



W ostatnich latach znaczne zainteresowanie konstruktorów wzbudziły stale ulepszone ciepnie o wysokiej wytrzymałości i niskiej temperaturze przejścia w stan kruchy. Jest to związane z kierunkiem rozwoju konstrukcji stalowych, które są coraz bardziej skomplikowane i którym stawia się coraz większe wymagania eksploatacyjne. Jednocześnie można zaobserwować, że wymiary samych konstrukcji są coraz większe. Równocześnie dążeniem konstruktorów i wytwórców konstrukcji jest zmniejszenie masy i kosztów konstrukcji. Te wymagania mogą być spełnione przez materiały o coraz wyższych własnościach wytrzymałościowych.

Dobierając odpowiedni skład chemiczny oraz warunki walcowania i obróbki cieplnej, uzyskuje się stale o granicy plastyczności powyżej 1000 MPa. Stale tego typu znajdują zastosowanie przede wszystkim w budowie suwnic, dźwigów samochodowych oraz innych elementów mocno obciążonych. Wytrzymałość właściwa (stosunek wytrzymałości do ciężaru właściwego) takiej stali jest porównywalna do wytrzymałości stopów tytanu. Szersze zastosowanie materiałów o tak wysokich własnościach mechanicznych wymusza jednak zmiany konstrukcyjne, opracowanie technologii kształtowania elementów, a przede wszystkim opracowanie odpowiedniej technologii spawania. Argumentem przemawiającym za stosowaniem stali o wysokiej wytrzymałości jest przede wszystkim zmniejszenie grubości elementów konstrukcyjnych, a tym samym obniżenie kosztów inwestycji poprzez zmniejszenie kosztów transportu, materiału i procesów spawania.

Wyniki badań i dyskusja

Badania stali ulepszonych ciepnie o granicy plastyczności R_p powyżej 1000 MPa obejmowały oznaczenie składu chemicznego, ocenę mikrostruktury, wykonanie pomiarów twardości, wykonanie badań wytrzymałościowych oraz próby symulacyjne. Badania przeprowadzono na blachach ze stali w gatunku Weldox 1100 o grubości 7 mm i Weldox 1300 o grubości 10 mm.

Wyniki analizy składu chemicznego zestawiono w tabeli 1, wyniki badań własności mechanicznych zamieszczono w tabeli 2 i na rysunku 1.

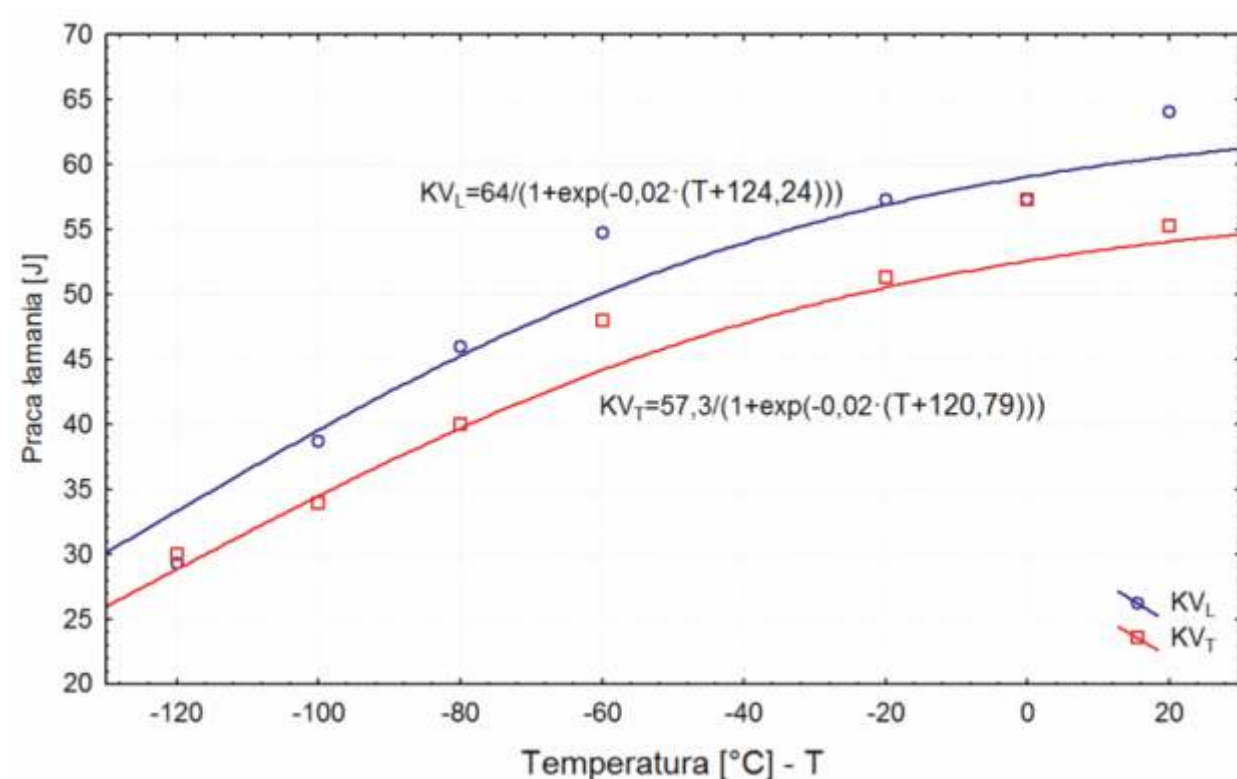
Badany materiał	Zawartość pierwiastka [%]															
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	Ti	B	Nb	Zr	N
Weldox 1100	0,17	0,84	0,24	0,012	0,003	0,56	2,00	0,60	0,02	0,057	0,028	0,002	0,002	0,02	-	0,0048
Weldox 1300	0,21	0,85	0,21	0,008	0,002	0,47	1,26	0,39	0,02	0,006	0,021	0,003	0,001	0,015	0,002	0,0038

