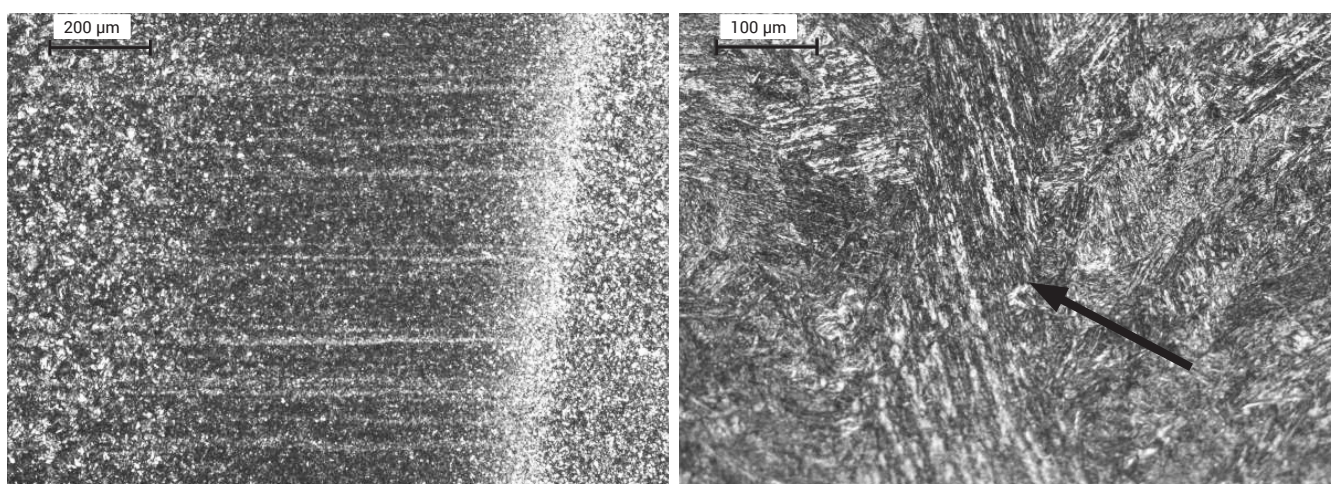
nagrzonym w zakresie $A_{c1}+A_{c3}$ (obszar częściowego przekrystalizowania) obserwowane są jasne pola świeżego martenzytu na tle ciemnej trawiącej się struktury wysokoodpuszczonego martenzytu. W obszarze przegrzania, tuż przy linii wtopienia, następuje nieznaczny rozrost ziarna.

W obszarze poniżej A_{c1} o szerokości do 1 mm, na skutek obecności wydzieleni węglków i węglikoazotków na granicach byłego austenitu, ujawniają się te granice. Dodatkowo za strefą częściowego przekrystalizowania obserwowane jest pojawienie się jasnych obszarów wynikających z odpuszczania i tworzenia się podziaren. W obszarze przegrzania następuje nieznaczny rozrost ziarna.

W spoinie obserwowana jest struktura martenzytyczna, przy czym kryształy kolumnowe ułożone są od linii wtopienia do osi spoiny. Wynika to z małej szerokości spoiny i szybkiego odprowadzenia ciepła do materiału rodzimego. W osi spoiny obserwowane jest zjawisko transkryształizacji, czyli zachowania kierunku wzrostu kryształów kolumnowych do osi spoiny na całej jej długości. Ze względu na dużą czystość stali (niską zawartość S i P) w obszarze styku kryształów nie obserwuje się pasma zanieczyszczeń. W stalach niestopowych o wytrzymałości do 355 MPa, w tym obszarze następuje wypychanie domieszek przez rosnące kryształy kolumnowe w wyniku czego następuje obniżenie temperatury krzepnięcia i strefa kryształów zamrożonych. Można zatem oczekiwać, że w tym obszarze przy obniżonej energii linowej spawania tworzyć się może strefa dendrytów równoosiowych o przypadkowej orientacji. Przykładowe mikrostruktury przedstawiono na rysunku 5 wraz z ich charakterystyką.



