

# Wpływ utwardzenia krawędzi ciętej na właściwości wytrzymałościowe złącza spawanego

## Influence of the cut edge hardening on the welded joint mechanical properties

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ cięcia termicznego i związanego z tym procesem utwardzenia krawędzi ciętej na właściwości mechaniczne złączy spawanych. Wykorzystano cztery warianty krawędzi ciętej stali S690QL. Zastosowano cięcie tlenem i cięcie plazmą. Spawano złącza bez dodatkowej obróbki i złącza po zeszlifowaniu 1 mm krawędzi. Przeprowadzono badania udarności i wytrzymałości na rozciąganie. Wykazano wpływ przygotowania złącza na jego właściwości mechaniczne

**Słowa kluczowe:** cięcie termiczne, przygotowanie złącza spawanego, jakość krawędzi ciętej, badania wytrzymałościowe

### Abstract

The paper presents the influence of thermal cutting and the related process of hardening the cut edge on the welded joints mechanical properties. Four variants of the cut steel S690QL edge was used. Applied oxygen and plasma cutting. Joints without additional processing and joints after removing 1 mm edge were welded. Impact tests and tensile strength were performed. Shows the effect of joint preparation for the mechanical properties.

**Keywords:** thermal cutting, welded joint preparation, cut edge quality, mechanical tests

### Wstęp

W dobie ciągłego rozwoju technik spajania stale aktualny jest jeden cel: bezpieczeństwo konstrukcji dla użytkownika i środowiska. Spełnienie wymagań jakości konstrukcji spawanych jest możliwe tylko w przypadku stworzenia jednolitego i spójnego systemu bezpieczeństwa poprzez ujednoczenie i harmonizacja prawa. Wprowadzając na terenie Unii Europejskiej normy zharmonizowane możliwe jest wytwarzanie konstrukcji i urządzeń technicznych w sposób zapewniający uzyskanie jednolitego i wysokiego poziomu jakości. Harmonizacja pociąga za sobą nie tylko kontrolę procesów spajania ale również technik pokrewnych, które mają mniejszy lub większy wpływ na jego efekt.

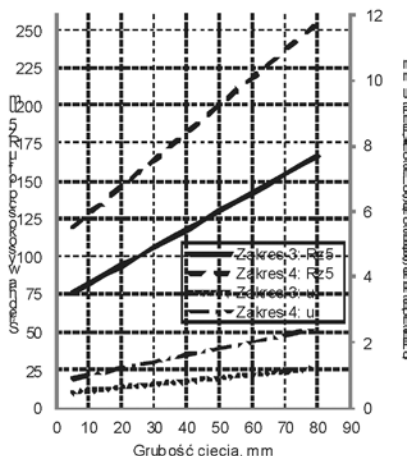
Doskonałym przykładem procesu wpływającego bezpośrednio na jakość złącza jest sposób przygotowania krawędzi formującej geometrię rowka spawalniczego. Dokumentem normatywnym regulującym m.in. kwestie jakości powierzchni ciętej jest PN-EN 1090-2+A1:2012 „Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych – Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych”, wprowadzona 1 lipca 2012 r.

Klasę jakości powierzchni ciętej kontroluje się badając próbki o długości minimum 200 mm zgodnie z PN-EN ISO 9013:2008 „Cięcie termiczne – Klasyfikacja cięcia termicznego – Specyfikacja geometrii wyrobu i tolerancje jakości”. Badania prowadzi się dla danego typu materiału i metody cięcia w zakresie minimalnej i maksymalnej grubości w przypadku cięcia prostego oraz na grubości reprezentatywnej w przypadku

Dr inż. Ryszard Pakos; dr inż. Adam Sajek – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: adam.sajek@zut.edu.pl

wycinania łuku i ostrego naroża. W zależności od klasy wykonania konstrukcji określany jest zakres dla tolerancji prostokątności lub nachylenia  $u$  i zakres dla średniej wysokości profilu  $Rz5$ . Dla klas EXC2 i EXC3 w obydwóch przypadkach ustalono zakres 4, który zmienia się na zakres 3 dla najwyższej klasy EXC4. Obliczając tolerancję dla odchyłki  $u$  oraz chropowatości  $Rz5$  należy uwzględnić oprócz zakresu także grubość cięcia. Na rysunku 1 pokazano jak zmieniają się powyższe tolerancje w zależności od grubości cięcia w zakresie 3 i 4.