Równoważnik węgla CE dla stali Weldox 1100 wynosi 0,68%, natomiast dla stali Weldox 1300 wynosi 0,61%

Tabela 1. Wyniki badań składu chemicznego stali Weldox 1100 i Weldox 1300

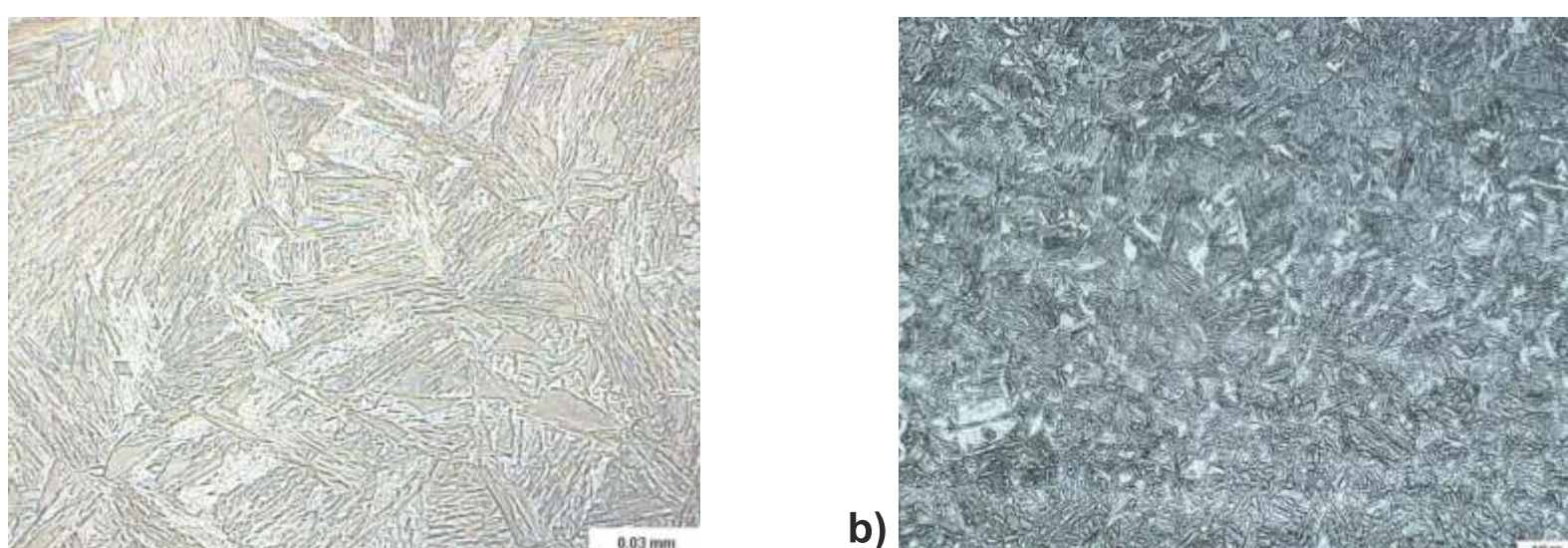
Stal	Kierunek walcowania	R_m [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	A_5 [%]	HV 10	KV_{+20} [J]
Weldox 1100	Wzdłuż kierunku	1448,5	1195,0	11,9	499	55,7
	W poprzek kierunku	1410	1221	11,3		33,3
Weldox 1300	Wzdłuż kierunku	1554,9	1294,2	11,8	501	64,0
	W poprzek kierunku	1572,9	1356,6	10,8		-

