

Osobliwości przekształceń strukturalnych w strefie wpływu ciepła złączy spawanych MAG stali wysokowytrzymałej WELDOX 1300

Features of structural transformation in metals HAZ high-strength steel WELDOX 1300 performed by MAG welding

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości struktury w metalu strefy wpływu ciepła stali konstrukcyjnej wysokowytrzymałej typu WELDOX 1300 wykonane metodą MAG. Opracowano wykresy CTPC-s, ustalono i opisano przyczyny obniżenia właściwości mechanicznych połączeń spawanych stali WELDOX 1300.

Słowa kluczowe: spawanie MAG, mikrostruktura, bainit, martenzyt, pęknięcia zimne, Weldox

Abstract

The article studied the features of the formation of structure in the HAZ metal high-strength structural steel WELDOX 1300, made by MAG welding, built thermokinetic diagram decomposition of austenite (CCT diagram) and installed reason for the decline of the mechanical properties of welded joints in steel WELDOX 1300.

Keywords: MAG welding, microstructure, Weldox, cold cracks

Wstęp

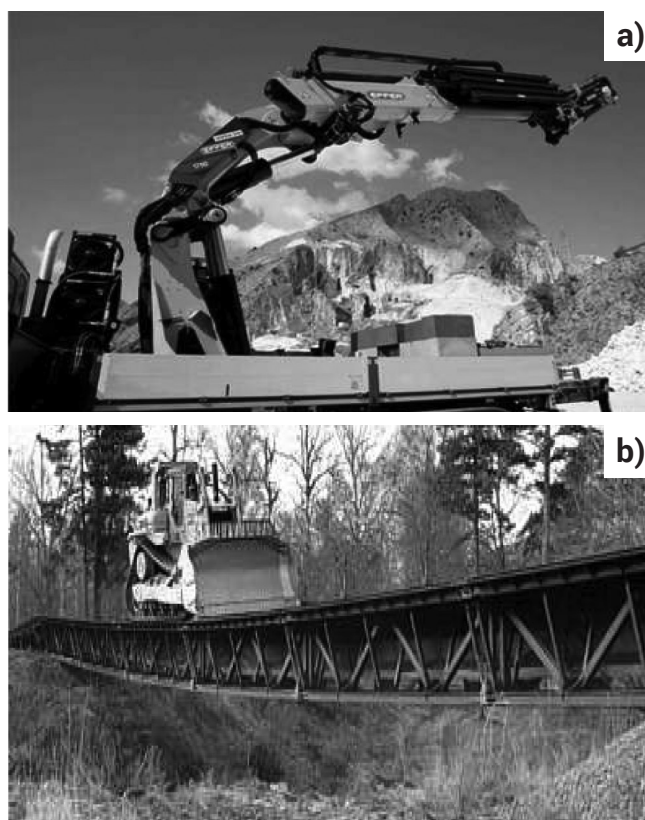
Jednym z głównych problemów rozwoju współczesnej budowy maszyn jest poprawa wskaźników techniczno-ekonomicznych maszyn, mechanizmów i konstrukcji inżynierskich polegająca na obniżeniu ich materiałochłonności, podwyższeniu bezpieczeństwa eksploatacji i trwałości. W rozwiązaniu tego problemu ważną rolę mogą odegrać nowe stale konstrukcyjne wysokowytrzymałe ($Re > 1000$ MPa).

Zapotrzebowanie na stal z wysokimi wskaźnikami wytrzymałościowymi do pewnego stopnia jest związana z wytwarzaniem konstrukcji lądowych oraz pojazdów dużej ładowności. W Ukrainie przedstawicielami stali wysokowytrzymałych są gatunki 12KhGN3MAFD i 15KhGN2MAFJuCz.

Szwedzka firma SSAB jest wiodącym na świecie producentem wysokowytrzymałych stali konstrukcyjnych. SSAB produkuje do 6 mln ton stali rocznie, z których około 38% stanowią stale wysokowytrzymałe występujące pod marką HARDOX, WELDOX, ARMOX i TOOLOX, charakteryzujące się poziomem wytrzymałości od 450 do 1700 MPa.