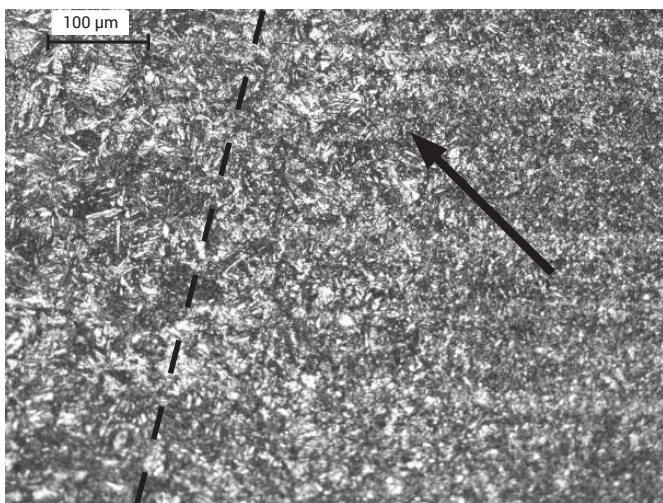
Rys. 4. Widok lica spoiny (a) i makrostruktura w przekroju poprzecznym złącza (b)
Fig. 4. Face of weld (a) and macrostructure in the cross-section of butt-welded joint (b)



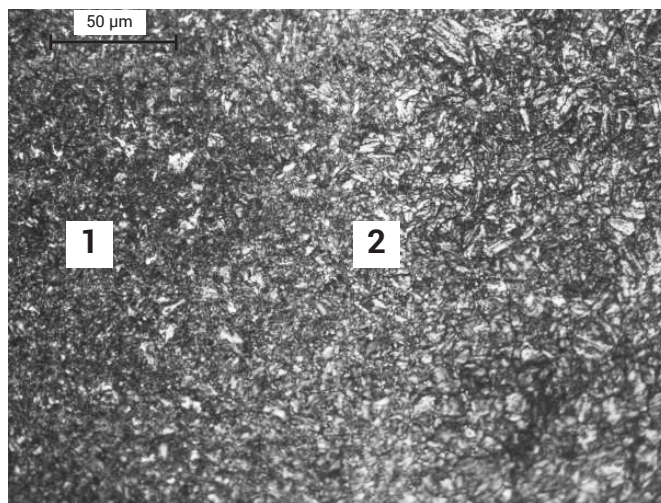
SWC – widok mikroskopowy. Zarysowana pasmowość struktury. Widoczne charakterystyczne obszary SWC (od lewej): spoina, linia wtopienia, strefa przegrzania, normalizacji i częściowego przekrystalizowania

Spoina – strefa transkryształizacji w osi spoiny. Budowa grubokryształiczna. Struktura martenzytyczna – martenzyt listwowy

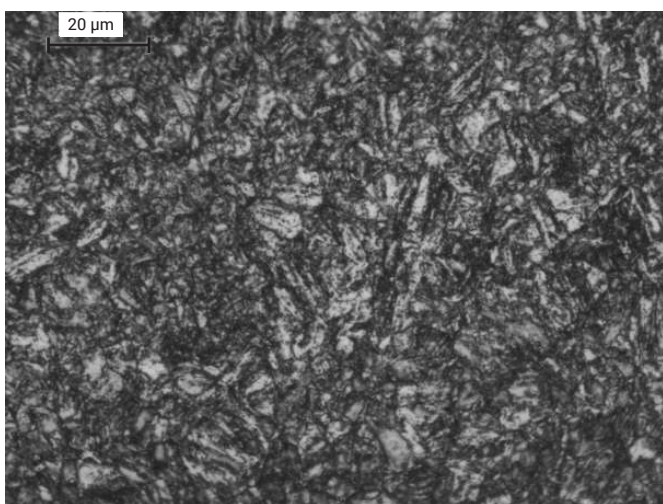
Część I Rys. 5. Mikrostruktura złącza spawanego, trawienie 4% nital (opisy pod zdjęciami)
Part I Fig. 5. Microstructure of butt-welded joint, 4% nital etched



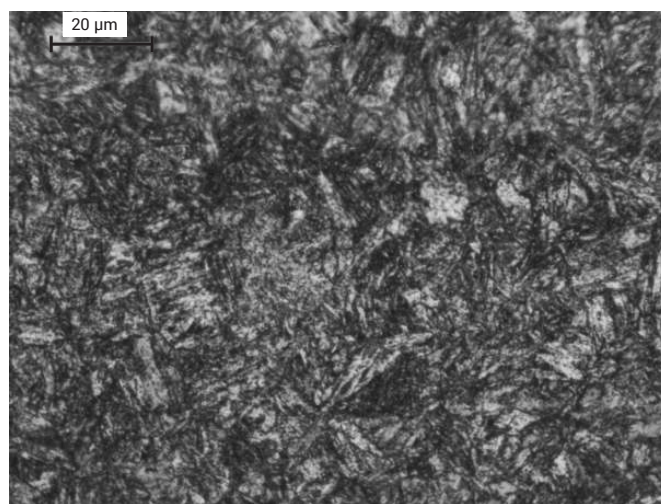
Obszar przy linii wtopienia z widocznym obszarem przegrzania