**Rys. 1.** Zależność tolerancji prostokątności  $u$  i chropowatości  $Rz5$  od grubości cięcia dla zakresów 3 i 4  
**Fig. 1.** Influence of the tolerances perpendicularity and roughness on the cutting thickness for range 3 and 4

W przypadku materiałów ulegających utwardzeniu pod wpływem cięcia wykonuje się badanie twardości zgodnie z PN-EN ISO 6507-1:2007 „Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badań”. Norma definiuje maksymalną chropowatość powierzchni  $Ra = 2,5 \mu m$ . Z tego względu pomiary twardości powinny przeprowadzić się na 2/3 wysokości cięcia na przygotowanym wcześniej zglądzie. Wyniki pomiarów twardości ciętych krawędzi wraz obrazami mikrostruktur na zglądach poprzecznych przedstawiono na rysunku 2.

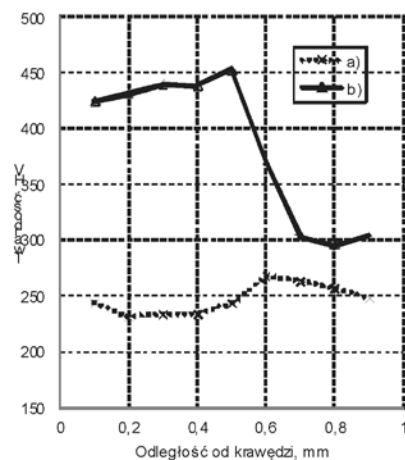
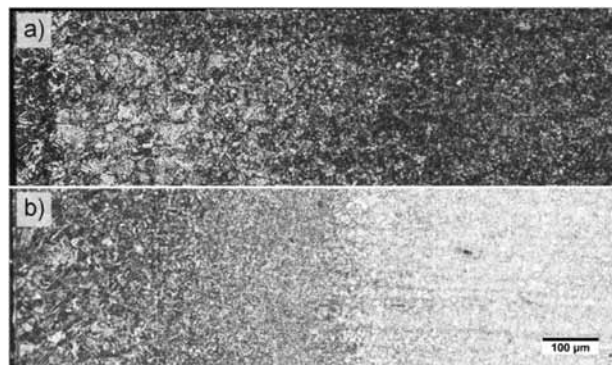
Aktualnie dominują trzy metody cięcia termicznego tj. tlenowo-acetylenowe, plazmowe i laserowe. Każdy z tych procesów posiada indywidualne cechy dedykujące do specyficznych zastosowań. Wybór procesu cięcia zależy od wymagań jakościowych oraz możliwości technicznych i finansowych wytwórcy. Szczególnie istotnymi czynnikami stanowiącymi o zastosowaniu określonego typu cięcia poza jakością krawędzi są gatunek ciętego materiału, jego grubość oraz wymagana wydajność procesu.

Mimo ograniczeń metalurgicznych wynikających z zasady procesu, najbardziej popularnym procesem cięcia jest *cięcie tlenowo-acetylenowe*. Zmienne technologiczne warunkujące jakość krawędzi ciętej tą metodą to: czystość tlenu tnącego, stan powierzchni ciętego materiału, temperatura podgrzania wstępnego i rodzaj dyszy. Ograniczony do cięcia stali niestopowych i niskostopowych proces znajduje zastosowanie głównie przy cięciu materiałów o grubości przekraczającej 10 mm.

*Cięcie plazmowe*  to metoda konkurencyjna do cięcia tlenowo-gazowego, będąca obecnie technologią wiodącą, głównie dzięki wysokiej wydajności i niskim kosztom eksploatacyjnym, a także możliwości przecinania materiałów o większych grubościach (do ok. 150 mm) [2]. Zmienne technologiczne cięcia plazmowe to: parametry prądowe, rodzaj i ciśnienie gazu plazmowego, typ elektrody i średnica dyszy zwężającej. Ograniczeniem metody jest jej zastosowanie w obszarze materiałów metalicznych – przewodzących prąd elektryczny.

