

Przydatność stali mikrostopowej 28HGVB do konstrukcji spawanych

The usefulness of microalloyed steel 28HGVB for welded structures

Streszczenie

W artykule omówiono problem występujący pomiędzy hartownością i spawalnością stali stosowanych na elementy maszyn roboczych. W badaniach laboratoryjnych stal 28HGVB z mikrododatkiem boru poddano obróbce cieplnej oraz próbom spawania. Próbne złącza spawane metodą 111 testowano metodami nieniszczącymi i niszczącymi. Stwierdzono, że stal z dodatkiem 0,003 % boru posiada zdolność utwardzania metodą konwencjonalnej obróbki cieplnej do 330 - 470 HV na głębokość do 30 mm. Testy złączy spawanych wykazały pełną przydatność badanej stali do zastosowania na konstrukcje spawane.

Słowa kluczowe: stal mikrostopowa, spawalność, hartowność, regeneracja lemiesza

Abstract

The article discusses the problem between hardenability and weldability of steel used for elements of working machines. In laboratory examination of the microalloyed steel 28HGVB with boron was heat treated and tests of welding were performed. Test pieces executed using 111 welding process were tested by destructive and non-destructive methods. It was found that the steel containing 0.003% boron has the ability to harden by conventional heat treatment to 330 - 470 HV at a depth of 30 mm. Examinations of welded joints showed full usability of the tested steel for weld constructions.

Keywords: micro-alloy steel, weldability, hardenability, regeneration of ploughshare

Wstęp

Szereg elementów maszyn roboczych i urządzeń transportowych wykonywanych jest z materiałów odpornych na ścieranie. Problemy z technologią takich materiałów polegają na tym, że materiały odporne na zużycie są trudne do łączenia metodą spawania. Budowa monolitycznych konstrukcji w których korpusy i elementy nośne wytwarzane są ze zwykłych stali węglowych, a elementy robocze ze stali utwardzanych metodą obróbki cieplnej jest niekiedy niemożliwe. Przy zawartości węgla powyżej 0,3% stale można obrabiać cieplnie ale są trudno spawalne. Stale spawalne z kolei nie dają się utwardzać przez hartowanie i odpuszczanie. Rozwiązaniem problemu jest zastosowanie konstrukcji bimetalowych to jest takich, w których element roboczy wykonany ze stali utwardzonej jest przyspawany do części nośnej. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość regeneracji przez odcięcie zużytego fragmentu roboczego i przyspawania nowego. Próby takie autor prowadził dla lemieszy pługów rolniczych [17]. Rozwiązania bimetalowe mogą być stosowane dla takich konstrukcji zużywalnych części maszyn i urządzeń jak:

- okładziny form do produkcji materiałów budowlanych,
- ostrza i płyty krawędziowe kruszarek i ładowarek,
- ogniwa przenośników zgrzebłowych,
- elementy robocze maszyn rolniczych, budowlanych i wydobywczych,

- przenośniki ślimakowe,
- łopaty młynów wentylatorowych do kotłów.

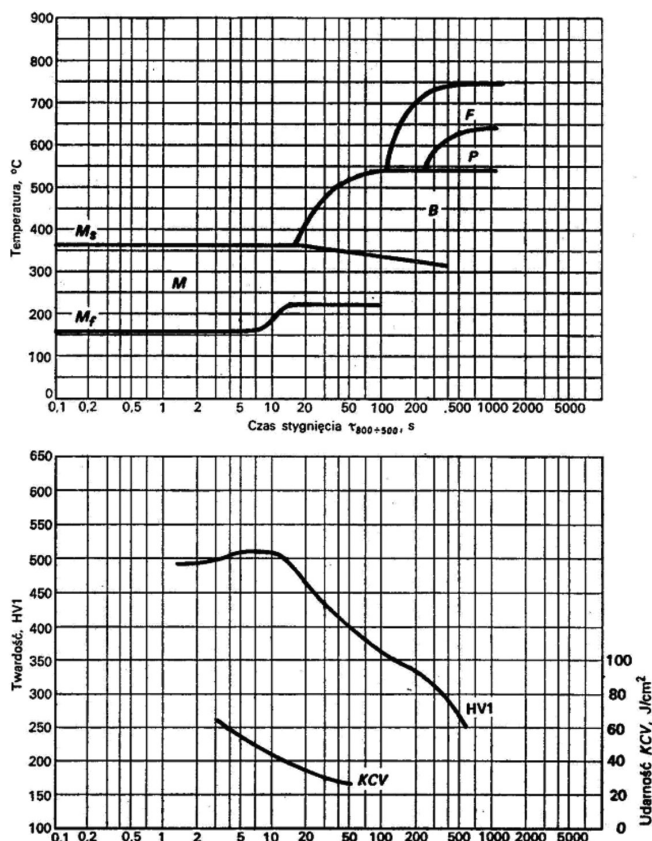
Z analizy literatury i własnych badań autora [3,11,12] wynika, że materiałem posiadającym obydwie cechy jednocześnie t.j. hartowność i spawalność jest stal mikrostopowa z borem.

