

# Spawanie hartowanej stali Boron 27 Dobór spoiwa i parametrów spawania

## Welding Boron 27 steel in the hardened state Selection of filler and welding parameters

### Streszczenie

Przeprowadzono badania w zakresie doboru spoiwa i parametrów spawania hartowanej stali Boron 27, a także zbadano właściwości wytrzymałościowe otrzymanych połączeń doczołowych. Zastosowano spoiwa ESAB OK. Autorod 12.64, ESAB OK. AristoRod 13.29, BÖHLER X 70-IG, EASB OK. Tubrod 15.14. Dla spoiwa EASB OK. Tubrod 15.14 nie uzyskano poprawnych parametrów spawania w zakresie badań wizualnych. W wyniku badań na rozciąganie próbek stwierdzono, że pękały one w strefie wpływu ciepła, a właściwości wytrzymałościowe nie różniły się w sposób istotny dla wszystkich zastosowanych spoiw. Badania na zginanie pokazały jednak, że pozytywnie przeszły próbę próbki spawane spoiwami ESAB OK. Autorod 12.64 i ESAB OK. AristoRod 13.29.

**Słowa kluczowe:** stal hartowania, spoiwo, parametry

### Abstract

The research was conducted in the field of the selection of filler and welding parameters for hardened Boron 27 steel. The endurance properties of the obtained frontal joints were also tested. The following fillers were applied: ESAB OK. Autorod 12.64, ESAB OK. AristoRod 13.29, BÖHLER X 70-IG, EASB OK. Tubrod 15.14. Appropriate welding parameters were not attained for the filler EASB OK. Tubrod 15.14 (visual examination). The tensile strength tests on the samples resulted in their fractures in the heat-affected zones. The endurance properties did not significantly vary as far as all the applied fillers are concerned. However, the bending strength tests gave a positive result for the samples welded with the following fillers: ESAB OK. Autorod 12.64 and ESAB OK. AristoRod 13.29.

**Key words:** hardened steel, filler metal, parameters

### Wstęp

Elementy maszyn rolniczych, takie jak: lemiesz pługów, części bron, kultywatorów, elementy robocze kosiarzek, zgrabiarek, przetrząsaczy itp., pracują w warunkach sprzyjających intensywnemu procesowi zużywania ściernego. Stykają się ciągle z materiałami w postaci ziaren piasku, różnymi częściami roślin, w tym z twardymi łodygami krzewów i młodych drzew. Od takich elementów wymagana jest zatem duża odporność na ścieranie, a ze względu na znaczne obciążenia zewnętrzne podczas ich eksploatacji – charakteryzować się powinny korzystnymi właściwościami wytrzymałościowymi.

Odporność na zużywanie ściernie elementów maszyn jest zależna od twardości względnej materiału ściernego (w stosunku do materiału ulegającego zużyciu), nacisków jednostkowych, częstości wymiany tych produktów w obszarach tarcia, prędkości poślizgu i wielu innych

czynników. W przypadku elementów maszyn rolniczych, na niektóre z warunków sprzyjających zużyciu ściernemu nie mamy wpływu, możemy jedynie wpływać na twardość materiału tych elementów. Ponieważ między względną odpornością na zużycie ściernie a twardością stali różnych gatunków występuje liniowa zależność [1], na elementy maszyn narażone na zużywanie ściernie należy stosować materiały o możliwie największej twardości.

Dużą twardość stali uzyskuje się w procesie hartowania. Po hartowaniu stal wykazuje jednak bardzo małą plastyczność. Niektóre elementy robocze maszyn rolniczych mają przestrzenne kształty i mogą być wykonywane tylko metodą tłoczenia przy zastosowaniu dodatkowo spawania przy ich łączeniu. Przy małej plastyczności materiału technologia tłoczenia nie jest możliwa do zastosowania.

Dobrą plastycznością charakteryzuje się stal borowa Boron 27. Ponadto, jak podaje producent, stal ta jest spawalna i nadaje się do hartowania. Po hartowaniu można uzyskać twardość 380 HB.

