

# Spawalność i wybrane właściwości złączy stali ulepszanych cieplnie

## Weldability and some properties of welded joints of quenched and tempered steel

### Streszczenie

W artykule przedstawiono trudności występujące przy spawaniu stali wysokowytrzymałych ulepszanych cieplnie. Omówiono problem stosowania odpowiedniego równania do wyznaczenia wartości równoważnika węgla. Przedstawiono różne metody wyznaczenia temperatury wstępnego podgrzewania w zależności od warunków spawania, w celu uniknięcia pęknięć zimnych oraz uzyskania złączy o wysokich właściwościach wytrzymałościowych. Oceniono plastyczność złączy spawanych niskimi parametrami bez podgrzewania wstępnego na podstawie badania udarności.

**Słowa kluczowe:** stale ulepszone cieplnie, równoważnik węgla, temperatura podgrzewania wstępnego, właściwości mechaniczne

### Abstract

This article describes the problems of welding high strength steel. One of the problem is using correct formula to calculate the carbon equivalent. This paper presents different methods of calculating necessary preheating temperature dependent on welding parameters. Preheating temperature is important in order to avoid cold cracking. The mechanical properties of joints weld without preheating temperature was rated.

**Keywords:** TMCP, carbon equivalent, preheating temperature, mechanical properties

## Wstęp

Stale o wysokich właściwościach wytrzymałościowych są stosowane w budowie urządzeń, maszyn oraz konstrukcji. Ich zaletą, w stosunku do zwykłych stali konstrukcyjnych, jest możliwość znacznego zmniejszenia wymiarów geometrycznych, masy konstrukcji oraz liczby spoin, a przez to zwiększenia wydajności prac produkcyjnych oraz monterskich konstrukcji.

Podstawowym zabiegiem technologicznym przy spawaniu różnych odmian stali wysokowytrzymałych jest sterowanie energią liniową na poziomie wartości zoptymalizowanych dla danego gatunku materiału tak, aby w wyniku oddziaływania źródła ciepła uzyskać w złączy wymagane właściwości mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie oraz udarność). Z danych literaturowych [1, 2] wynika, że problem powstawania

w strefie złączy struktur o niekorzystnych właściwościach dotyczy zarówno stali ulepszanych cieplnie, jak i walcowanych termomechanicznie.

Proces łączenia stali ulepszanych cieplnie wymaga uwzględnienia kilku istotnych problemów technologicznych:

- doboru materiałów dodatkowych do spawania;
- powstawania pęknięć wodorowych;
- tworzenia się w strefie wpływu ciepła strefy rozhartowanej o niższych właściwościach wytrzymałościowych;
- wyznaczenia wartości równoważnika węgla oraz temperatury wstępnego podgrzewania w celu uniknięcia pęknięć zimnych;
- rozwarstwiania się stali w miejscu segregacji pierwiastków stopowych [3].

Mgr inż. Krzysztof Makles – Politechnika Częstochowska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: krzysztof\_makles@interia.eu

## Dobór materiału dodatkowego do spawania

Wysoka wytrzymałość stali powoduje trudność w doborze odpowiedniego materiału podstawowego, spełniającego wymagania dotyczące wytrzymałości złącza podczas kwalifikowania technologii spawania. W praktyce przemysłowej, dla stali o granicy plastyczności nieprzekraczającej 700 MPa, najczęściej stosuje się spoiwo o wytrzymałości odpowiadającej łączonym materiałom (tabl. I).