W budowie maszyn roboczych wykorzystywane jest szereg stali z borem: 15G2ATB, 15G2ANbTB, 13HNMB, 14HNMBCu, 21HG2SB [1], 15B36H, 25G2B [16], HARDOX i VELDOX [8].

Stale z mikro dodatkiem boru stosowane były już podczas II wojny światowej. Określane były jako stale bainityczne o wysokiej wytrzymałości i odporności na ścieranie. Uzyskanie struktury bainitycznej było możliwe na drodze normalizowania cienkich przekrojów przy szybkim chłodzeniu. Utwardzenie elementów o grubości kilkudziesięciu mm możliwe jest przy zastosowaniu hartowania i odpuszczania. Najkorzystniejsze działanie boru odnotowano w zakresie 0,003 - 0,004 %. Wpływ boru na hartowność stali oraz na położenie linii na wykresie CTPc-S opisane zostały szczegółowo w pracy J. Brózdzy, J. Pilarczyka i M. Zemana [1]. Dodatek boru oraz innych pierwiastków ma odzwierciedlenie w wartości równoważnika węglowego C_E . Wprowadzenie boru miało na celu uzyskanie dużej głębokości hartowania w stalach spawalnych o niskiej zawartości węgla. W proce-

się wytopu stali z borem wymagane jest bardzo dobre od-tlenienie kąpielii przez dodatek aluminium. W przypadku nie-dostatecznego od-tlenienia stali, jednocześnie z Al_2O_3 tworzy się tlenek B_2O_3 , a w stanie stałym stabilne azotki AlN i BN co obniża stężenie boru wpływające korzystnie na hartowość stali poniżej 0,0008%. Przydatność stali niskostopowych o podwyższonej wytrzymałości do spawania można oceniać na podstawie szeregu wskaźników. W opracowaniu „Spawalnicze wykresy przemian austenitu CTPc-S” autorzy [1] przedstawili wyniki badania cykli cieplnych spawania i ich wpływu na przemiany strukturalne oraz właściwości SWC. Przykład wykresu CTPc-S dla stali 21HG2SB o składzie zestawionym w tablicy I, zbliżonym do składu stali stanowiącej przedmiot badań, przedstawiono na rysunku 1.

Z zamieszczonego wykresu wynika, że przy czasie stygnięcia złącza w zakresie temperatury 800-500 °C wynoszącym ponad 20 sekund powstanie korzystna struktura bainityczna o twardości ok. 400 HV i udarności na poziomie $KCV = 30 \text{ J/cm}^2$. Strefa zmian strukturalnych w obszarze przegrzania materiału rodzimego ciepłem krystalizacji spoiny SWC (HAZ) jest jednym z najistotniejszych miejsc decydujących o wytrzymałości złącza. Większość awarii konstrukcji złączy o poprawnej budowie makro jest spowodowana pękaniem strefy wpływu ciepła. Zjawiska cieplne w stali podatnej na utwardzanie mogą spowodować wzrost twardości i koncentrację naprężeń w tym obszarze. Ponadnormatywny wzrost twardości SWC powyżej 100 HV w porównaniu do spoiny lub materiału rodzimego może spowodować skłonność złącza do zimnych pęknięć [14].



Rys. 1. Wykres CTPc-S dla stali 21HG2SB [1]
Fig. 1. CCT welding diagrams for 21HG2SB steel [1]

Tablica I. Skład chemiczny stali 21HG2SB [1]
Table I. The chemical composition of the 21HG2SB steel [1]

Zawartość pierwiastków, %										
C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni	Cu	B	
0,22	1,41	0,85	0,023	0,01	0,05	0,53	0,10	0,15	0,003	

Zimne pęknięcia wywołane są równoczesnym oddziały-waniem trzech czynników: małej plastyczności SWC o struk-turze martenzytycznej lub martenzytyczno-bainitycznej, wo-doru dyfundującego z metalu spoiny do SWC oraz naprężeń wywołanych skurczem złącza spawanego. Wykresy CTPc-S informują jedynie o skłonności stali do tworzenia twardej struktury. Twardość SWC można zmniejszyć przez zastoso-wanie wstępnego podgrzania złącza spawanego lub zwięk-szenie energii liniowej łuku. Jednocześnie ze wzrostem energii zwiększają się naprężenia w złączach spawanych i takie rozwiązanie możliwe jest tylko przy skurczu swobodnym. Degradacja struktury może być wywołana wodorem dyfundującym do stali podczas wytopu, procesów spawa-nia, a także podczas eksploatacji w środowisku wodoronośnym. Obszerne badania autora [12,13], dowiodły, że stale z borem posiadają podwyższoną odporność na degrada-cję wodorową. Bor rozmieszczając się na granicach ziaren i w defektach struktury, utrudnia dyfuzję wodoru do stali za-równo podczas spawania jak i podczas eksploatacji. Z tego powodu stal z borem jest zalecana jako materiał kon-strukcyjny odporny na złożone zużycie wodorowo - ściernie.