Stale grupy WELDOX znajdują szerokie zastosowanie w różnych branżach przemysłu np. w urządzeniach dźwigowych (rys. 1a) (WELDOX 355), w technice szynowej (WELDOX 420), sprzęcie górniczym (WELDOX 500), w produkcji samobieżnych pojazdów dużej ładowności (WELDOX 900, 960), mobilnych mostów (WELDOX 1100) (rys. 1b). [1]

Powszechne stosowanie nowych stali WELDOX w budowie maszyn i budownictwie jest utrudnione przez ich stosunkowo ograniczoną spawalność. Newralgicznym elementem



Rys. 1. Wykorzystanie stali WELDOX w przemyśle [1]
Fig. 1. Using steel WELDOX in the industry [1]

Prof. dr hab. inż. Georgij M. Grigorenko, dr inż. Walery A. Kostin, dr inż. Walery D. Poznjakow, dr inż. Sergey L. Żdanow, mgr inż. Wiktor W. Żukow – E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: valeryk05@mail.ru

w połączeniach spawanych stali wysokowytrzymałych jest strefa wpływu ciepła (SWC), ponieważ pod wpływem cyklu cieplnego spawania, struktura i właściwości metalu w SWC mogą podlegać istotnym zmianom polegającym na rozroście ziarna i częściowemu zahartowaniu, co w istotnym stopniu wpływa na szereg właściwości mechanicznych złącza w tym: udarność, plastyczność, wydłużenie. W literaturze, informacje o właściwościach i przemianach strukturalnych w SWC stali WELDOX 1300 są nieliczne i nieusystematyzowane [1-4]. Celem niniejszej pracy jest scharakteryzowanie struktury materiału rodzimego oraz SWC w stali WELDOX 1300 w kontekście wykresów CTPC-s, a w konsekwencji ustalenie właściwości warunków technologicznych spawania z punktu widzenia właściwości złączy spawanych.

W badaniach zastosowano stal WELDOX 1300 o grubości 10 mm (według certyfikatu WELDOX 1300 UK Special Data Sheet: 2005-10-15), materiał dodatkowy - drut proszkowy MEGAFIL - 1100M.

Równowaznik węgla stali WELDOX 1300 wynosi odpowiednio: CET (CEV) = 0,43% (0,67%). Właściwości mechaniczne stali WELDOX 1300 i stopiwa złącza wykonanego zmechanizowanym spawaniem MAG w środowisku gazu ochronnego M21 (82/18) drutem elektrodowym MEGAFIL - 1100M przedstawiono w tablica II.

Tablica II. Właściwości mechaniczne stali WELDOX 1300 i stopiwa
Table II. The mechanical properties of the steel WELDOX 1300 and weld metal

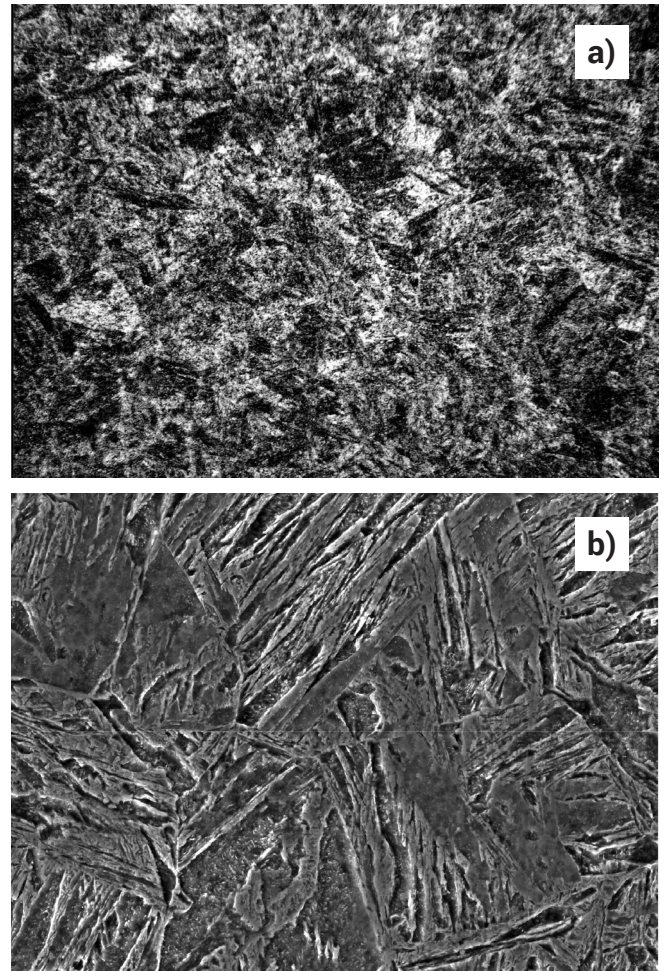
Obiekt	R _{0,2} MPa	R _z MPa	A ₅ %	Z %	KV, J w temperaturze °C	
					- 40	- 60
WELDOX 1300 (UK_Special Data)	1300	1700	8	37,9	27	27
WELDOX 1300 SWC	1157	1605	16,0	61,2	33	-
	1205	1604	15,6	61,4		
	1253	1602	14,6	60,5		
Stopiwo	818*	1047*	13,3*	43,7*	21**	-
	763*	1009*	10,0*	46,2*		
	801**	953**	3,7*	9,8**		