Dla stali S960QL i S1100QL, a także dla złączy ze stali S690QL o grubościach powyżej 10 mm, do spawania warstwy przetopowej stosuje się drut G4Si1 wg PN EN ISO 14341, natomiast kolejne warstwy wypełnia się spoiwem o wysokich właściwościach wytrzymałościowych, np. drutem Union X96. Taka technologia wykonania połączenia nie gwarantuje uzyskania wytrzymałości złącza wyższego od materiału rodzimego. Podczas próby rozciągania to spoina jest najczęściej miejscem powstania charakterystycznego dla tej próby miejscowego przewężenia i w efekcie zerwania próbki. W PN EN ISO 15614 dotyczącej kwalifikowania technologii spawania przypadek zerwania próbki w spoinie jest dopuszczalny, pod warunkiem osiągnięcia wytrzymałości złącza odpowiadającej co najmniej minimalnej wytrzymałości materiału rodzimego (najniższa wartość wytrzymałości stali wpisana w atście hutniczym materiału). W procesie spawania na skutek wymieszania materiału podstawowego i dodatkowego uzyskana spoina spełnia powyższe wymaganie.

Zastosowanie drutu G4Si1, dzięki dużej plastyczności spoiwa, pozwala uzyskać dobrą udamność, ograniczyć spawalnicze naprężenia wewnętrzne przez zmniejszenie sztywności spoiny, a także zmniejszyć ryzyko powstawania pęknięć zimnych w spoinie, wynikających z przesztynienia złącza (duża wartość naprężeń wewnętrznych) oraz wysokiej wartości równoważnika węgla materiału dodatkowego (tabl. II). Aby uzyskać odpowiednie właściwości wytrzymałościowe spoiwa, druty elektrodowe zawierają mikrorododatki stopowe, takie jak wanad, niob oraz inne [4], które zwiększają wytrzymałość mechaniczną. Wprowadzenie dużej zawartości pierwiastków stopowych powoduje jednak pogorszenie właściwości spawalniczych materiałów dodatkowych o  $R_e$  powyżej 900 MPa. Z tego powodu, w praktyce często spoiny wypełniające wykonuje się materiałem dodatkowym o niższych właściwościach wytrzymałościowych od materiału rodzimego (druty oznaczone \* w tabl. II).

## Określenie równoważnika węgla

W licznych publikacjach oraz normach i wytycznych dotyczących spawania stali ulepszonych cieplnie równoważnik węgla wyznacza się ze wzorów zamieszczonych w PN EN 1011 – 2:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} [\%]$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} [\%]$$

Oba wyrażenia umożliwiają ocenę skłonności stali do tworzenia struktur hartowniczych – martenzytu lub bainitu. Na podstawie prób spawalności oraz praktyki przemysłowej określono dla wyrażenia  $C_e$  następujące kryteria [1, 5]:

$0,45 \geq C_e$  – stale dobrze spawalne; podgrzewanie przed spawaniem jest niewymagane (dla stali o grubości do 25 mm);

$0,45 < C_e < 0,6$  – stale o ograniczonej spawalności, należy wykonać podgrzewanie materiału przed spawaniem oraz stosować procesy niskowodorowe;

– stale trudno spawalne, dla których wykonuje się oprócz podgrzewania także zabiegi obróbki cieplnej po spawaniu;

$0,8 < C_e$  – stale bardzo trudno spawalne, dla których pomimo wykonania wszystkich wyżej wymienionych zabiegów rezultat procesu spawania jest niepewny, trudno uzyskać złącze pozbawione pęknięć.

W pracy [6] podano pełną postać wzoru  $C_e$ , zawierającą także współczynnik kobaltu:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Co}{150}$$

Znając wartość  $C_e$ , temperaturę wstępnego podgrzewania wyznaczyć można za pomocą empirycznego wyrażenia Seferiana:

$$T = 350 \sqrt{C_e(1 + 0,005 \cdot g) - 0,25} [^{\circ}\text{C}]$$

gdzie:

$g$  – grubość blachy [mm].

Znane są także zależności pozwalające określić twardość w strefie wpływu ciepła:

$$HV_{max} = 1200 \cdot C_e - 200$$

$$HV_{min} = 1200 \cdot C_e - 260$$

Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że wyrażenia te mogą być stosowane dla stali o ograniczonej zawartości pierwiastków stopowych i mikrorododatków, a przede wszystkim boru (tabl. III) [7].