Tabela 2. Średnie własności mechaniczne stali Weldox 1100 i Weldox 1300

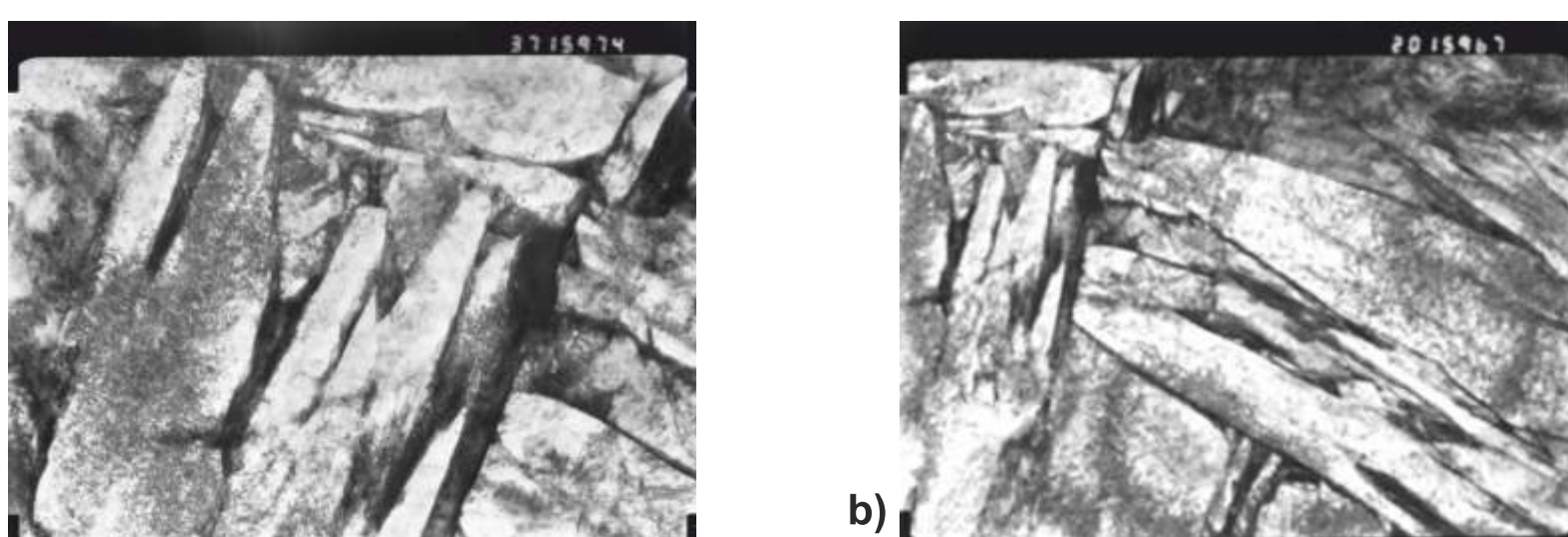


Rys. 1. Praca łamania KV stali Weldox 1300 (KVL – praca łamania wzdłuż kierunku walcowania, KVT – praca łamania w poprzek kierunku walcowania)