* - próbę przeprowadzono z wstępnym podgrzewaniem do temperatury 150°C.
** - próbę przeprowadzono z wstępnym podgrzewaniem do temperatury 120°C.

Analiza właściwości mechanicznych wskazuje (tabl. II), że granica plastyczności (~1200 MPa) i doraźna wytrzymałość na rozciąganie (~1600 MPa) badanej stali WELDOX 1300 w są o blisko 100 MPa niższe niż wartości nominalne poświadczane w atestcie, w efekcie czego naturalnie wydłużenie, przewężenie i udarność mają wyższe wartości.

Mikrostruktura materiału rodzimego stali WELDOX 1300 ma charakter bainityczno-martensytyczny (rys. 2), składa się z około 60% bainitu resztę stanowi martensyt. Twardość zawiera się w zakresie od 378 do 388 HV1.

Do scharakteryzowania osobliwości mikrostruktury materiału rodzimego stali WELDOX 1300 zastosowano mikrosondę



Rys. 2. Mikrostruktura materiału rodzimego stali WELDOX 1300: a) mikroskopia optyczna (x500); b) mikroskopia skaningowa (x5000)
Fig. 2. Microstructure of steel WELDOX 1300 in the initial state: a) light microscopy (x500), b) scanning microscopy JAMP-9500F (x5000)

Tablica I. Skład chemiczny stali WELDOX-1300 wg normy oraz skład zastosowanego do badań wytopu, skład chemiczny drutu proszkowego MEGAFIL-1100M oraz stopiwa

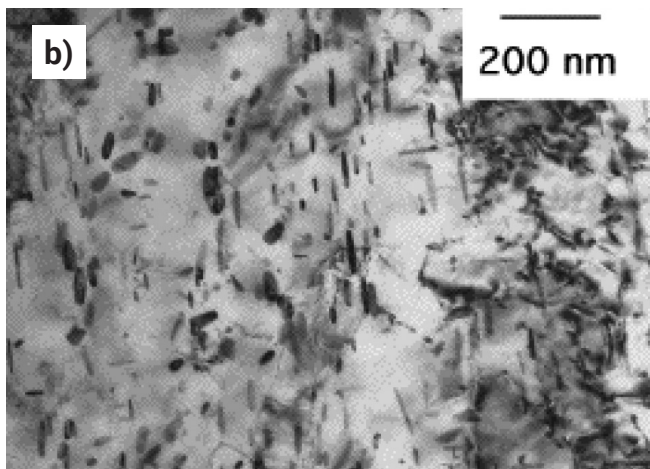
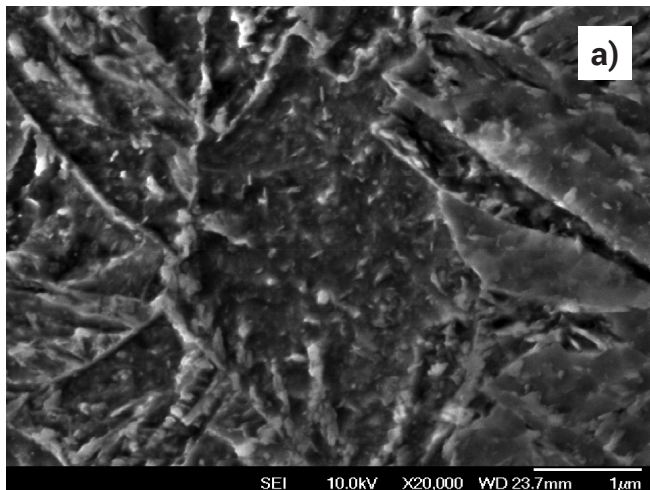
Table I. The chemical composition of the steel WELDOX-1300, cored wire MEGAFIL-1100M and the weld metal