W pracy [1] zauważono, że dla nowoczesnych gatunków stali, w których wprowadza się coraz większe ilości dodatków mikrostopowych i pierwiastków zwiększających hartowność stali, należy wprowadzać inne sposoby oceny spawalności, w tym także stosować inne wzory na równoważnik węgla.

**Tablica I.** Zestawienie materiałów dodatkowych stosowanych do łączenia stali S690QL**Table I.** Filler materials for welding S690QL steel

Marka	Nazwa handlowa	R <sub>e</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	KV, J	A5, %	C <sub>e</sub>		
						(1)	(2)	
Lincoln	LNM MoNiVa	710	790	70 (-40°C)	20	0,59	0,32	
	LNM NiMo1	690	790	50 (-40°C)	16	0,51	0,29	
	Outersshield 690 H	800	830	60 (-40°C)	17	0,54	0,31	
Thyssen	Union NiMoCr	CO <sub>2</sub>	680	740	45 (-40°C)	18	0,60	0,30
		M21	720	780	45 (-60°C)	16		
Böhler	X 70-IG		800	900	>47 (-50°C)	19	0,57	0,32
	NiCrMo 2.5-IG	CO <sub>2</sub>	780	890	>47 (-40°C)	18	0,62	0,30
		M21	810	910	>47 (-60°C)	17		
ESAB	OK AristoRod 13.29	700	800	60 (-30°C)	19	0,59	0,32	
Oerlikon	Carbofil NiMoCr	>690	830	>47 (-40°C)	17	0,55	0,28	
	Carborod NiMo2	730	820	>90 (-40°C)	16	0,61	0,31	
	Carbofil NiMo2	≥720	≥750	≥70 (-40°C)	≥16	0,54	0,27	
(1) C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15								
(2) C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40								

**Tablica II.** Zestawienie litych drutów elektrodowych stosowanych do łączenia stali S960QL**Table II.** Filler materials for welding S960QL steels

Marka	Nazwa handlowa	R <sub>e</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	KV, J	A5, %	C <sub>e</sub>	
						(1)	(2)
Lincoln	LNM MoNiCr	>890	950	70 (-40°C)	15	0,71	0,34
Thyssen	Union X 90 *	890	950	50 (-50°C)	15	0,74	0,36
	Union X 96	930	980	50 (-50°C)	14	0,79	0,39
Böhler	X 90-IG *	915	960	>47 (-60°C)	20	0,74	0,35
ESAB	OK AristoRod 13.31 *	850	890	50 (-30°C)	18	0,76	0,36
	OK AristoRod 89 *	920	1000	60 (-40°C)	16	0,75	0,36
Oerlikon	Carbofil 2NiMoCr *	>890	≥940	≥47 (-40°C)	≥15	0,68	0,31
	Carbofil 3NiMoCr	≥930	≥980	≥47 (-50°C)	≥14	0,81	0,39
Drut stosowany do warstwy przetopowej							
Lincoln	Ultra MAG SG3	490	590	70 (-40°C)	27	0,36	0,25
(1) C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15							
(2) C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40							

**Tablica III.** Zakres stosowalności wyrażen (1) i (2) dla stali zawierających B, Nb, V, Mo

**Table III.** The scope of application of equations (1) i (2) for steel with B, Nb, V and Mo

Pierwiastek	Zakres stosowalności wzoru do zawartości [%] pierwiastka	
	wzór (1)	wzór (2)
B	nieprzydatny dla stali zawierającej B	max 0,005
Nb	–	max 0,06
V	max 0,20	max 0,18
Mo	max 0,75	max 0,75

W źródle [5] podano wzór na wyznaczenie wartości ekwiwalentu węgla dla stali wysokowytrzymałych w postaci:

$$C_e = P_c = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{Ni}{60} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B \text{ [%]}$$

$$P_w = P_c + \frac{H_D}{60} + \frac{K}{40000}$$

gdzie:

$H_D$  – zawartość wodoru w spoinie (w ml/100 g) wyznaczona metodą glicerynową; w przypadku wyznaczenia zawartości wodoru metodą ręciową (metoda MIS) należy przyjąć:

$$H_D = 0,67 \cdot H_{D_{MIS}} - 0,8;$$

$K$  – intensywność utwardzenia zależna przede wszystkim od grubości elementów; ustalono (w oparciu o próbę Tekken):

$$K = 70 \cdot t;$$

$t$  – grubość materiału [mm].

Temperaturę wstępnego podgrzewania określić można za pomocą wyrażenia:

$$T_p = 1440 \cdot P_c - 392 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Yurioka [6], opierając się na wzorze Deardena i O'Neila, na podstawie licznych badań dla stali z borem opracował wzór:

$$C_e = C_{eI} = C + \frac{Mn}{30} + \frac{Si}{24} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{5} + 10 \cdot B$$

Stwierdzono jednocześnie, że dla stali nowej generacji (w tym stali ulepszanych cieplnie) powyższe wyrażenie pozwala w bardzo rzeczywisty sposób wyznaczyć wartość twardości maksymalnych w złączu [6], a tym samym zdobyć informacje o skłonności do pęknięcia. Można tego dokonać, wyznaczając maksymalną twardość według zależności:

$$HV_{max} = 406 \cdot C + 164 \cdot C_{eI} + 183 - (369 \cdot C - 149C_{eI} + 100) \cdot \arctan(x)$$

gdzie:

$$x = (Y - 2,822 \cdot C_{eII} + 0,262) / (0,526 - 0,195 \cdot C_{eII})$$

$$Y = \log t_{8/5}$$

$$C_{eII} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Si}{30} + \frac{Cu}{5} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{6} + 10 \cdot B$$

$t_{8/5}$  – czas stygnięcia w zakresie 800÷500 °C [s].

## Wyznaczenie temperatury podgrzewania wstępnego

Yurioka, Saito i inni [8] przedstawili bardzo interesującą metodę, opracowaną przez Japanese Society of Steel Construction. Przeprowadzając eksperymenty na wysokowytrzymałych stalach ulepszanych cieplnie (np. HT 80), stworzyli następującą procedurę służącą określeniu niezbędnej temperatury podgrzewania wstępnego:

**Krok 1.** Wyznaczyć wartość równoważnika węgla z zależności:

$$C_e = C + A(C) \cdot \left( \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + V + Nb}{5} + 5 \cdot B \right)$$

gdzie:

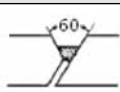
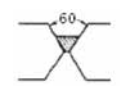
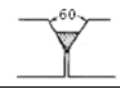
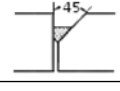
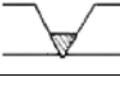
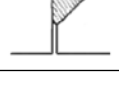
$$A(C) = 0,75 + 0,25 \tanh(20(C - 0,12))$$

**Krok 2.** Określić metodą glicerynową ilość wodoru, która przechodzi z materiału dodatkowego do spoiny [ml/100 g].

**Krok 3.** Przyjąć wartość współczynnika koncentracji naprężeń na podstawie tablicy IV.

**Tablica IV.** Wartość współczynnika koncentracji naprężeń w zależności od złącza [8]

**Table IV.** Stress concentration factors at root and toe weld position [8]

Rodzaj ukosowania		$K_t$
y (grań)		4
podwójne V (X) (grań)		3,5
Y (grań)		4÷5
pojedyncze ukosowanie (grań)		6÷8
V (grań)		1,5
y, X, Y, V, U (wypełnienie)		1,5