Mgr inż. Wojciech Czaplejewicz, dr hab. inż. Zdzisław Kondrat – Politechnika Białostocka.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: wojtek-ivona@o2.pl

Możliwość spawania stali Boron 27 potwierdzają wyniki badań przedstawione w [2]. Autorzy tej pracy przeprowadzili także hartowanie spawanych doczołowo płyt. Okazało się jednak, że w wyniku hartowania płyty uległy znacznemu zniekształceniu. Wykonano również próbę spawania dwóch wyłotczek stanowiących półwyroby do zespołu tnącego kosiarki, a następnie poddano je zahartowaniu. Wystąpiły tak duże odkształcenia, że część ta nie nadawała się do montażu. Zahartowano oddzielnie dwie wyłotczki i pospawano je. Odkształcenia powstałe w detalu były znikome i akceptowalne. Dlatego też podjęto badania w zakresie doboru spoiwa i parametrów spawania hartowanej stali Boron 27 oraz określenia właściwości wytrzymałościowych otrzymanych połączeń doczołowych.

## Charakterystyka stali Boron 27

Równoważnik węgla CEV dla stali Boron 27 wynosi 0,56, a jej skład chemiczny zawarto w tablicy I.

Stal ta wykazuje takie korzystne cechy, jak:

- w stanie po hartowaniu wykazuje bardzo dobrą odporność na ścieranie;
- w stanie niehartowanym można ją tłoczyć;
- ze względu na niską zawartość węgla jest spawalna.

Do wykonania złączy spawanych użyto blachy o grubości 4 mm.

## Wybór spoiwa

Dobierając spoiwo do spawania materiałów konstrukcyjnych, należy wziąć pod uwagę w pierwszej kolejności jego granicę plastyczności  $R_e$ . Wartość granicy plastyczności spoiwa nie powinna być niższa niż dla materiału spawanego. Teoretycznie można dopuścić spoiwo o niższej granicy plastyczności, gdy naprężenia eksploatacyjne w spoinach są małe i nie są one krytyczne dla konstrukcji. Mniejsze znaczenie w doborze spoiwa ma jego wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , ponieważ stosunek granicy

plastyczności do wytrzymałości spoiwa jest na ogół wyższy niż dla materiału podstawowego.

Drugą istotną wielkością jest udarność (KV) spoiwa w określonej temperaturze, będąca miernikiem jego przydatności do spawania stali przeznaczonej na konstrukcje narażone na pękanie. Spoiwo dobrane według tego kryterium powinno mieć wyższą udarność niż materiał podstawowy. W przypadku spawania różnych gatunków stali należy przyjąć zasadę, że właściwości mechaniczne spoiwa ( $R_e$ ,  $R_m$ , KV) powinny spełniać wymagania dla tej o wyższych właściwościach.

Dobór spoiwa pod względem dopasowania składu chemicznego nie jest tak prosty jak w przypadku doboru wytrzymałości i udarności. Węgiel, niezależnie od przeznaczenia i wytrzymałości spoiwa, niekorzystnie wpływa na spawalność, podnosząc skłonność do pęknięcia spoin. Występuje w spoiwie z reguły w ilości nie większej niż 0,1%.

Wzrost wytrzymałości spoiwa uzyskuje się przez zwiększenie zawartości manganu. Mangan, podobnie jak krzem, ulega częściowemu wypaleniu w aktywnych atmosferach łuku elektrycznego, więc jego zawartość w spoiwie powinna być wyższa niż w spawanym materiale.

Do spoiw o wysokiej wytrzymałości wprowadza się również dodatek molibdenu, a nawet chromu. Przy zwiększonej zawartości Mn, Cr i Mo pogarsza się jednak spawalność w wyniku wzrostu hartowności, dlatego do spoiwa wprowadza się również nikiel, który zmniejsza krytyczną szybkość chłodzenia, poprawia plastyczność i podnosi odporność spoiny na pękanie.

Dobór spoiwa według powyższych kryteriów nie jest oczywisty, szczególnie, że materiałem spawanym jest stal w stanie zahartowanym. Hartowana stal borowa, jak pokazano w tablicy II, ma bardzo wysokie wartości  $R_e$  i  $R_m$  i żadne spoiwo, z proponowanych przez producenta stali, nie sprostą wymaganiom wytrzymałościowym.