*Cięcie laserowe*  jest procesem o ugruntowanej obecnie pozycji, przede wszystkim, do precyzyjnego cięcia blach cienkich, tj. do ok. 5 mm oraz do cięcia blach grubych (10÷25 mm), z wykorzystaniem laserów dużej mocy (przeważnie powyżej 4 kW) [2÷4]. Zaletą technologii cięcia laserowego blach grubych jest większa dokładność cięcia oraz lepsza jakość powierzchni cięcia i mniejsze odkształcenia. Metoda ta umożliwia cięcie większości materiałów, np. metali, tworzyw sztucznych, szkła czy materiałów izolacyjnych i daje możliwość wycinania otworów w przestrzennie ukształtowanych elementach kabin, obudów, karoserii, rur, profili zamkniętych [3÷5]. Postęp w rozwoju generatorów promieniowania laserowego i konstrukcji przecinarek laserowych jest bardzo duży i dlatego należy śledzić aktualne tendencje rozwojowe tych urządzeń, aby w pełni wykorzystać ich zalety i możliwości.

Wymienione wyżej metody cięcia dzięki istotnym różnicom znajdują zastosowanie dla każdego profilu produkcji.



**Rys. 2.** Wyniki pomiarów twardości krawędzi ciętej: a) cięcie tlenem; b) cięcie plazmą [1]  
**Fig. 2.** The results of the welded joints hardness test: a) oxygen cutting; b) plasma cutting [1]

## Badania własne

Celem badań było określenie wpływu technologii przygotowania krawędzi rowka spawalniczego na podstawowe właściwości mechaniczne. Wykorzystano ulepszoną cieplnie stal konstrukcyjną o wysokiej wytrzymałości S690QL. Grubość stali wynosiła 20 mm i jest reprezentatywną grubością tego typu stali w złączach spawanych.

Zastosowano dwie metody cięcia: cięcie plazmą i cięcie tlenowo-acetylenowe. Dla każdej metody krawędź rowka spawalniczego przygotowano dwoma sposobami. W pierwszym przypadku krawędź po cięciu była jedynie oczyszczona, w drugim, krawędź zeszlifowano na głębokość 1 mm. W wyniku tak przygotowanego eksperymentu powstały cztery złącza spawane:

- Plazma0 – złącze z krawędziami ciętymi plazmą bez dodatkowej obróbki;
- Plazma1 – złącze z krawędziami ciętymi plazmą po obróbce mechanicznej na głębokości 1 mm;
- Tlen0 – złącze z krawędziami ciętymi gazowo bez dodatkowej obróbki;
- Tlen1 – złącze z krawędziami ciętymi gazowo po obróbce mechanicznej na głębokości 1 mm.

Procesy cięcia przeprowadzono na urządzeniu portalowym ESAB SUPRAREX SXE – PZ 4000. Wszystkie procesy cięcia wykonano przy optymalnych parametrach dla badanej grubości ciętego materiału na długości 200 mm.

Złącza spawano metodą 135 zgodnie z uznaną technologią, zapewniającą głębokość przetopienia na głębokość około 1 mm. Badania wytrzymałości na rozciąganie oraz badania udarności przeprowadzono według aktualnych norm i przepisów w Laboratorium Badań Struktury i Właściwości Mechanicznych Materiałów PoliTEST na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie.