**Krok 4.** Wyznaczyć intensywność utwardzenia  $R_f$  [MPa] z poniższego wzoru:

a) dla elementów o dużej grubości, silnie utwardzonych, gdzie elementy nie mają możliwości swobodnego odkształcania się, np. w budownictwie okrętowym, przy spawaniu z wykorzystaniem zacisków, szablonów itp.:

$$R_f = 4970 \cdot \left( \arctan(0,017 \cdot h) - \left( \frac{h}{400} \right)^2 \right)$$

b) dla elementów o średnich grubościach, gdzie zachodzi częściowe swobodne odkształcanie na skutek skurczu:

$$R_f = 2840 \cdot \left( \arctan(0,017 \cdot h) - \left( \frac{h}{400} \right)^2 \right)$$

c) dla elementów z cienkich blach ( $h < 1$  mm), które mają możliwość swobodnego odkształcania:

$$R_f = 710 \cdot \left( \arctan(0,017 \cdot h) - \left( \frac{h}{400} \right)^2 \right)$$

gdzie:

$h$  – grubość materiału [mm].

**Krok 5.** Oszacować wartość naprężeń oddziaływujących na metal spoiny:

$$\sigma_w = 710 \cdot \left( \arctan(0,017 \cdot h) - \left( \frac{h}{400} \right)^2 \right) \text{ gdy } R_f \leq 2 \cdot \sigma_y$$

$$\sigma_w = 0,050 \cdot R_f \text{ gdy } R_f > 2 \cdot \sigma_y$$

gdzie:

$\sigma_y$  – granica plastyczności [MPa].

**Krok 6.** Obliczyć współczynnik pęknięcia  $CI$ , używając poniższego wyrażenia:

$$CI = C_e + 0,15 \log H_{JIS} + 0,30 \log(0,017 \cdot K_t \cdot \sigma_w)$$

gdzie:

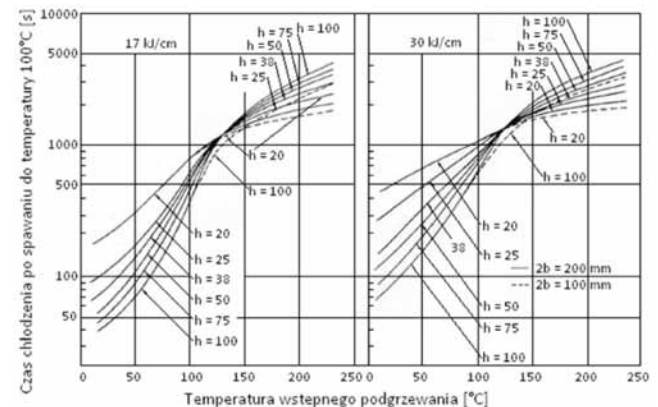
$H_{JIS}$  – zawartość wodoru dyfundującego (w ml/100 g) wyznaczona metodą glicerynową.

**Krok 7.** Obliczyć krytyczny czas chłodzenia ( $t_{100}$ )<sub>cr</sub> z równania:

$$(t_{100})_{cr} = \exp(67,6 \cdot CI^3 - 182 \cdot CI^2 + 163,8 \cdot CI - 41)$$

**Krok 8.** Wyznaczyć temperaturę wstępnego podgrzewania na podstawie wykresów (rys. 1), pamiętając by spełniony był warunek:

$$t_{100} > (t_{100})_{cr}$$



**Rys. 1.** Zależność pomiędzy czasem chłodzenia a temperaturą wstępnego podgrzewania dla różnych energii liniowych;  $2b$  – szerokość nagrzewania [8]