Odporność na kruche pęknięcie złącza spawanego za-leżna jest od plastyczności poszczególnych jego elemen-tów składowych, tzn. materiału rodzimego, spoiny i strefy wpływu ciepła. Pomimo właściwego doboru gatunku stali i stopiwa, zapewniających wymaganą odporność na kruche pęknięcie materiału rodzimego i spoiny, SWC o małej plastyczności może być miejscem inicjowania i rozprzestrzenia-nia się pęknięć kruchych. Właściwości SWC, a szczególnie jej odporność na kruche pęknięcie można w pewnym zakresie (niekiedy dość szerokim) regulować, zmieniając czas stygnięcia złącza spawanego, na który z kolei można wpływać przez zmianę energii liniowej łuku i temperaturę początko-wą spawanych elementów. Zamieszczone na większości wykresów krzywe udarności symulowanej strefy wpływu ciepła pozwalają na ocenę wpływu czasu stygnięcia $T_{800+500}$ na odporność na kruche pęknięcie SWC w złączu spawanym. Stosując stal z borem na krawędzie narzędzi roboczych unika się trzeciego czynnika jakim są naprężenia spawalnicze normalne do osi spoiny.

Wstępną ocenę spawalności metalurgicznej można do-konać na podstawie obliczenia równoważnika węglowego przedstawionego dla stali z borem w postaci zależności (1).

$$C_E = C + Si/30 + (Mn + Cr + Cu)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B \% \quad 1)$$

Przy obliczonych wartościach równoważnika kryterium spawalności wynosi:

- $C_E < 0,15$ - stal odporna na pęknięcia,
- $0,15 < C_E < 0,45$ - stal częściowo odporna na pęknięcia
- $C_E > 0,45$ - stal skłonna do pęknięć.

Ze względu na spodziewane dla stali z borem wartości równoważnika C_E w środkowym zakresie, nieodzowne jest sprawdzenie zachowania się badanej stali metoda wyko-nania złącza próbnego, które będzie poddane testom praktycznym stosowanym w procedurze uznawania technologii spawania wg PN-EN 15614-1 [9].

Spawalność technologiczna i konstrukcyjna praktycznie oceniana może być w próbach laboratoryjnych przez bada-nie nieniszczące VT, (RT lub UT), badania strukturalne makro i mikroskopowe oraz próbę gięcia i rozciągania [3].

Mikrodotadku boru wg wielu autorów [2,6,7,10], wpływa na właściwości technologiczne stali przez następujące mechanizmy:

- tworzy twarde fazy międzywęzłowe Fe_2B i FeB , borki CrB , VB_2 , Ni_2B , TiB , węgliki B_4C , B_6C i $Fe_{23}(C, B)_6$,
- zwiększa dyspersję faz strukturalnych podczas hartowania,
- polepsza hartowność stali średniowęglowych,
- zwiększa wytrzymałość granic ziaren martenzytu,
- rozmieszcza się na granicach ziaren i w defektach strukturalnych - utrudnia dyfuzję wodoru.

Cel, przedmiot i zakres badań

W dostępnych publikacjach brak jest danych dotyczących spawalności stali 28HGVB krajowej produkcji. Celem badań było określenie możliwości zastosowania ulepszonej cieplnie stali mikrostopowej 28HGVB z borem do wytwarzania i regeneracji elementów maszyn roboczych łączonych do konstrukcji podstawowych za pomocą spawania. Skład chemiczny badanej stali zamieszczono w tablicy II.

Zakres badań obejmował określenie zarówno możliwości utwardzenia badanej stali za pomocą obróbki cieplnej jak też i cech technologicznych złącza spawanego. W ramach oceny przeprowadzono dwie grupy eksperymentów. We wstępnych badaniach oceniono hartowność stali 28HGVB metodą Jominy'ego oraz możliwość uzyskania utwardzenia na drodze hartowania z austenitizacją w temperaturze 880 °C i odpuszczania w temperaturze 220 °C, 350 °C i 500 °C. Celem

zastosowania różnych temperatur odpuszczania była ocena możliwości uzyskania zróżnicowanego utwardzenia stali z przeznaczeniem do konkretnych warunków pracy oraz określenie odporności na obciążenia dynamiczne. W drugiej części eksperymentu określono spawalność testowanej stali:

- a) na podstawie wyliczenia równoważnika węglowego wg zależności (1) - $CE = 0,3411$,
 - b) na podstawie badań laboratoryjnych złącza próbnego wykonanych w oparciu o opracowaną instrukcję spawania.
- Złącza spawane poddano próbom przewidzianym normą PN-EN 15614-1:
- badania wizualne VT (PN-EN 970),
 - badania radiograficzne RT (PN-EN 1435),
 - pomiary twardości w złączu spawanym HV (PN-EN 1043-1),
 - badania makroskopowe złącza MA (PN-EN 1321),
 - badania mikroskopowe złącza MI (PN-EN 1321),
 - próba rozciągania RM (PN-EN 895)
 - próba zginania MG (PN-EN 910)

Metodyka badań i wyniki

Podatność stali na utwardzanie metodą obróbki cieplnej oceniano przez pomiar twardości powierzchniowej obrobionych próbek na twardościomierzu HPO 250 metodą Vickers'a. Próbek stali o wymiarach 100x10x3 mm austenitizowano w temperaturze 880 °C, chłodzono w wodzie, a następnie odpuszczanie w temperaturze 500 °C, 350 °C i 220 °C. Do obróbki stosowano piec komorowy

Tablica II. Skład chemiczny stali 28HGVB

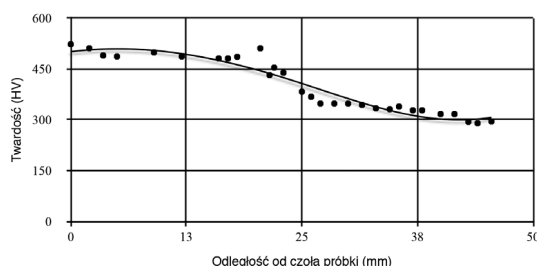
Table II. The chemical composition of the 28HGVB steel

Zawartość pierwiastków, %										
C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni	Cu	V	B
0,25	1,12	0,32	0,027	0,03	0,05	0,46	0,07	0,11	0,08	0,003

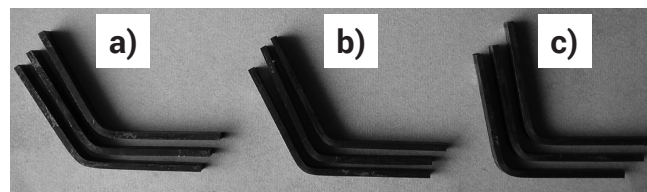
Tablica III. Wyniki pomiarów twardości próbek obrabianych cieplnie

Table III. The results of the hardness measurement of heat-treated samples

Obróbka cieplna	Nr próbki	HV 30	HV śr	Kąt zgięcia	Średni kąt zgięcia
Hartowanie 880 °C odpuszczanie 500 °C	1	332	331	76°	78°30'
	2	333		79°	
	3	329		80°30'	
Hartowanie 880 °C odpuszczanie 350 °C	4	443	426	61°30'	61°37'
	5	393		63°	
	6	441		60°30'	
Hartowanie 880 °C i odpuszczanie 220 °C	7	470	467	58°	55°
	8	480		53°	
	9	449		54°	



Rys. 2. Krzywa hartowności stali 28HGVB
Fig. 2. Hardenability curve for 28HGVB steel




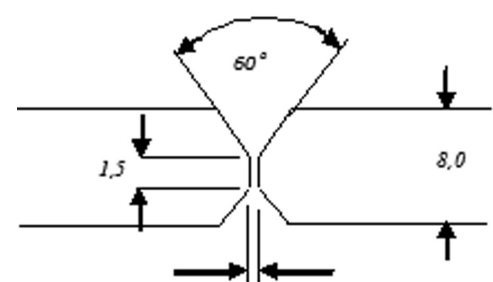
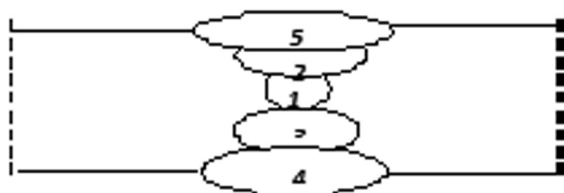
Rys. 3. Próbkę gięte udarowo a) t_{odp} 220 °C - kąt 55°, b) t_{odp} 350 °C - kąt 61°30', c) t_{odp} 350 °C - kąt 78°30'

Fig. 3. The impact bend samples a) t_{temp} 220 °C - angle of 55°, b) t_{temp} 350 °C - angle of 61°30', c) t_{temp} 350 °C - angle of 78°30'

Nabertherm LH 15/14. Próbkę po ocenie twardości obciążano dynamicznie na młocie Harpy'ego PSW 30. O wpływie temperatury odpuszczania na plastyczności próbek świadczy kąt zgięcia – rysunek 3. Żadna z próbek nie uległa pęknięciu. W tabelicy III zestawiono wyniki pomiarów twardości HV30 i odporności na uderzenia próbek stali hartowanych i odpuszczanych. Żadna próbka nie uległa pęknięciu.