Korzystając ze standardowych krzywych twardość-odpuszczenie (rys. 1), można przypuszczać, że w SWC wartości  $R_e$  i KV będą nieznacznie wyższe od tych dla rodzimego materiału nieobrobionego cieplnie. Biorąc pod uwagę powyższe rozważania, dobrano spoiwa:

- ESAB OK Autorod 12.64 – dalej oznaczane w badaniach Z12 – G4Si1 wg PN-EN ISO 14341:2011 [4],

**Tablica I.** Zawartość składników stopowych wg atestu materiałowego  
**Table I.** Content of alloy constituents according to material certificate

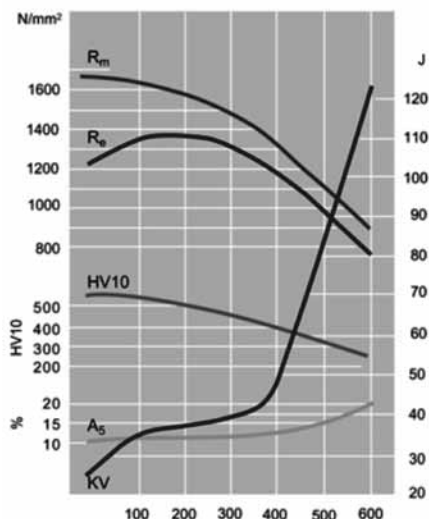
Zawartość składników stopowych, % wag.												
C	Si	Mn	P	S	Al	V	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo	B
0,284	0,26	1,25	0,008	0,007	0,042	0,011	0,044	0,026	0,31	0,05	0,005	0,0022

**Tablica II.** Właściwości mechaniczne – dane producenta i badania własne  
**Table II.** Mechanical properties – manufacturer's data and own research

Stan materiału	Granica plastyczności $R_e$ , MPa	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , MPa	Wydłużenie $A_5$ , %	Twardość HB	Udarność		
					T, °C	KV, J	
B27 niehartowana	ok. 420	ok. 620	25	170	-	-	
B27 hartowana	olej	1000	1250	8	380	-	-
	woda	1200	1600	6	460	- 40	20
	woda, badania własne	1197	1678	-	-	-	-

- ESAB OK AristoRod 13.29 (69) – dalej oznaczane w badaniach Z69 – G 69 4 M Mn3Ni1CrMo wg PN-EN ISO 14341:2011 [4],
- BÖHLER X 70-IG – dalej w badaniach oznaczane ZX70 – G 69 5 M Mn3Ni1CrMo wg PN-EN ISO 14341:2011 [4],
- ESAB OK Tubrod 15.14 – dalej w badaniach oznaczane Z15 – T 46 2 PM 1 H5 wg PN-EN ISO 17632:2011 [5].

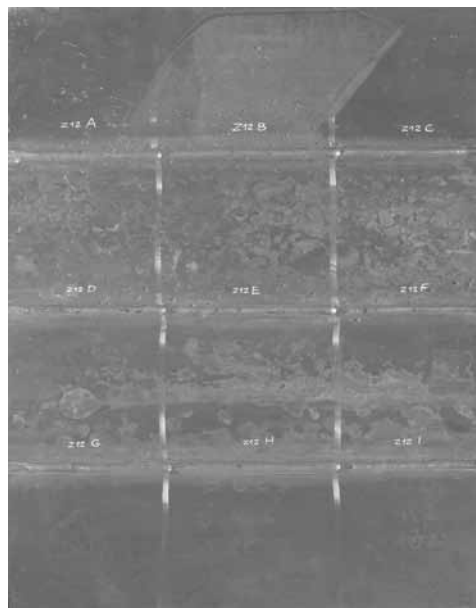
Do spawania użyto zalecanej przez producenta mieszanki gazowej M21 o składzie 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub> wg PN-EN ISO 14175:2009 [6].



**Rys. 1.** Standardowe krzywe twardość-odpuszczanie dla gatunków stali borowych B27 w temperaturze austenitizowania 920°C [3]: R<sub>m</sub> – wytrzymałość na rozciąganie N/mm<sup>2</sup>; R<sub>e</sub> – granica plastyczności, N/mm<sup>2</sup>; A<sub>s</sub> – wydłużenie, %; KV – uderność, J (+20°C); HV – twardość  
**Fig. 1.** Standard curves hardness-tempering for types of B27 boron steel at austenitising temperature of 920°C [3]: R<sub>m</sub> – tensile strength, N/mm<sup>2</sup>; R<sub>e</sub> – yield point, N/mm<sup>2</sup>; A<sub>s</sub> – elongation, %; KV – impact resistance, J (+ 20°C); HV – hardness