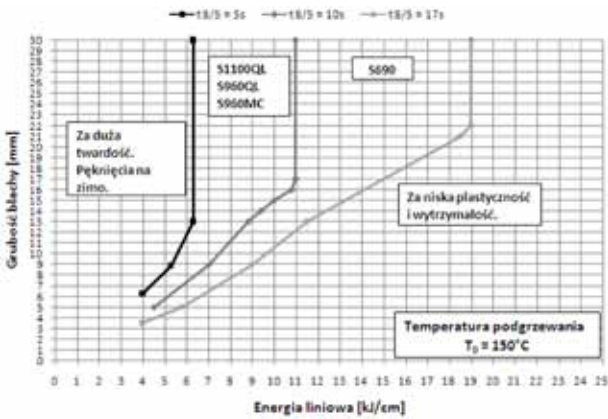
**Fig. 1.** Relation between cooling time to 100°C and preheating temperature for two value of heat input.  $2b$  – width of preheating zone [8]

W normie [10] podano warunki podgrzewania wstępnego dla stali ulepszanych cieplnie. Według tych zaleceń, stal S690 należy podgrzewać już od grubości 5 mm (tabl. V). Optymalne jest stosowanie podgrzewania dla złączy ze stali ulepszanych cieplnie na poziomie 150 °C (rys. 2) oraz utrzymanie czasu chłodzenia w przedziale 5÷20 s. Zbyt szybkie chłodzenie złącza sprzyja tworzeniu struktur hartowniczych, natomiast wprowadzenie za dużej ilości ciepła jest przyczyną powstania strefy rozhartowanej o obniżonej wytrzymałości.

**Tablica V.** Temperatura podgrzewania wstępnego w zależności od materiału i grubości [9]

**Table V.** Preheating temperature dependent on material and thickness [9]

Materiał	Grubość, mm								
	4	5	6	7	8	9	10	12	≥20
Temperatura, °C									
S235J2+N	25	25	25	25	25	25	25	25	120
S355J2+N	25	25	25	25	25	25	25	25	120
S690QL S700MC	25	80	80	80	80	120	120	120	120
S770QL	25	80	80	80	80	120	120	120	120
S890QL	25	80	80	80	80	120	120	120	120
S960QL	25	80	80	80	80	120	120	120	120
S1100QL	25	80	80	80	80	120	120	120	120



Rys. 2. Parametry spawania spoin czołowych [10]  
Fig. 2. Welding parameters for butt joints [10]

## Właściwości złączy spawanych metodą MAG

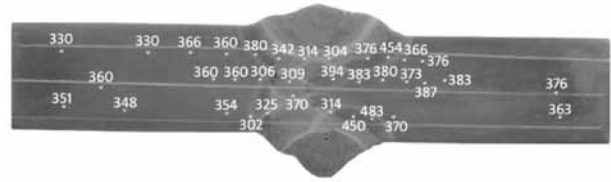
W badaniach wykonano złącza ze stali S690QL grubości 11 mm spawane metodą MAG łukiem zwarciovym oraz z wykorzystaniem prądu impulsowego. Poszczególne ściegi wykonano, stosując niskie parametry prądu spawania oraz wartości energii liniowej na poziomie 4 kJ/cm. Złącza wykonywano bez podgrzewania wstępnego. Dla takich parametrów procesu czas chłodzenia był krótszy od wymaganego w normie [10]. Stosując metody obliczeniowe Inagakiego i Sekiguchiego [11] określono, że czas chłodzenia wynosił 2÷2,5 s. W złączy ze stali S690QL spawanym łukiem zwarciovym (tabl. VI) twardość maksymalna w strefie przegrzania przekracza 420 HV.