Hartowność stali oceniano na próbkach $\varnothing 25 \times 100$ mm metodą chłodzenia od czoła (próba JOMINY'EGO). Na podstawie pomiarów twardości na próbce walcowej wyznaczono krzywą hartowności – rysunek 2.

Tablica IV. Karta Instrukcji Technologii spawania złącza próbnego
Table IV. Welding Procedure Specification test joints

	INSTRUKCJA TECHNOLOGICZNA SPAWANIA	WPS 1/14/UWM		
Wytwórca: LBM WNT Olsztyn Gatunek materiału: 28HGVB, t08 Przygotowanie: czyszczenie mechaniczne Podgrzewanie wstępne: 150 °C Pozycja spawania: PA				
Rysunek złącza	Kolejność spawania			
				
Elektroda: EB 150 $\varnothing 2,5$, $\varnothing 3,25$ (wg EN ISO 2560-A: E42 4 B 42). Po ułożeniu 1 i 2 ściegu wycinać grań i układać ściegi 3-4-5.				
Szczegóły dotyczące spawania				
Ścieg	Metoda	Natężenie A	Napięcie V	Uwagi
1.	111	80 - 90	15	EB 150 $\varnothing 2,5$
2.	111	80 - 90	15	EB 150 $\varnothing 2,5$
3.	111	90 - 110	15	EB 150 $\varnothing 2,5$
4.	111	90 - 110	15	EB 150 $\varnothing 2,5$
5.	111	90 - 110	15	EB 150 $\varnothing 2,5$

Tablica V. Warunki i wyniki badań wizualnych złączy próbných
Table V. Conditions and results of visual testing of test joints

Cel badania: Wykrycie niezgodności powierzchniowych Nazwa obiektu: złącze 111 P BW S 3.1 t08 PA bs gg Metoda spawania: 111 (EB 150) Nazwa elementu: złącze spawane doczołowe Dane identyfikacyjne obiektu: B1, B2, B3		Badania wg PN-EN 970 Oświetlenie- 612 lux Odległość – 300 mm Materiał – stal 28HGVB				
Wyniki badań						
Znak złącza	Rodzaj stwierdzonych niezgodności spawalniczych			PJA wg N-EN 5817		
B1	5012	502	-	-	-	B
B2	-	502	-	-	-	B
B3	-	502	-	-	-	B
Kryterium akceptacji: Poziom jakości PJA B wg PN-EN 5817						

Celem przeprowadzenia oceny praktycznej spawalności stali 28HGVB opracowano próbną instrukcję spawania nr pWPS-1/14/UWM. (tabl. IV).

Wg opracowanej instrukcji wykonano złącza próbne, które poddano badaniom.

Badania wizualne złączy wg PN-EN 970

Złącza próbne po oczyszczeniu poddano analizie wizualnej na obecność zewnętrznych niezgodności spawalniczych. Wyniki oględzin i oceny zamieszczono w tabelicy V.

Badania radiograficzne RT wg PN-EN 1435

Po pozytywnym zakwalifikowaniu złączy na podstawie badań wizualnych powierzchniowych, przekazano je do badań radiograficznych celem wykrycia niezgodności wewnętrznych. Warunki i wyniki badań zestawiono w tablicy VI, a na rysunek 4 - obraz radiogramu.

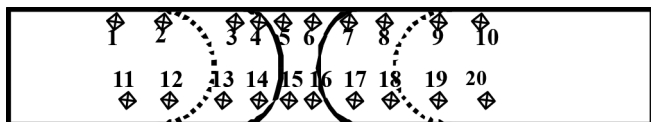


Rys. 4. Radiogram złączy próbnych
Fig. 4. Radiograph of test joint

Pomiary twardości w złączy spawanym HV wg PN-EN 1043-1

Twardość, a w szczególności różnica rozkładu twardości w przekroju złącza dostarcza informacji o jego poprawnej lub błędnej budowie. Wysoka twardość SWC wskazuje na takie zmiany struktury, które mogą wywołać obniżenie podatności na odkształcenia plastyczne, a w efekcie jej pękanie. Wykonano po dwa pomiary twardości w każdej strefie złącza. Przy złączy dwustronnie spawanym, rząd odcisków znajdował się po obydwu stronach - rysunek 5.

Pomiarów twardości dokonano na przekroju poprzecznym przy użyciu twardościomierza HPO 250 metodą Vickers'a HV10. Wyniki zestawiono w tablicy VII.