Wyniki badań metalograficznych mikroskopowych, które przedstawiono na rysunku 2, wykazały, że stale Weldox 1100 i 1300 charakteryzują się drobnoziarnistą strukturą martenzytyczną. Analizując skład chemiczny (tabl. 1) należy oczekiwać, że w strukturze stali Weldox 1300 może wystąpić martenzyt odpuszczony wraz z wydzieleniami węglików i węglikoazotków pierwiastków silnie węglilotwórczych (Mo, V, Nb, Ti). Na rysunkach 3a i 3b przedstawiono wyniki badań mikrostruktury stali Weldox 1300 przy użyciu TEM. Mikrostruktura stali Weldox 1300 składa się z listew martenzytu odpuszczonego. Wewnątrz listew obserwuje się drobne wydzielenia. W oparciu o analizę dyfraktogramów w mikrostrukturze zidentyfikowano węglikoazotki wanadu V(CN) oraz węgliki molibdenu Mo_2C . Ponieważ w stali oprócz wanadu jest jeszcze niob i tytan, ogólnie można fazę określić jako typ MX, gdzie M to V, Nb, Ti a X to C i N.



Rys. 2. Wyniki badań metalograficznych mikroskopowych stali Weldox 1100 (a) i Weldox 1300 (b). Struktura drobnoziarnista martenzytyczna. Trawienie odczynnikami Nital.



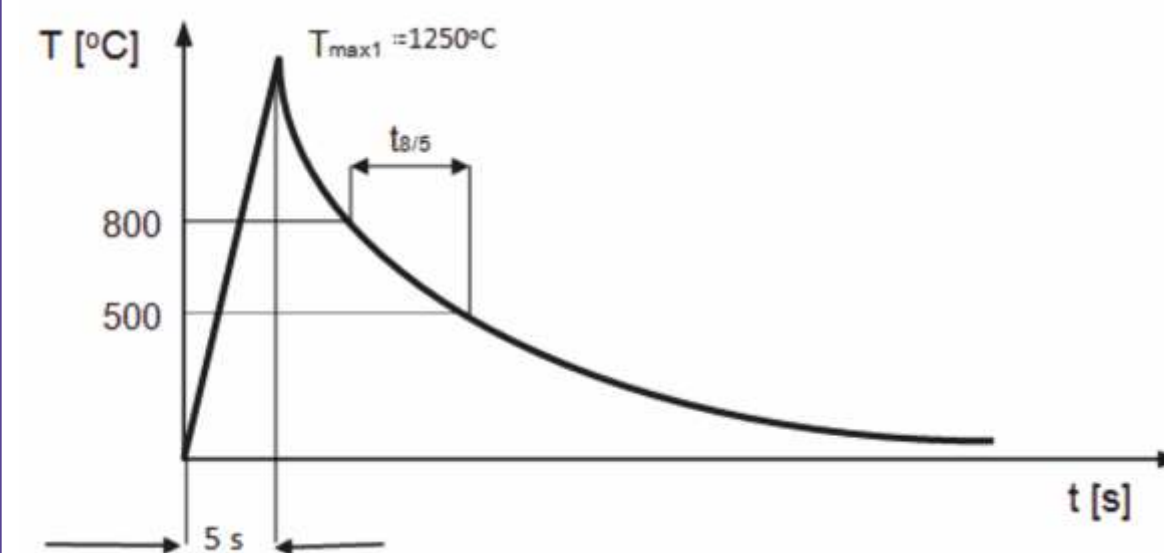
Rys. 3. Struktura stali Weldox 1300, martenzyt odpuszczony; obserwacja w jasnym polu widzenia TEM a) i b)

Spawalność stali ulepszonych ciepnie o granicy plastyczności powyżej 1000 MPa

Autorzy:

dr inż. Marek St. Węglowski, dr inż. Marian Zeman, dr hab. inż. Mirosław Łomozik

Wpływ ilości wprowadzonego ciepła na strukturę i własności symulowanego obszaru SWC oceniono za pomocą badań przeprowadzonych przy użyciu symulatora cykli cieplnych spawania. Temperatura austenizacji próbek do badania przemian wynosiła 1250 °C. Próbki udarnościowe o przekroju 5x10 mm (stal Weldox 1100) i 10x10 mm (Weldox 1300), wycięte z płyty próbnej wzdłuż kierunku walcowania po szlifowaniu i nacięciu karbu typu V, umieszczone w szczękach mocujących symulatora oraz poddawano działaniu pojedynczych symulowanych cykli cieplnych spawania (rys. 4) o czasach stygnięcia $t_{8/5}$ w zakresie od 2 do 300 sekund dla stali Weldox 1100 i Weldox 1300. Wyniki pomiaru pracy łamania KV i twardości HV10 w symulowanych obszarach strefy wpływu ciepła stali Weldox 1100 Weldox 1300 przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 4. Pojedynczy symulowany cykl cieplny spawania