Obszar normalizowania (1) i częściowego przekryształizowania (2)



Strefa wysoko odpuszczonego martenzytu nagrzanego do temperatury poniżej A_{c1} (widoczne granice byłego austenitu)



Materiał rodzimy – struktura martenzytu odpuszczonego

Cześć II Rys. 5. Mikrostruktura złącza spawanego, trawienie 4% nital (opisy pod zdjęciami)

Part II Fig. 5. Microstructure of butt-welded joint, 4% nital etched

Pomiary twardości

Pomiary twardości wykonano metodą Vickers'a przy obciążeniu węgelnika 1 kG. Pomiary wykonywano wzdłuż linii pomiarowej w środku grubości złącza od SWC, przez spoinę i SWC po przeciwnej stronie do materiału rodzimego. Rozkład twardości wskazuje, że w obszarze SWC następuje wzrost twardości do 440 HV1 ($R_m = 1462$ MPa). Po stronie materiału rodzimego, za obszarem częściowego przekryształizowania obserwowany jest znaczny spadek twardości do ok. 320 HV1

($R_m = 1006$ MPa). W materiale rodzimym twardość wynosi ok. 430 HV1 ($R_m = 1405$ MPa). Wskazuje to, że w wyniku procesu spawania wiązką laserową następuje zmękczenie materiału – strefa zmękczenia. Strefa ta ma stosunkowo niewielką szerokość – ok. $0,6 \pm 0,8$ mm, co powoduje, że w przypadku statycznego rozciągania, obszar ten pomimo niższej wytrzymałości na rozciąganie, nie wpływa na wytrzymałość całego złącza spawanego.

Podsumowanie

Przeprowadzone próby spawania wskazują, że możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości złączy spawanych stali wysokowytrzymałej o gwarantowanej granicy plastyczności 1300 MPa przy wykorzystaniu wiązki laserowej bez dodatku materiału dodatkowego. Brak zastosowania materiału dodatkowego wymaga dokładnego przygotowania brzegów do spawania dla zapewnienia równoległości brzegów łączonych przy możliwie wąskiej szczelinie (poniżej 0,1 mm), co powoduje, że uzyskiwane jest lekko wypukłe lico i grań spoiny.

Oddziaływanie szybkiego cyklu cieplnego i lokalnego oddziaływania wysokiej temperatury powoduje, że uzyskiwane spoiny i SWC są bardzo wąskie, a szybkie odprowadzanie ciepła umożliwia zajście zjawiska transkryształizacji. Niska zawartość domieszek powoduje, że w osi spoiny nie występuje obszar nagromadzenia zanieczyszczeń wpływających na skłonność

do pęknięć podczas spawania. Co więcej, mimo spadku twardości w SWC (strefa zmiękczenia) nie następuje utrata właściwości mechanicznych złącza spawanego (wytrzymałości doraźnej). Można jednak przypuszczać, że może to wpływać na wytrzymałość zmęczeniową. W obszarze złącza spawanego obserwowana jest struktura martenzytyczna o budowie martenzytu listwowego.

Praca realizowana w ramach projektu pt.: „Opracowanie i wdrożenie innowacyjnej, wysokowydajnej technologii łączenia stali wysokowytrzymałej o granicy plastyczności 1300 MPa wiązką laserową z wykorzystaniem zrobotyzowanego stanowiska” POIR.01.01.01-00-1072/15.



Literatura

- [1] Tasak E.: Metalurgia spawania, Wydawnictwo JAK, Kraków 2008.
 - [2] Tasak E., Ziewiec A.: Spawalność materiałów konstrukcyjnych Tom 1. Spawalność stali, Wydawnictwo JAK, Kraków 2009.
 - [3] PN-EN ISO 17637 Badania nieniszczące złączy spawanych – Badania wizualne złączy spawanych
 - [4] PN-EN ISO 13919-1 Spawanie – Złącza spawane wiązką elektronów i wiązką promieniowania laserowego –Wytyczne do określania poziomów jakości według niezgodności spawalniczych – Część 1: Stal
 - [5] PN-EN 10025-6 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 6: Warunki techniczne dostawy wyrobów płaskich o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie
-