Rys. 5. Miejsca pomiarów twardości HV10 na przekroju złącza
Fig. 5. Places HV10 hardness measurements on cross section of joint

Tablica VI. Wyniki oceny radiogramów próbnych złączy spawanych
Table VI. The evaluation results of welds radiographic testing

Laboratorium Badań Materiałowych Aparat TRAKIS HETRA MXR 200				PROTOKÓŁ z badań radiograficznych			RT -1	
Lp	Grupa radiograficzna (chyba, że się nie zmieści)	Oznaczenie radiogramu	Klasa badania	Klasa radiogramu			Wykryte niezgodności	PJA wg PN-EN 5817
				IQI mm		Gęstość optyczna		
				wymagana	uzyskana			
1	a	BOR 1	B	0,20	0,20	2,5	502	B
2	a	BOR 2	B	0,20	0,20	2,5	502	B
3	a	BOR 3	B	0,20	0,20	2,5	502	B

Wskaźnik pręcikowy -10FEEN, położenie: od strony źródła,
Badania przeprowadzono zgodnie z normami PN- EN 1435

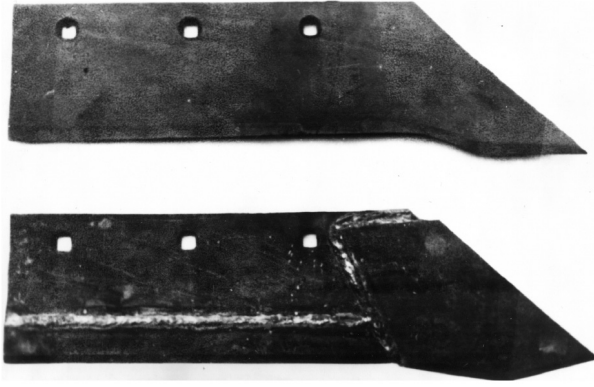
Tablica VII. Rozkład twardości w złączach próbnych wg rysunku 5
Table VII. Distribution of hardness of test joints shown in the figure 5

Twardościomierz : HPO 250 nr fab. 308/336 Siła obciążenia: HV 10, Czas obciążenia 15s. Kryterium twardości: dla stali 28HGVB: max 420 HV					
Miejsce pomiaru	Obszar	Wyniki HV 10			
Materiał rodzimy	1	238	206	224	232
	2	236	233	232	
	9	254	243	232	
	10	238	249	212	
	11	243	240	221	
	12	230	206	221	
	19	232	243	235	
	20	228	236	232	
SWC	3	322	383	348	341
	4	348	376	345	
	7	348	345	327	
	8	342	345	339	
	13	351	342	339	
	14	336	336	351	
	17	330	336	312	
	18	317	319	348	
Spoina	5	236	194	221	222
	6	232	207	219	
	15	253	206	225	
	16	236	207	230	

Badania makroskopowe MA i mikroskopowe MI złączy wg PN-EN 1321

Budowę makroskopową złączy trawionych odczynnikiem Adlera ukazano na przekrojach poprzecznych – rysunek 6.

wania łukowego elektrodą otuloną EB 150 (wg EN ISO 2560-A: E42 4 B 42). Próby połowe potwierdziły wysoką trwałość regenerowanego lemiesza.



Rys. 10. Lemiesz nowy i po próbie regeneracji
Fig. 10. The new ploughshare and after regeneration

Omówienie wyników badań

Badana stal 28HGVB jest interesującym materiałem konstrukcyjnym i narzędziowym, zwłaszcza w aspekcie zastosowania na elementy pojazdów i maszyn wymagające wysokiej wytrzymałości i odporności na ścieranie. Na takie właściwości główny wpływ mają dodatki stopowe, a zwłaszcza bor. Stal 28HGVB wykazuje wysoką wytrzymałość na rozciąganie wynoszącą około 640 MPa, przy wydłużeniu ok. 20%.

Rysunek 2 przedstawia rozkład twardości stali z mikrodotądkiem boru (28HGVB) w funkcji odległości od czoła próbki, zwany krzywą hartowności. Twardość stali zahartowanej w próbie Jominy'ego wynosi na czole próbki 523 HV. Można zatem stwierdzić, że stal 28 HGVB jest stalą o dobrej hartowności, a co za tym idzie możliwości uzyskiwania znacznej twardości na głębokość wymaganą w elementach roboczych maszyn pracujących w trudnych warunkach.

Utwardzania stal mikrostopowa daje możliwość uzyskania wysokiej odporności na zużycie ściernie. Zaprogramowanie twardości stali na różnych poziomach możliwe jest przez odpuszczenie w temperaturze 220 °C, 350 °C czy 500 °C. Dla wymienionych temperatur odpuszczania uzyskano odpowiednio twardość 470 HV, 420 HV i 330 HV. Ocena odporności obrobionej cieplnie stali na uderzenia wykazała, że w badanym zakresie temperatur odpuszczania stal 28HGVB nie wykazała kruchości. Kąt zgięcia był proporcjonalny do temperatury odpuszczania.