## Dobór parametrów spawania dla poszczególnych spoiw

Do spawania użyto zahartowanych w wodzie do twardości 50±2 HRC płyt o wymiarach 150 x 300 mm z blachy o grubości 4 mm. Łączono je ze sobą spoinami o długości 100 mm metodą 135, przy czym każda spoina wykonana została przy innych parametrach spawania (tabl. III+VI). Dla każdego spoiwa wykonano jedną płytę próbną (składającą się z trzech płyt 150 x 300 mm), a na niej 9 spoin (rys. 2).



**Rys. 2.** Przykładowa płyta próbną dla spoiwa Z12  
**Fig. 2.** Specimen of sample slab for filler Z12

**Tablica III.** Parametry spawania płyt próbných dla spoiwa Z12  
**Table III.** Welding parameters of sample slabs for filler Z12

Parametry	Zwarcie						Puls		
	Z12A	Z12B	Z12C	Z12D	Z12E	Z12F	Z12G	Z12H	Z12I
Prąd spawania, A	130	120	110	160	150	140	130	120	110
Napięcie łuku, V	19,1	18,8	18,5	20,3	19,7	19,4	25,2	24,6	24,0
Prędkość podawania drutu, m/min	4,4	4,0	3,6	5,7	5,2	4,8	5,0	4,6	4,2
Prędkość spawania, cm/min	ok. 25								
Natężenie wypływu gazu, l/min	12-15								

**Tablica IV.** Parametry spawania płyt próbných dla spoiwa Z69  
**Table IV.** Welding parameters of sample slabs for filler Z69

Parametry	Zwarcie						Puls		
	Z69A	Z69B	Z69C	Z69D	Z69E	Z69F	Z69G	Z69H	Z69I
Prąd spawania, A	130	120	110	160	150	140	130	120	110
Napięcie łuku, V	19,1	18,8	18,5	20,3	19,7	19,4	25,2	24,6	24,0
Prędkość podawania drutu, m/min	4,4	4,0	3,6	5,7	5,2	4,8	5,0	4,6	4,2
Prędkość spawania, cm/min	ok. 25								
Natężenie wypływu gazu, l/min	12-15								

**Tablica V.** Parametry spawania płyt próbnych dla spoiwa ZX70  
**Table V.** Welding parameters of sample slabs for filler ZX70

Parametry	Zwarcie						Puls		
	ZX70A	ZX70B	ZX70C	ZX70D	ZX70E	ZX70F	ZX70G	ZX70H	ZX70I
Prąd spawania, A	130	120	110	160	150	140	130	120	110
Napięcie łuku, V	18,1	17,8	17,5	19,1	18,8	18,5	23,9	23,4	22,7
Prędkość podawania drutu, m/min	4,5	4,0	3,7	6,0	5,5	5,0	7,0	6,4	5,7
Prędkość spawania, cm/min	ok. 25								
Natężenie wypływu gazu, l/min	12-15								

**Tablica VI.** Parametry spawania płyt próbnych dla spoiwa Z15  
**Table VI.** Welding parameters of sample slabs for filler Z15

Parametry	Zwarcie						Puls		
	Z15A	Z15B	Z15C	Z15D	Z15E	Z15F	Z15G	Z15H	Z15I
Prąd spawania, A	175	165	155	205	195	185	175	165	155
Napięcie łuku, V	19,3	18,7	18,3	20,9	20,5	19,9	24,7	24,3	23,9
Prędkość podawania drutu, m/min	4,5	4,1	3,8	5,6	5,3	4,9	5,9	5,6	5,3
Prędkość spawania, cm/min	ok. 25								
Natężenie wypływu gazu, l/min	12-15								

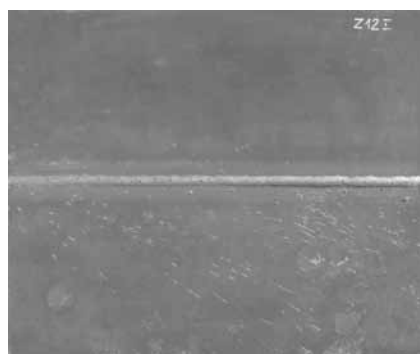
**Tablica VII.** Parametry spawania, dla których spoina spełnia kryteria akceptacji  
**Table VII.** Welding parameters to be attained for weld to meet criteria for acceptance