Obiekt badania	Zawartość pierwiastków, % wag.									
	C	Si	Mn	Cr	Ti	Ni	Mo	Nb	V	Cu
Stal WELDOX 1300 (węgiel normy)	0,25	0,50	1,40	0,80	0,02	2,0	0,70	0,04	0,08	0,10
Stal WELDOX 1300 (badany wytop)	0,241	0,204	0,92	0,48	0,004	1,27	0,35	0,021	0,02	0,02
Drut elektrodowy proszkowy MEGAFIL - 1100M	0,07	0,05	1,50	0,80	-	2,7	0,80	-	-	-
Stopiwo	0,241	0,204	0,92	0,48	0,01	1,27	0,35	0,02	0,02	0,02

Adnotacja: zawartość S - 0,005%, N - 0,006%, P - 0,01.0,02%.

JAMP 9500F z polową katodą emisyjną wysokiej rozdzielczości. Ustalono, że wyjściowa struktura stali WELDOX 1300 składa się z równomiernie rozłożonych w objętości ziaren bainitu i martenzytu (rys. 2b) z dużą ilością wydzielen w wysokodispersyjnych węglikoazotków wewnątrz ziaren. Bainit zlokalizowany jest głównie w obrębie granic ziaren, podczas gdy martenzyt przeważnie w centralnej części krystalitów. Równomierne rozproszenie węglikoazotków (rys. 3a) w objętości igieł dolnego bainitu sprzyja współlistnieniu zarówno dobrych właściwości wytrzymałościowych i plastycznych.

Ustalono, że węglikoazotki mają przeważnie igiełkową budowę (rys. 3b), rozmiar igieł mieści się w zakresie 50÷100 nm. Dane analizy rentgenowskiej wskazują, że w materiale rodzimym stali WELDOX 1300 formują się węgliki żelaza Fe₃C (w ilości około 0,52%), węglikoazotki niobu Nb(Z, N) i tytanu Ti(C, N) (0,04%), azotek glinu AlN (0,01%) i azotek boru BN(0,01%).

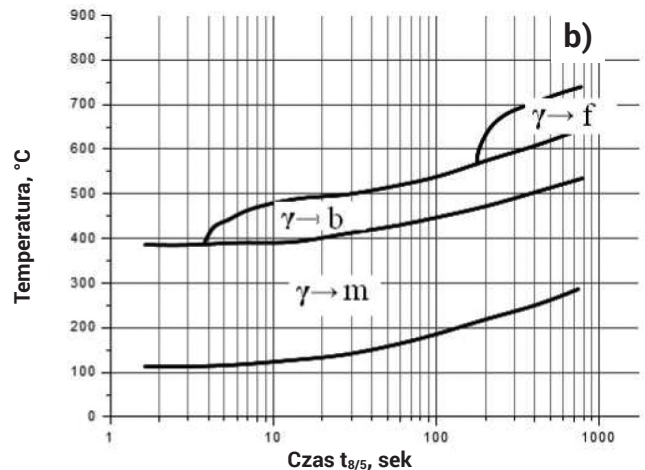
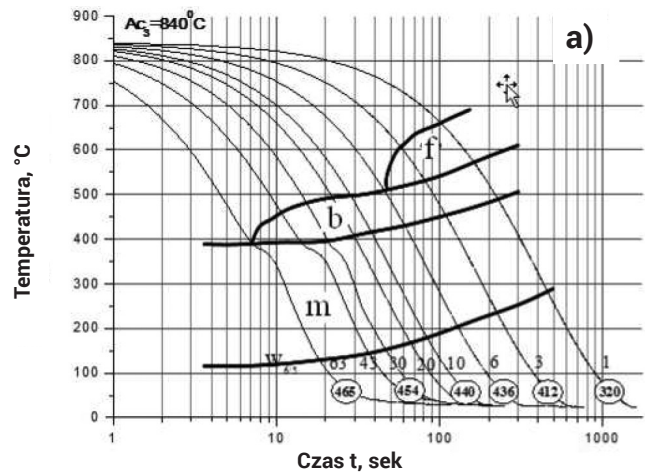


Rys. 3. charakter rozmieszczenia węglikoazotków w stali WELDOX 1300: a) mikroskopia JAMP 9500F x20000; b) mikroskop transmisyjny JEM 200CX x100000