Parametry cyklu cieplnego	Stal Weldox 1100		Stal Weldox 1300		
	$t_{8/5}$ [sekundy]	KV _{sr} [J]	HV _{sr} 10	KV _{sr} [J]	HV _{sr} 10
1250 °C	2,5	53	386	53,3	489
	5	52	400	60,0	466
	10	45	374	55,3	470
	20	41	352	44,0	463
	50	48	312	32,7	407
	100	51	241	28,7	359
300	-	-	14,7	274	-
Materiał rodzimy	56	499	64	501	-

Tabela 3. Średnie wyniki pomiaru pracy łamania KV i twardości HV10 w symulowanych obszarach strefy wpływu ciepła stali Weldox 1100 i Weldox 1300

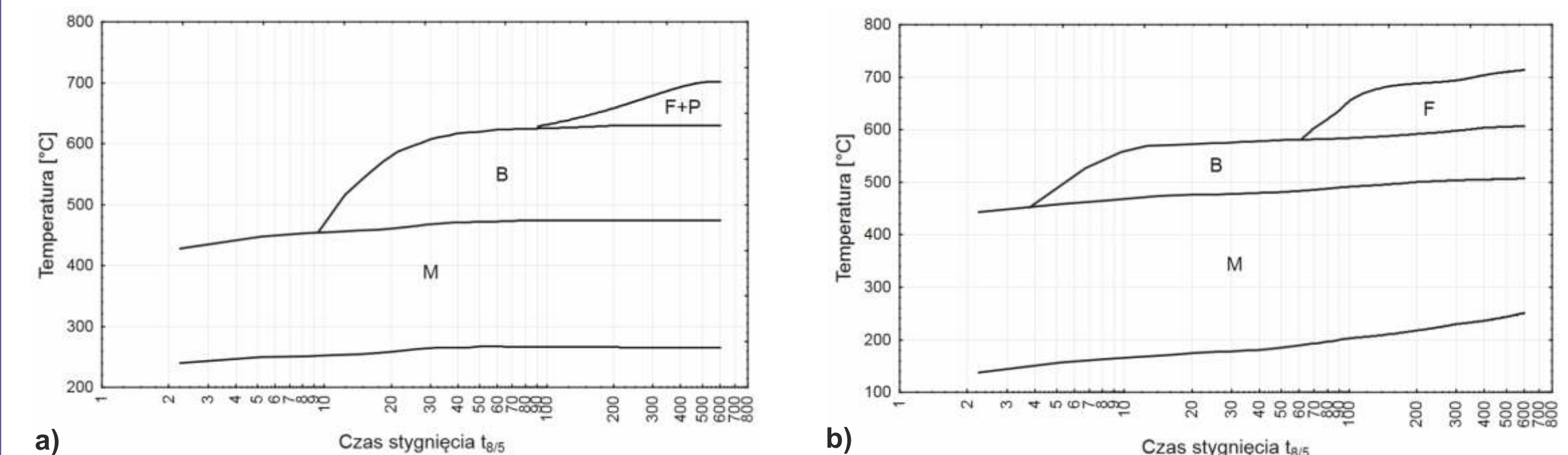
Poddanie próbek ze stali Weldox 1100 działaniu prostych cykli cieplnych spawania o temperaturze maksymalnej 1250 °C i czasach stygnięcia $t_{8/5}$ w zakresie od 2 do 100 sekund powoduje spadek pracy łamania KV od 53 J dla cyklu $t_{8/5} = 2,5$ sekundy do 41 J - dla cyklu $t_{8/5} = 20$ sekund, a następnie nieznaczny wzrost pracy łamania KV do 51 J - dla cyklu $t_{8/5} = 100$ sekund. Strukturą dominującą w symulowanych obszarach SWC jest struktura bainityczno-martenzytyczna.