Spoiwo	Proces	Średnica drutu, mm	Prąd spawania, A	Napięcie łuku, V	Rodzaj prądu/biegunowość	Prędkość pod. drutu m/min	Prędkość spawania cm/min	Energia liniowa kJ/cm
Z12	135	1,0	120	18,8	DC/+	4	~25	max 4,0
Z69	135	1,0	120	18,8	DC/+	4	~25	max 4,3
ZX70	135	1,0	130	18,1	DC/+	4,5	~25	max 4,7

Do spawania zastosowano źródło ESAB AristoMig 500iw.

Każdą spoinę poddano badaniom wizualnym wg PN-EN ISO 17637:2011 [7]. Wybrano parametry spawania, dla których spoina spełnia kryteria akceptacji – poziom jakości B wg PN-EN ISO 17637:2011 [7]; zawarto je w tablicy VII.

Dla spoiwa Z15 nie znaleziono parametrów, przy których spoiny można byłoby uznać za poprawne. Spoino to nie będzie brane pod uwagę w dalszych badaniach.



**Rys. 3.** Przykładowa płyta kontrolna  
**Fig. 3.** Example of control slab

## Wyniki badań złączy płyt kontrolnych

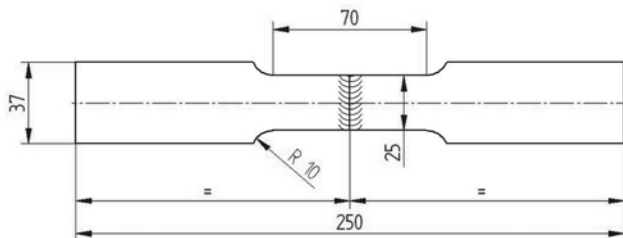
Stosując zestawione w tablicy VII parametry, spawano 6 płyt, uzyskując po dwie płyty kontrolne dla każdego rodzaju spoiwa i oznaczono je symbolami: Z12-I, Z12-II, Z69-I, Z69-II, ZX70-I, ZX70-II. Przykładową płytę kontrolną pokazano na rysunku 3.

Badania rentgenowskie wykonano w akredytowanym Laboratorium Badań Nieniszczących Instal Białystok S.A. Wyniki badań zestawiono w tablicy VIII.

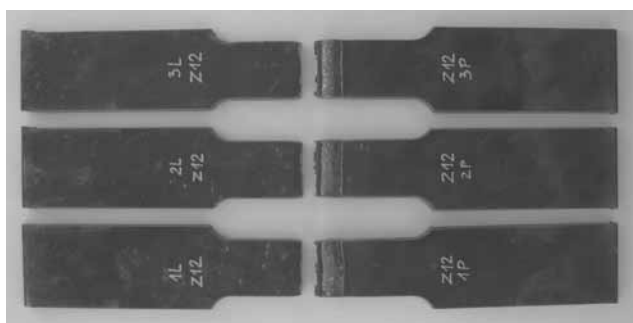
**Tablica VIII.** Wyniki badań rentgenowskich  
**Table VIII.** X-ray examination results

Nr płyty kontrolnej	Stwierdzone niezgodności	Poziom jakości	Nr protokołu
Z12-I	515	B	314/10
Z12-II	5013	B	
Z69-I	5011	B	315/10
Z69-II	2011	B	
ZX70-I	5011	B	316/10
ZX70-II	5011	B	

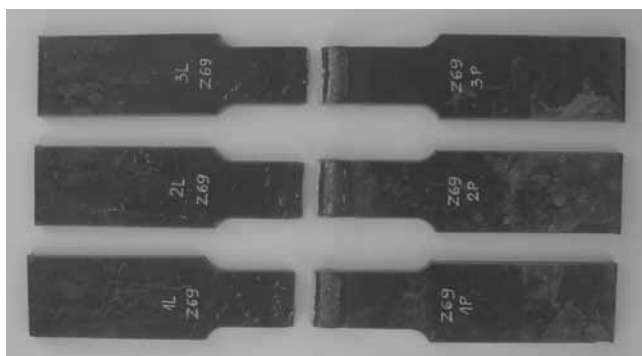
Przeprowadzono wg PN-EN ISO 4136:2011 [8] badania wytrzymałości na rozciąganie próbek ze złączy spawanych. W tym celu z każdej płyty kontrolnej wycięto po 3 próbki o kształcie i wymiarach wg rysunku 4. Wszystkie próbki pękły w odległości ok. 6 mm od osi spoiny (rys. 5÷7). Wyniki zestawiono w tabelicy IX.