Fig. 3. Distribution of carbonitrides in steel WELDOX 1300: a) microprobe JAMP 9500F x20000; b) transmission microscope JEM 200CX x100000

Do wyznaczenia optymalnej prędkości stygnięcia złącza podczas spawania stali WELDOX 1300 był wykorzystany system symulacji cykli termiczno-odkształceniowych spawania Gleeble 3800, przeprowadzono badania dylatometryczne i zbadano charakter przemian austenitu w stali WELDOX 1300. Podczas badań prędkość chłodzenia metalu (V6/5) zawierała się w przedziale od 1,3 do 63,0 °C/s w zakresie temperatury od 600 do 500 °C, co odpowiada warunkom łukowego spawania stali wysokowytrzymałych.

Według wyników analizy dylatometrycznej i metalograficznej przebadanych na symulatorze próbek, został zbudowany wykres CTPc-S przemian austenitu stali WELDOX 1300 (rys. 4).



Rys. 4. Wykres CTPc-s przemian austenitu stali WELDOX 1300: a) tradycyjny; b) we współrzędnych temperatura-czas t_{8/5} [4]

Fig. 4. CCT diagram steel WELDOX 1300: a) traditional, b) in coordinates temperature - time cooling t_{8/5} [4]

Przemiana austenitu w zbadanym zakresie prędkości chłodzenia odbywa się w zakresie: ferrytycznej, bainitycznej i martenzytowej (rys. 4a). Przy małej prędkości chłodzenie od 1,3 do 6,0 °C/s w metalu SWC stali WELDOX 1300 mają miejsce przemiany: ferrytyczna (f), bainityczna (b) i martenzytowa (m). Stopowanie roztworu stałego molibdenem (0,8%) i niklem (2,0%) sprzyja trwałości austenitu, wskutek czego, temperatura początku przemiany ferrytycznej (przy prędkości chłodzenia 3÷5 °C/s w tej stali osiąga skrajnie niskie wartości (610÷550 °C).

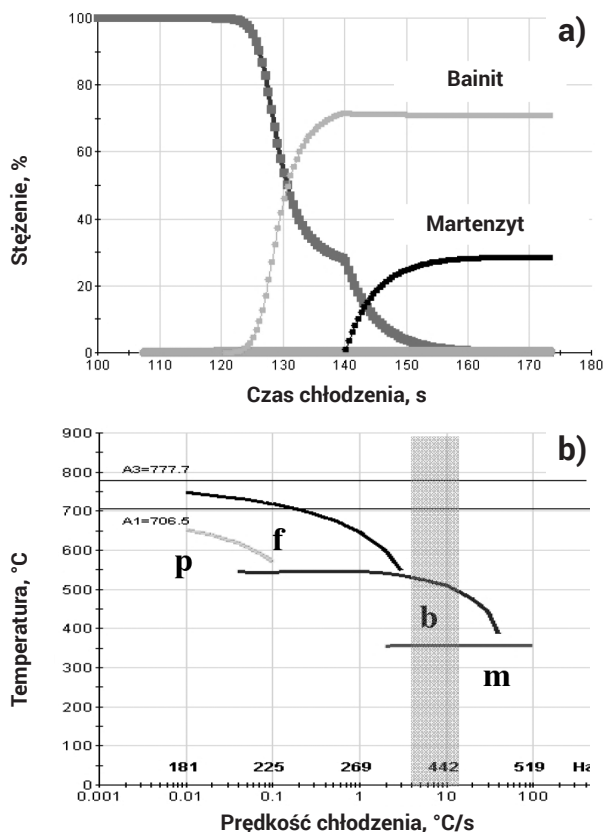
Wraz ze zwiększeniem prędkości chłodzenia ilość ferrytu stopniowo obniża się i przy 6 °C/s zanika zupełnie, struktura składa się wtedy z bainitu i martenzytu.

Późniejsze zwiększenie prędkości chłodzenia do 63 °C/s sprzyja intensywnej przemianie martenzytowej kosztem bainitu. W całym zakresie prędkości chłodzenia (V6/5 1,3 – 63,0 °C/s) temperatura początku (Ms) i końca (Mf) przemiany austenicycznej stopniowo obniża się, przy czym, temperatura początku przemiany obniża się w mniejszym stopniu, (z 520 °C do 390 °C), a temperatura końca przemiany (z 290 °C do 110 °C) (rys. 4b). Twardość próbek zwiększa się z 320 do 465 HV1.