Z reguły hartowność jest cechą przeciwną spawalności. Przy niskiej zawartości węgla spawalność jest dobra, a hartowność niska na skutek braku odpowiedniej ilości węgla potrzebnego do przesylenia żelaza α . Przy wysokiej zawartości węgla, hartowność jest dobra, ale podczas krzepnięcia spoiny następuje utwardzanie i pęknięcie SWC.

Spawalność określona równoważnikiem węglowym $CE = 0,34$ mówi o możliwości powstawania kruchości w złączu. Na podstawie uzyskanej informacji opracowano instrukcję spawania powszechnie stosowaną metodą 111 z wstępnym podgrzewaniem złącza do 150 °C.

Badania laboratoryjne mające na celu określenie przydatności stali z borem do spawania przeprowadzono wg normy na uznanie technologii spawania PN-EN ISO 15614-1. Wykonano trzy próby spawania materiału o grubości 8 mm elektrodą otuloną EB 150. Wyniki badań wizualnych, radiograficznych, makroskopowe i mechanicznych wypadły pomyślnie. Złącza zakwalifikowano do poziomu jakości B. Podczas badań makroskopowych złącza spawanego za-

obserwowano trzy charakterystyczne strefy. Pierwsza z nich to materiał rodzimy, druga strefa wpływu ciepła i trzecia spoina. Każdą z tych stref można jednoznacznie wyodrębnić. Badania makroskopowe pozwalają zaobserwować zmiany w materiale, które zaszły podczas procesu spawania. Wywołane one zostały wpływem ciepła, a także pozwalają stwierdzić czy materiał poddany procesowi spawania nie uległ uszkodzeniu w obszarze złącza. Przeprowadzenie badań mikroskopowych pozwoliło zaobserwować różną dyspersję ziaren struktury stali 28 HGVB w trzech charakterystycznych miejscach: w materiale rodzimym, strefie wpływu ciepła oraz spoinie. Struktura jaką zaobserwowano w całości materiału podstawowego to struktura perlityczno-ferrytyczna po normalizacji. Bezpośredni wpływ na dyspersję struktury ma temperatura stygnięcia materiału. Ziarna w materiale rodzimym są największe i najbardziej regularne gdyż na materiał w tej części nie miała wpływu istotna zmiana temperatury podczas procesu spawania. Ziarna struktury materiału rodzimego ukształtowały się w procesie walcowania gdzie nie występowały nagłe spadki temperatury. W strefie wpływu ciepła zmiana temperatury podczas procesu spawania miała największy wpływ na strukturę. Zaobserwowano tutaj strukturę drobno dyspersyjną. Trzecia charakterystyczna strefa w której zaobserwowano odmienną strukturę to spoina. W wyniku spadku temperatury podczas krystalizacji powstała struktura dendrytyczna tzn. ziarna o orientacji zgodnej z kierunkiem odpływu ciepła.

W ocenie rozkładu mikrotworzości stwierdzono utwardzenie złącza w strefach wpływu ciepła, co wskazuje na możliwość wystąpienia kruchości. Próba pozwoliła określić twardość stali 28HGVB w trzech charakterystycznych miejscach, to jest: w materiale rodzimym, strefie wpływu ciepła oraz w spoinie. Zaobserwowano podobną wartość twardości w materiale rodzimym oraz spoinie (około 240 HV), natomiast twardość materiału w strefie wpływu ciepła jest znacznie większa i sięga poziomu 340 HV. Oznacza to, że stal 28 HGVB uległa podhartowaniu w strefie wpływu ciepła co potwierdziły badania mikroskopowe. Różnica twardości stali 28HGVB pomiędzy trzema charakterystycznymi miejscami może wpływać niekorzystnie na wytrzymałość złącza spawanego, gdyż spowoduje jego podatność na pękanie przy obciążeniu [11].

Przeprowadzona próba zginania pozwoliły stwierdzić, że plastyczność złącza pozostała na wymaganym poziomie. Na próbkach nie zaobserwowano żadnych pęknięć na granicy materiału rodzimego i spoiny, a także w samej spoinie.

Jedną z procedur oceny spawalności była próba rozciągania złącza. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono wytrzymałość złącza próbnego na rozciąganie, a przede wszystkim określono wpływ procesu spawania na strukturę łączonego materiału. Po przeprowadzonej próbie rozciągania zaobserwowano, że próbki uległy zerwaniu w materiale rodzimym co świadczy o poprawnej wytrzymałości złącza bez względu na poziom naprężeń. Granica maksymalnej wytrzymałości $R_m=643$ MPa i $R_m=647$ MPa jest na oczekiwanym poziomie dla stali 28HGVB w stanie znormalizowanym. Na granicy strefy wpływu ciepła i spoiny, a także w samej spoinie nie stwierdzono żadnych uszkodzeń (np.: przewężenie próbki, pęknięcia). Granicę plastyczności wynoszącą $R_{0,2} \approx 490$ MPa, należy traktować jako umowną gdyż złącze jest niejednorodne pod względem twardości i odkształcało się nierównomiernie. Stal 28HGVB można określić mianem stali uniwersalnej, gdyż jest to materiał, która charakteryzuje się możliwością utwardzenia, a zarazem dobrą spawalnością i wysoką wytrzymałością przede wszystkim złącz spawanych. Stal ta powinna mieć duże zastosowanie w produkcji przede wszystkim maszyn rolniczych, budowlanych, górniczych [8] i innych pracujących w warunkach wysokich obciążeń i synergicznego