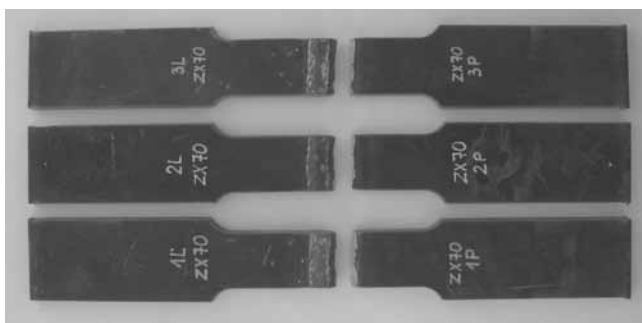
Rys. 4. Próbką do badań na rozciąganie (rozrywanie)  
Fig. 4. Sample for tensile (tearing apart) strength tests



Rys. 5. Zerwane próbki łączone spoiwem Z12  
Fig. 5. Torn samples joined with filler Z12



Rys. 6. Zerwane próbki łączone spoiwem Z69  
Fig. 6. Torn samples joined with filler Z69



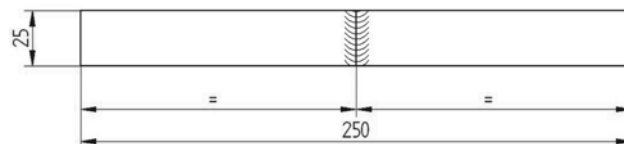
Rys. 7. Zerwane próbki łączone spoiwem ZX70  
Fig. 7. Torn samples joined with filler ZX70

Tablica IX. Wyniki próby rozciągania  
Table IX. Tensile test results

Oznaczenie próbki	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , MPa	Umowna granica sprężystości $R_{0,05}$ , MPa	Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ , MPa
Z12 Pr. nr 1	918	637	738
Z12 Pr. nr 2	925	588	718
Z12 Pr. nr 3	943	562	722
<b>Średnia</b>	<b>928,7</b>	<b>595,7</b>	<b>726</b>
Z69 Pr. nr 1	930	525	683
Z69 Pr. nr 2	922	519	630
Z69 Pr. nr 3	958	604	745
<b>Średnia</b>	<b>936,7</b>	<b>549,3</b>	<b>686</b>
ZX70 Pr. nr 1	965	596	735
ZX70 Pr. nr 2	962	596	728
ZX70 Pr. nr 3	967	605	739
<b>Średnia</b>	<b>964,7</b>	<b>599</b>	<b>734</b>

Przeprowadzono również próbę zginania wg PN-EN ISO 5173:2011 [9]. Polega ona na zginaniu próbek od strony lica i grani spoiny do kąta 135°. Na rysunku 8 pokazano wymiary próbek.

Próbkę zginania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Instron 8502. Podczas próby zginania próbki obserwowano słabą sprężystość, uzyskując kąt zgięcia 120° (rys. 9÷11). Próbki Z12 i Z69 przeszły próbę zginania pozytywnie (nie wystąpiły pęknięcia). Dwie próbki Z70 pękły przy zginaniu od strony lica. Wyniki próby zestawiono w tabelicy X.



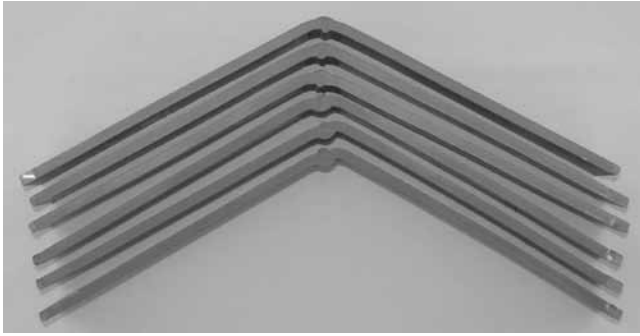
Rys. 8. Próbką do zginania  
Fig. 8. Bent sample