Przy wysokiej prędkości chłodzenia (V6/5 > 63 °C/s) powstaje struktura czysto martenzytowa, a temperatura początku i końca przemian strukturalnych i twardość zostają praktycznie na niezmiennym poziomie. Z podwyższeniem prędkości chłodzenia stali WELDOX 1300 temperatura początku i końca przemiany bainityczno-martenzytowej zmienia się odpowiednio w zakresie temperatury od 610 do 290 °C i od 490 do 130 °C i prowadzi do zwiększenia w nim zawartości martenzytu z około 35% do nawet 95%. Dla tej stali charakterystyczne jest zupełne zakończenie procesu przemiany austenitu - nie powstaje austenit szczytkowy.

Podwyższona zawartość elementów stopowych w stali WELDOX 1300 prowadzi do zauważalnego wzrostu temperatury początku przemiany martenzytycznej od 520 do 390 °C (rys. 4 b). Skonfrontowanie obliczonej wartości temperatury początku przemiany martenzytycznej $M_s=480$ °C, zgodnie z równaniem (1) [5] z eksperymentalnymi danymi pokazało stosunkowo dużą zgodność w zakresie niskiej prędkości chłodzenia.

$$M_s \text{ (}^\circ\text{C)} = 650 - 361C - 39Mn - 35V - 20Cr - 17Ni - 10Cu - 5Mo - 5W + 16Co + 30Al \quad (1)$$



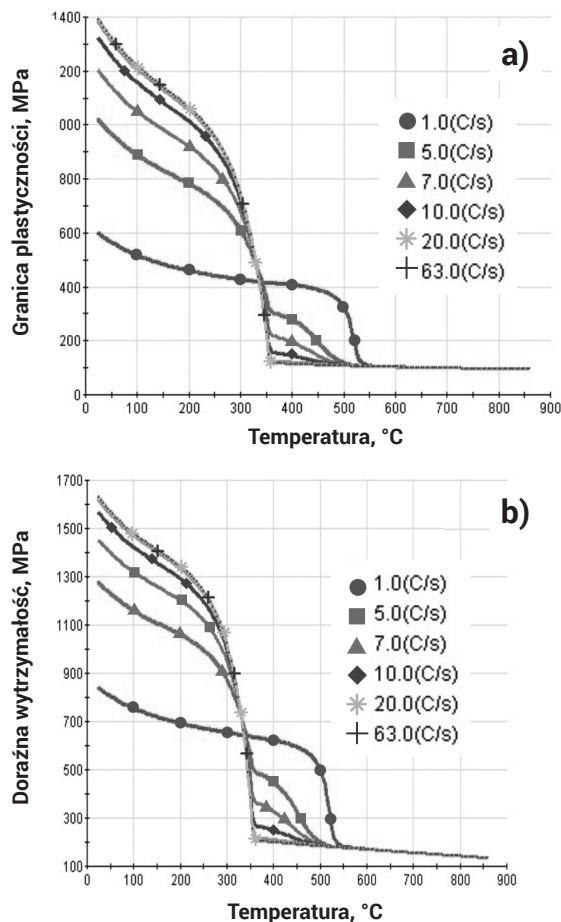
Rys. 5. Wyznaczenie właściwej prędkości chłodzenia SWC podczas spawania stali WELDOX 1300: a) kinetyka tworzenia faz w czasie, i b) zakres temperatury utworzenia faz (zaznaczony zakres właściwej prędkości chłodzenia)

Fig. 5. Determination of the optimal cooling rate during welding HAZ metal steel WELDOX 1300 on: a) the kinetics of phase formation in time, and b) temperature range of phase formation (highlighted optimal cooling rates)

Analiza kinetyki rozpadu austenitu stali WELDOX 1300, oparta na próbkach badanych na symulatorze cykli cieplnych spawania w SWC (rys. 5), pozwoliła ustalić optymalną prędkość chłodzenia $V_{6/5}$ z punktu widzenia kształtowania struktury złącza spawanego. Z przeprowadzonych badań wynika, iż w celu utrzymania złącza spawanego o porównywalnej wytrzymałości materiału rodzimego i SWC na stali WELDOX 1300, konieczne jest żeby prędkość chłodzenia $V_{6/5}$ była na poziomie 6 °C/s, wartość ta znajduje się blisko prędkości chłodzenia zalecanej podczas spawania stali wysokowytrzymałej z granicą plastyczności powyżej 700 MPa, która według autorów [6] powinna zawierać się w przedziale $5 \leq V_{6/5} \leq 20$ °C/s.