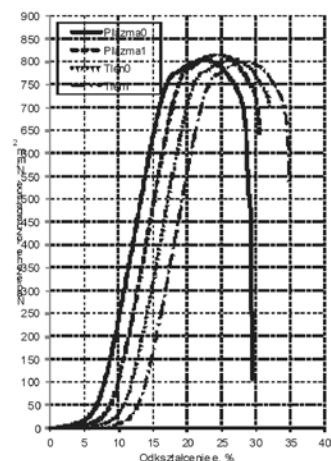
**Tablica I.** Wyniki próby rozciągania

**Table I.** The results of the welded joints tension test

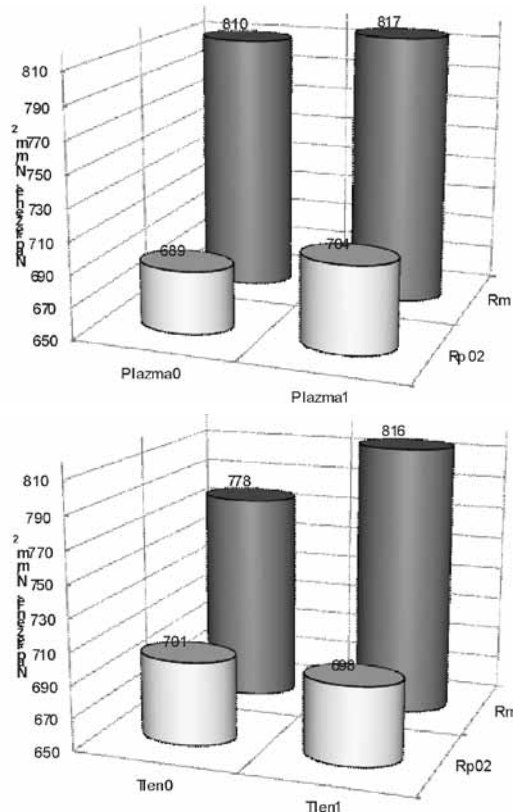
$R_{p0.2}$ , N/mm <sup>2</sup>					
	1	2	3	średnia	odchylenie
Plazma0	673	689	705	689	16,0
Plazma1	705	693	714	704	10,5
Tlen0	700	700	702	701	1,15
Tlen1	698	698	699	698	0,58
$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>					
	1	2	3	średnia	odchylenie
Plazma0	810	804	815	810	5,51
Plazma1	822	816	813	817	4,58
Tlen0	781	776	777	778	2,65
Tlen1	814	815	818	816	2,08

## Badania wytrzymałości na rozciąganie

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przeprowadzono zgodnie z PN-EN ISO 4136:2013 na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 5585H o zakresie pomiarowym siły do 250 kN. Dobrano parametry próby i wykonano obliczenia wg PN-EN ISO 6892-1:2010. Badania przeprowadzono dla trzech próbek z każdego złącza. W tabelicy I przedstawiono zestawienie wyników próby rozciągania, a na rysunku 3 przebieg próby dla reprezentatywnych próbek z każdego złącza. Podsumowanie badań wytrzymałościowych przedstawiono na rysunku 4.



**Rys. 3.** Przebieg próby wytrzymałościowej złączy spawanych  
**Fig. 3.** The tension test of the welded joints



**Rys. 4.** Właściwości wytrzymałościowe badanych złączy  
**Fig. 4.** Strength properties of the tested joints

## Badania udarności

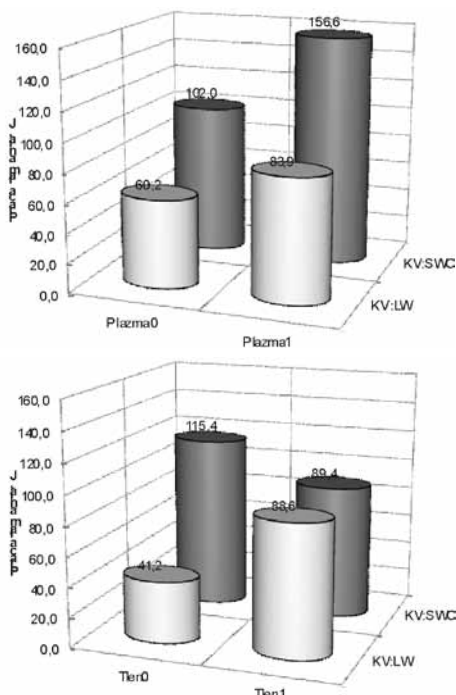
Badania przeprowadzono w temperaturze  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  sposobem Charpy na młocie udarnościowym WPM LIPSK typu PSW-30 o energii początkowej 300 J, zgodnie z PN-EN ISO 9016:2011. Z każdego złącza pobrano 2 zestawy próbek udarnościowych pobranych 2 mm od powierzchni materiału rodzimego:

- LW: VHT0/2 – karb w linii wtopienia;
- SWC: VHT2/2 – karb w strefie wpływu ciepła 2 mm od linii wtopienia.

Wyniki badań udarności przedstawiono w tabelicy II, a zestawienie wyników dla poszczególnych złączy przedstawiono na rysunku 5.