Rys. 9. Zgięte próbki Z12. Od góry: trzy próbki zgięte od strony grani, od dołu: trzy próbki zgięte od strony lica spoiny

Fig. 9. Bent samples Z12. From the top: three samples bent from the ridge side, from the bottom: three samples bent from the weld cap side





**Rys. 10.** Zgięte próbki Z69. Od góry: trzy próbki zgięte od strony grani, od dołu: trzy próbki zgięte od strony lica spoiny

**Fig. 10.** Bent samples Z69. From the top: three samples bent from the ridge side, from the bottom: three samples bent from the weld side



**Rys. 11.** Zgięte próbki ZX70. Od góry: trzy próbki zgięte od strony grani, od dołu: trzy próbki zgięte od strony lica spoiny – widoczne pęknięcia

**Fig. 11.** Bent samples ZX70. From the top: three samples bent from the ridge side, from the bottom: three samples bent from the weld side – visible fractures

**Tablica X.** Zestawienie wartości średnich po próbie rozciągania  
**Table X.** Juxtaposition of mean values after tensile test

Materiał	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , MPa			Umowna granica sprężystości $R_{0,05}$ , MPa			Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ , MPa		
	Z12	Z69	ZX70	Z12	Z69	ZX70	Z12	Z69	ZX70
Boron 27 hartowany spawany	928,7	936,7	964,7	595,7	549,3	599	726	686	734
Boron 27 hartowany (materiał rodzimy)	1678,0			962,5			1197,5		

## Podsumowanie

W konstrukcjach spawanych wiele czynników ma wpływ na jakość złącza spawanego. Jednym z najważniejszych jest właściwy dobór spoiwa i parametrów spawania. W badaniach poświęcono wiele uwagi tym zagadnieniom. Spoiwo dobrano zgodnie z wytycznymi, ale też skorzystano z doświadczenia technologów spawalników i specjalistów firm produkujących materiały dodatkowe do spawania.

Parametry spawania ustalono doświadczalnie na podstawie badań wizualnych próbek. Dowodem na spełnienie wymagań są wyniki badań rentgenowskich spawanych płyt kontrolnych wykonane przez akredytowane, niezależne laboratorium.

Próba rozciągania pokazała, że stal Boron 27 – spawana w stanie zahartowanym – nie zachowuje się tak jak inne spawane materiały konstrukcyjne. Miejsce rozerwania próbek znajduje się w końcowej części strefy wpływu ciepła, co jest cechą charakterystyczną tylko dla tego przypadku.

Niezależnie od rodzaju użytego spoiwa właściwości mechaniczne są niemal identyczne dla wszystkich próbek. Wytrzymałość na rozciąganie stali borowej hartowanej i spawanej stanowi zaledwie ok. 54% wytrzymałości hartowanego materiału rodzimego, podobnie jest w przypadku pozostałych właściwości zestawionych w tablicy X.

## Literatura

- [1] Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużycia maszyn, Warszawa-Radom 2007.
- [2] Chalecki M., Czajkiewicz W., Pawłuszewicz A.: Spawanie stali hartowanych. Przegląd Spawalnictwa 12/2008.
- [3] Materiały katalogowe firmy RUUKKI, www.ruukki.com.
- [4] PN-EN ISO 14341:2011 Materiały dodatkowe do spawania. Druty elektrodowe i stopiwo do spawania łukowego elektrodą metalową w osłonie gazu stali niestopowych i drobnziarnistych. Klasyfikacja.

- [5] PN-EN ISO 17632:2011 Materiały dodatkowe do spawania. Druty elektrodowe proszkowe do spawania łukowego elektrodą metalową, w osłonie gazu i bez osłony gazu, stali niestopowych i drobnziarnistych. Klasyfikacja.
- [6] PN-EN ISO 14175:2009 Materiały dodatkowe do spawania. Gazy i mieszaniny gazów do spawania i procesów pokrewnych
- [7] PN-EN ISO 17637:2011 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne złączy spawanych.
- [8] PN-EN ISO 4136:2011 Badania niszczące złączy spawanych metali. Próba rozciągania próbek poprzecznych.
- [9] PN-EN ISO 5173:2010 Badania niszczące spoin w materiałach metalowych. Badanie na zginanie.