Należy podkreślić, że ze zwiększeniem prędkości chłodzenia rośnie ryzyko utworzenia zimnych pęknięć i kruchego pęknięcia metalu SWC stali WELDOX 1300.

Wyniki badań symulacji zostały zweryfikowane podczas rzeczywistego procesu spawania. W celu uzyskania właściwej prędkości stygnięcia (10±20 °C/s) podczas spawania stali WELDOX 1300 były dobrane odpowiednie parametry



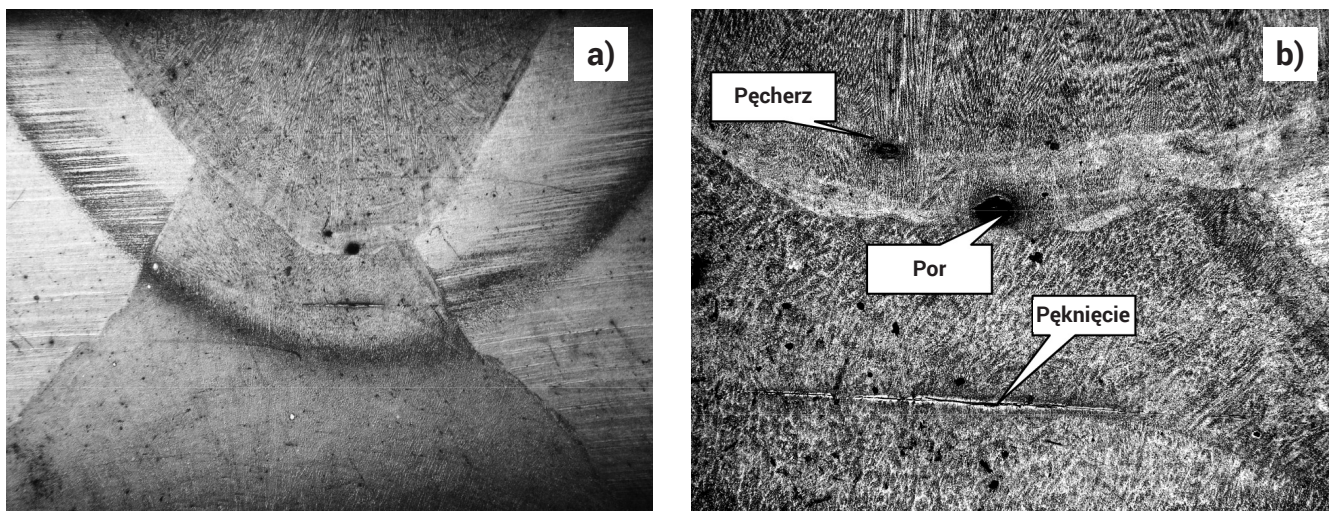
Rys. 6. Wpływ prędkości chłodzenia V8/5 na obliczoną wartość a) granicy plastyczności; b) doraźnej wytrzymałości na rozciąganie (obliczenia zgodnie z JMatPro)

Fig. 6. Effect the cooling rate V8/5 for the calculated values: a) the yield stress, b) the tensile strength (calculated JMatPro)

spawania: natężenie prądu spawania $I_s=250$ A, napięcie łuku $U_l=30$ V, $V_{spaw}=0,23$ m/min., temperatura wstępnego podgrzewania 120 °C.

Makrostruktura złącza spawanego stali WELDOX 1300 została przedstawiona na rysunku 7a. Badania pokazały, że pomimo podgrzewania wstępnego do temperatury 120 °C w strefie ponownego nagrzania ciepłem przeciwległego ściegu powstają defekty, pęcherze i pęknięcia rysunku 7b., ta okoliczność wyjaśnia obniżenie plastyczności stopiwa (względem materiału rodzimego), względnego wydłużenia (do 3,7%) i przewężenia (do 9,8%), co jest cechą charakterystyczną złączy spawanych stali WELDOX 1300 przy spawaniu z podgrzewaniem do 120 °C (tabl. II). Podczas prowadzenia opisanych badań zaobserwowano, że z pozoru nieznaczne zwiększenie temperatury wstępnego podgrzewania powyżej 150 °C eliminuje obecność opisanych wcześniej wad i prowadzi do podwyższenia wytrzymałości (do 1050 MPa), wydłużenia względnego (do 13,3%) oraz przewężenia tablicy II. (do 43,7%). Stosunkowo niska udarność stopiwa jest przede wszystkim efektem braku na rynku właściwego spoiwa do spawania stali WELDOX 1300.