Wyniki badania udarności złącza w miejscu występowania największych wartości twardości (linie 16÷20 na rys. 4) zaprezentowano w tabelicy VII. Pomimo utwardzenia strefy wpływu ciepła (rys. 3, tabl. VI) złącze charakteryzuje się wysoką udarnością oraz zapasem plastyczności. Plastyczność materiału potwierdzają wartości parametru rozszerzenia bocznego – *lateral expansion*, znacznie wyższe od wartości 0,38 mm – którą to wartość uważa się za granicę między złomem plastycznym a kruchym [13]. Poziome wartości energii pochłanianej przez próbki w próbie udarności oraz ocena przełomu na przekroju

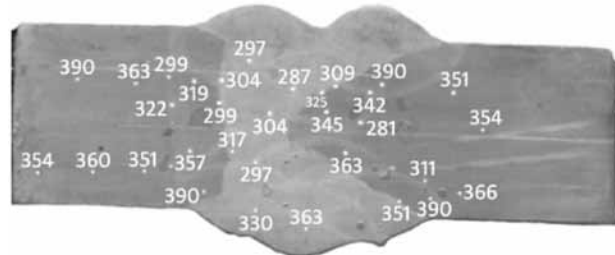
Tablica VI. Wyniki badań twardości  
Table VI. Results of hardness test of joints

nr pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
łuk zwarciovym – CV												
linia 1	330	330	366	360	380	342	314	304	376	454	366	376
linia 2	360	360	360	306	309	394	383	380	373	387	383	376
linia 3	351	348	354	302	325	370	314	450	483	370	363	–
łuk impulsowy – Puls												
linia 1	390	363	299	319	304	297	287	325	309	342	390	351
linia 2	322	299	304	345	281	354	–	–	–	–	–	–
linia 3	354	360	351	357	317	297	363	311	–	–	–	–
linia 4	390	330	363	351	390	–	–	–	–	–	–	–

złamania złączy wykonanych przy zaniżonych parametrach cieplnych procesu w stosunku do wymaganych przez normy [np. 10] pozwala na podanie w wątpliwość idei stosowania rygorystycznych warunków, np. podgrzewania wstępnego do 150 °C blach o grubościach od 5 mm.



Rys. 3. Wyniki badań twardości złącza spawanego łukiem zwarciovym  
Fig. 3. Results of hardness test of joint welded short circuiting transfer

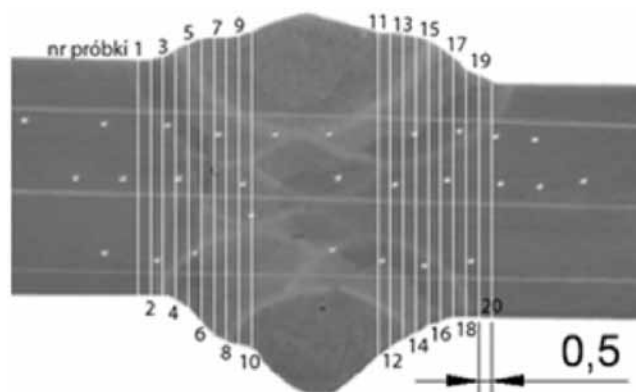


Rys. 4. Wyniki badań twardości złącza spawanego łukiem impulsowym  
Fig. 4. Results of hardness test of joint welded pulsed arc

Tablica VII. Wyniki badań udarności  
Table VII. Results of impact test

Nr próbki	Udarność, J/cm <sup>2</sup>	Rozszerzenie LE, mm
materiał rodzimy – base metal		
–	160	1,40
łuk zwarciovym – CV		
17	140	0,93
18	111	0,98
19	97	0,78
20	119	1,14
łuk impulsowy – Puls		
17	135	1,03
18	130	1,12
19	124	1,01
20	154	1,31

W procesie MAG-Puls, przy wartości energii liniowej jak dla spawania łukiem zwarciovym, ilość wprowadzonego ciepła jest większa o ok. 30% [14, 15], dzięki czemu wydłuża się czas chłodzenia, a maksymalna twardość w złączu nie przekracza dopuszczalnych wartości określonych w normach do kwalifikowania technologii spawania. Korzystne jest spawanie impulsowym trybem pracy zasilacza, gdyż pozwala uzyskać bardzo dobre wtopienie oraz uniknąć przyklejeń międzywarstwowych. Należy jednak zwrócić uwagę na sposób oceny ciepła wprowadzonego przy spawaniu prądem impulsowym, której to oceny należy dokonywać w oparciu o układ elektroniczny rejestrujący wartości napięcia łuku oraz natężenia prądu z wysoką częstotliwością pomiaru [14].