zużycia ścierno - korozyjno - wodorowego. Ze względu na dobrą spawalność może być stosowana na ulepszone cieplnie elementy robocze spawane do korpusów. Cecha ta umożliwia również prowadzenie napraw i regeneracji narzędzi metodami spawalniczymi co zostało potwierdzone w próbie

praktycznej. Spawanie metodą 111 umożliwiło uzyskiwanie złączy próbnych o poziomie jakości B.

Odporność na ścieranie i obciążenia dynamiczne występujące w środowisku pracy danego narzędzia można regulować temperaturą odpuszczania.

Wnioski

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można stwierdzić, że stal 28HGVB z mikrodotądkiem boru:

1. Posiada zarówno dobrą hartowność jak i spawalność.
2. Wykazuje podatność na utwardzanie po hartowaniu i odpuszczaniu do 330-470 HV.
3. Wykazuje wysoką odporność na obciążenia udarowe po obróbce cieplnej.
4. Jest pod względem technologicznym uniwersalnym tworzywem konstrukcyjnym.
5. Może być stosowana na nowoczesne spawane konstrukcje uprawowe, transportowe i budowlane jak również do odtwarzania zużytych elementów roboczych.

Literatura

- [1] Brzóda J., Pilarczyk J., Zeman M., Spawalnicze wykresy przemian austenitu CTPc-S. Wyd. Śląsk. Katowice 1983 s. 7-9, 24-25.
- [2] Choi H.S. and other. Evaluation of weldability for resistance spot welded single-lap joint between GA780DP and hot-stamped 22MnB5 steel sheets Journal of Mechanical Science and Technology 25 (6) (2011) 1543 - 1550.
- [3] Dutka K., Stabryła J. Jakość złączy w procesie wytwarzania i napraw konstrukcji spawanych. Konferencja Wydziału Mechanicznego „Dokonanie techniki i technologii w przemyśle i rolnictwie”. Olsztyn 1996.
- [5] Konat Ł., Pękalski G., Structures and selected properties of Hardox steels in the context of their use in surface mining machinery construction. XV International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection (MPES 2006), 20 - 22 September 2006, Torino – Italy, vol. 1, str. 142÷147.
- [6] Kupczyk J., Lis A.K. Wpływ boru na kinetykę przemian fazowych stali 1021. 12- th International Scientific Conference AMME 2003 s.547-550.
- [7] Lee H. W., Kim Y. H., Lee S. H., Lee S. K., Lee K. H., Park J. U. and Sung J. H., Effect of boron contents on weldability in high strength steel, Journal of Mechanical Science and Technology, 21 (2007) p.771-777'
- [8] Pękalski G., Wybrane zagadnienia materiałowe elementów maszyn górnictwa odkrywkowego narażonych na zużywanie ściernie, a możliwości zastosowania stali Hardox. Górnictwo Odkrywkowe, nr 4/5, str. 47-53, 2005.
- [9] PN-EN ISO 15614-1:2008 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Badanie technologii spawania. Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu.
- [10] Satora R. Ryś J., Bor jako pierwiastek stopowy w stalach. Referat III Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Stalowa Wola, 1980, s. 5-27.
- [11] Stabryła J. Dutka K.: Analiza awarii konstrukcji spawanych. Przegląd Spawalnictwa. 6/2008, s. 15-21.
- [12] Stabryła J, Starczewski L, Łunarska E, Wpływ agresywnego środowiska gleby na zużycie narzędzi rolniczych. Trybologia. Zeszyt 3 2005 r.
- [13] Stabryła J. Quality of steel for agriculture machine elements . Chapter 3. "Quality materials improvement 2007" pod redakcją S. Borkowski, H.Dyja. Edis University of Zilina, 2007. p. 20-26.
- [14] Tasak E.: Spawalność stali. Wydawnictwo FOTOBIT, Kraków 2002.
- [15] Węglowski M. St.: Nowoczesne stale ulepszone cieplnie - własności, korzyści z zastosowania. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2012. nr 3.
- [16] Willms R.: High strength steel for steel constructions. Nordic Steel Construction Conference - NSCC, 2009, 597-604.
- [17] Wolak Z., Stabryła J., Technologia stosowana w produkcji lemiesz, a właściwości tworzywa i trwałość narzędzia. Rocznik Nauk Rolniczych 1988, t. 77-C-4, s. 191-205.