Badania wpływu pojedynczych cykli cieplnych spawania na strukturę i własności symulowanej strefy wpływu ciepła stali Weldox 1300 wykazały, że dla czasów stygnięcia $t_{8/5}$ w zakresie 2,5 - 60 sekund praca łamania KV w temperaturze + 20 °C była zadowalająca i mieściła się w zakresie od 44 do 60 J, a twardość symulowanych obszarów SWC wysoka i przekraczała wartość 450 HV10 dla czasów $t_{8/5}$ krótszych od 24 s. Dla próbek poddanych cyklem cieplnym spawania z dłuższymi czasami $t_{8/5}$ (powyżej 60 sekund) praca łamania KV jest niska i nie przekracza 30 J, a średnia twardość tej strefy jest niższa od 406 HV10.

Badania metalograficzne symulowanej strefy wpływu ciepła stali Weldox 1300 wykazały, iż dla najkrótszego czasu stygnięcia $t_{8/5} = 2,5$ sekundy struktura składa się z martenzytu, natomiast dla czasów stygnięcia $t_{8/5}$ od 4 do 60 sekund stal Weldox 1300 charakteryzuje się strukturą martenzytyczno-bainityczną o twardości w zakresie od 466 do 407 HV10. Przy dłuższych czasach stygnięcia $t_{8/5}$ (powyżej 60 s) w strukturze stali występuje mieszanina ferrytu i bainitu o twardości zmieniającej się od 359 do 274 HV10.

Stale Weldox 1100 i 1300 można zaliczyć do podgrupy 3.2 wg PN-CR ISO 15608: 2005, dla której w normie PN-EN ISO 15614-1:2008 podano dopuszczalną twardość 450 HV10 dla złączy nie obrabionych ciepnie.

Powyższe wyniki prób symulacyjnych są zgodne z wynikami uzyskanymi przy opracowywaniu wykresów przemian rozpadu austenitu CTPc-S dla stali Weldox 1100 i 1300 (rys. 5).



Rys. 5. Wykresy CTPc-S dla stali a) Weldox 1100, b) Weldox 1300

Analiza wykresów przemian austenitu wykazała, iż w stali Weldox 1100 w porównaniu do stali Weldox 1300 przy dłuższych czasach stygnięcia ($t_{8/5} = 10-90$ sekund) występuje struktura bainityczna, a powyżej czasu $t_{8/5} > 90$ sekund mieszanina struktury bainitycznej i ferrytycznej. W stali Weldox 1300 zawierającej wyższą zawartość węgla (0,21 %) struktura bainityczna tworzy się w zakresie czasu stygnięcia $t_{8/5} = 4-60$ sekund. W trakcie procesu spawania obu gatunków stali, nawet przy małej ilości wprowadzonego ciepła, można oczekiwać mieszaniny struktur hartowniczych martenzytu i bainitu.

Wnioski:

- stale Weldox 1100 i 1300 są stopowymi, niskowęglowymi stalami z mikrododatki V, Ti, Nb i B,
- stale Weldox 1100 i 1300 charakteryzują się strukturą drobnoziarnistą martenzytyczną (martenzyt odpuszczony w postaci listew) o twardości przekraczającej 499 HV10 (Weldox 1100) i 501 HV10 (Weldox 1300),
- stale Weldox 1100 i 1300 charakteryzują się wysokimi pracami łamania w temperaturze pokojowej jak i w temperaturach obniżonych,
- spawalność stali Weldox 1100 i 1300 jest ograniczona ze względu na możliwość występowania pęknięć zimnych w złączach spawanych. To powoduje konieczność podgrzewania wstępnego przed spawaniem (powyżej 100 °C).

Kontakt:

Instytut Spawalnictwa
Zakład Badań Spawalności i Konstrukcji Spawanych

Podziękowania

Badania były prowadzone w ramach działalności statutowej w Instytucie Spawalnictwa i finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

ul. Bł. Czesława 16-18
44 - 100 Gliwice
tel.: 32 33 58 236, -323, -328, fax: 32 231 46 52
www.is.gliwice.pl, is@is.gliwice.pl