Rys. 5. Rozmieszczenie nacięcia karbu  
Fig. 5. Notch distribution

## Wnioski

Stale ulepszane cieplnie są materiałami o bardzo dobrych parametrach wytrzymałościowych, dzięki czemu ich zastosowanie w budowie maszyn i konstrukcji stalowych prawdopodobnie będzie stale zwiększane. Procesy spawania wymagają precyzyjnego określenia parametrów cieplnych procesu, takich jak temperatura wstępnego podgrzewania oraz ilość ciepła wprowadzonego. W danych literaturowych brak jest jednak jednolitych wymagań technologicznych, dlatego przy opracowaniu technologii spawania

należy korzystać z obliczeniowych metod wyznaczenia spawalności materiału. Spawanie stali ulepszanych cieplnie przy niskich parametrach prądowo-napięciowych oraz niskiej energii liniowej powoduje wzrost twardości w strefie przegrzania do wartości ponad 420 HV, przy czym strefa złącza zachowuje wysoką udamność oraz dobrą plastyczność. Zastosowanie spawania prądem impulsowym pozwala na uniknięcie typowych dla procesu MAG niezgodności oraz obniżenie poziomu twardości maksymalnej.

## Literatura

- [1] Butnicki S.: Spawalność i kruchość stali. WNT, Warszawa 1991.
- [2] Górka J.: Właściwości spoin stali obrabianych termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności. Przegląd Spawalnictwa 12/2011, s. 31–35.
- [3] Lachowicz M., Nosko W.: Spawanie stali konstrukcyjnej Weldox 700. Przegląd Spawalnictwa, 1/2010, s. 13–18.
- [4] Pierożek B., Lassociński J.: Spawanie łukowe stali w osłonach gazowych. WNT, Warszawa 1987.
- [5] Pilarczyk J., Adamiec P.: Warunki spawania stali produkowanych przez polskie hutnictwo. Wydawnictwa Akcydensowe, Warszawa 1981.
- [6] Ship Structure Committee: Carbon Equivalence and Weldability Microalloyed Steel. Washington, 1991.
- [7] PN – EN 1011-2.
- [8] Yurioka N., Suzuki H., Ohshita S., Saito S.: Determination of Necessary Preheating Temperature in Steel Welding. Welding Journal, 6/1983, s. 147–153.
- [9] Bessyo K., Matsui S., Staoh K., Horikawa K., Okumura T.: JSSC Guidance Report on Determination of Safe Preheating Conditions without Cracks in Steel Structures. Transaction of Joining and Welding Research Institute, 2/1973, s. 117–126.
- [10] Wytyczne ISR B 010 firmy Liebherr.
- [11] Brózda J., Pilarczyk J., Zeman M.: Spawalnicze wykresy przemian austenitu CTPc – S. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1983.
- [12] Makles K.: Praca magisterska: „Analiza wpływu rodzaju spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów ochronnych na ciepło wprowadzone” pod kierunkiem dra inż. Krzysztofa Kudły.
- [13] Stankiewicz M., Holloway G., Marshall A., Zhang Z., Ślęzak B.: Próba udamności Charpy’ego i parametr Lateral Expansion w ocenie materiałów spawalniczych dla potrzeb kriogeniki. Przegląd Spawalnictwa 11/2012, s. 2–11.
- [14] Kudła K., Wojsyk K.: Normowana energia liniowa a ilość ciepła wprowadzonego podczas spawania. Przegląd Spawalnictwa 12/2010, s. 21–25.
- [15] Melfi T.: New Code Requirements for Calculating Heat Input. Welding Journal, 6/2010.