Utworzenie zimnych pęknięć w strefie ponownego nagrzania ściegów spoiny (rys. 7b), być może związane z: 1) procesami dyfuzji wodoru w SWC, o czym świadczy duża ilość pęcherzy (rys. 7b); 2) rozpuszczeniem faz węgliko-azotkowych (Fe_3C , $Ti(C, N)$, $Nb(C, N)$) w strefach ponownego nagrzewania; 3) utworzeniem dużej ilości fazy martenzytnej (~ 30÷40%). Przy rozpuszczeniu węglikoazotków, pierwiastki węglilotwórcze, przede wszystkim węgiel, przechodzą do roztworu stałego, zwiększają parametry sieciowe austenitu, przy późniejszym ochłodzeniu doprowadzają do wzrostu lokalnego wewnętrznego naprężenia.



Rys. 7. Mikrostruktura złącza spawanego stali WELDOX 1300: a) ogólny widok, (x10); b) zimne pęknięcia i pęcherze w SWC (x50)
 Fig. 7. Macroscopic weld steel WELDOX 1300: a) general view (x10), b) cold cracks and pores in the HAZ (x50)

Wnioski

Mikrostruktura materiału rodzimego wysokowytrzymałej stali WELDOX 1300 składa się z mieszaniny bainitno-martenzytnej (~60% bainitu i 40% martenzytu); bainityczna struktura zawiera dużą ilość drobnodispersyjnych (50÷100 nm) ukierunkowanych igiełkowatych wydzielen węglikoazotków tytanu i węglków żelaza Fe_3C .

Zastosowanie symulacji cykli cieplnych spawania Gleeble 3800 pozwoliło ustalić, że wraz ze zwiększeniem prędkości chłodzenia z 1 do 63 °C/s, temperatura końca przemiany martenzytycznej obniża się z 290 °C do 110 °C, co doprowadza do zwiększenia w SWC (stali WELDOX 1300) zawartości martenzytu od 35 do nawet 95%.

W celu kształtowania optymalnej struktury bainitno-martenzytnej SWC, do spawanie stali WELDOX 1300 należy stosować wysokowytrzymały drut elektrodowy MEGAFIL 1100R, mający strukturę martenzytyczną, co w maksymalnym stopniu zabezpiecza jednolitą wytrzymałość połączenia spawanego.

W celu ograniczenia utworzenia zimnych pęknięć należy obniżyć prędkość stygnięcia w SWC do 5÷6 °C/s, takie warunki można zapewnić przez wstępne podgrzewanie stali WELDOX 1300 do temperatury nie niższej 150 °C.

Literatura

- [1] Welding Hardox ® and Weldom ® - <http://www.ssab.com>
- [2] W. Ozgowicz, A. Kurc, G. Nawrat "Identification of precipitations in anodically dissolved high-strength microalloyed Weldom steels". Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 31, No 2, s. 95-100, 2008.
- [3] W. Ozgowicz, E. Kalinowska-Ozgowicz "Investigations on the impact strength of constructional high-strength Weldom steel at lowered temperature" Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 32, No 2, s. 89-94, 2008.
- [4] W. A. Kostin, G. M. Grigorenko, T. G. Solomijczuk, W. W. Zukow, T. A. Zuber, „Badania mikrostruktury szwów spawalniczych wysoko wytrzymałej stali konstrukcyjnej WELDOX 1300 z granicą wytrzymałości 1700 MPa” Spawanie automatyczne, No 3, s.7-14, 2013.
- [5] H. K. D. H. Bhadeshia "Bainite in Steels", Institute of Materials, London, s. 454, 1992.
- [6] S. L. Zdanow, L. I. Mokhoduj, P. A. Stryzak, Ju. M. Lebedjew, „Wpływ struktury stali wysokowytrzymałej 14KhG2SAFD na odporność na pełzanie” Spawanie automatyczne, No 3, s.9-12, 1992.
- [7] Z. Guo, N. Saunders, J. P. Schillé, A. P. Miodownik "Material properties for process simulation", Materials Science and Engineering A, Vol. 499, s.7-13, 2009.
- [8] <http://www.sentsoftware.co.uk/jmatpro.aspx>