**Tabela II.** Wyniki próby udarności  
**Table II.** The results of the welded joints impact test

KV <sub>LW</sub> , J					
	1	2	3	średnia	odchylenie
Plazma0	62	58,3	60,3	60,2	1,85
Plazma1	83,1	86,2	82,3	83,9	2,06
Tlen0	49	35,3	39,3	41,2	7,04
Tlen1	88,2	89,3	88,2	88,6	0,64
KV <sub>SWC</sub> , J					
	1	2	3	średnia	odch.
Plazma0	110,0	98,0	99,1	102,0	6,63
Plazma1	154,8	159,7	155,2	156,6	2,72
Tlen0	101,2	147,0	98,0	115,4	27,4
Tlen1	90,0	88,0	90,2	89,4	1,22



**Rys. 5.** Udarność badanych złączy  
**Fig. 5.** Impact strength of the tested joints

## Analiza wyników badań

W przypadku badań właściwości mechanicznych złączy prowadzonych w ramach uznania technologii spawania ważne jest aby wyniki badań spełniały zalecenia norm przedmiotowych ustalających minimalne wymagania. W przypadku rozciągania warunkiem jaki stawia PN-EN ISO 15614-1:2008 jest wymagana wytrzymałość złącza na poziomie najniższej wartości wytrzymałości dla materiału podstawowego. Dla stali S690QL PN-EN 10025-6+A1:2009 określa wartości  $R_m$  na poziomie  $770+940\text{ MPa}$ . Z tablicy I wynika, że wartość ta dla każdego złącza mieści się w ustalonym obszarze.

W trakcie badań wytrzymałościowych określono dodatkowo umowną granicę plastyczności przy odkształceniu względnym  $\epsilon=0,2\%$ . Jest to często praktykowane przy badaniach stali ulepszanych cieplnie z uwagi na ich specyficzną spawalność. Przywołana norma określa minimalną wartość  $R_{p0.2}$  na poziomie 690 MPa. Granica plastyczności większości badanych złączy spełniała ten wymóg. Odchylenia od normy zaobserwowano w przypadku złącza Plazma0 z krawędziami po cięciu plazmą bez dodatkowej obróbki.

Złącza Plazma0 w trakcie rozciągania jako jedyne zrywały się etapami. Pierwsze pęknięcie następowało w górnym zakresie obciążeń po czym po spadku wartości siły rozciągającej następowało ostateczne zerwanie próbki. Zjawisko to widoczne jest na rysunku 3. Pęknięcie w próbkach Plazma0 przebiegało przez spoinę.

Dla złączy z krawędziami ciętymi plazmowo można zaobserwować niewielki wzrost parametrów wytrzymałościowych. W przypadku złączy z krawędziami ciętymi tlenem zaobserwowano wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Granica plastyczności pozostaje na niezmiennym poziomie. Niewielkie różnice w wytrzymałości złączy wynikają z faktu pęknięcia próbek w strefie materiału rodzimego.

Wyniki badań udarnościowych dla złączy z krawędziami ciętymi plazmą wykazują wzrost udarności po usunięciu 1 mm warstwy zarówno dla strefy wpływu ciepła i linii wtopienia. Usunięcie cienkiej warstwy utwardzonej dla tego typu złączy wyraźnie poprawia ich wytrzymałość na obciążenia o charakterze dynamicznym.

W przypadku złączy z krawędziami ciętymi tlenem widoczny jest spadek udarności w strefie wpływu ciepła i wzrost udarności na linii wtopienia. Usunięcie 1 mm warstwy krawędzi ciętej tlenem nie usuwa całkowicie obszaru zmian ciepłem, którego złożony wpływ na udarność ujawniły wyniki przedstawione na rysunku 5.

## Podsumowanie

Zastosowana w badaniach stal S690QL jest szczególnie wrażliwa na zmiany strukturalne wywołane ciepłem. Struktura i właściwości złącza są efektem dwuetapowej obróbki cieplnej materiału rodzimego, w której początkowo krawędź obrabiana jest łukiem plazmowym lub płomieniem gazowym, a w końcowym etapie łukiem spawalniczym.

Wpływ przygotowania krawędzi kształtującej rowek złącza na jego końcowe właściwości jest najbardziej widoczny w przypadku złączy z krawędziami ciętymi plazmą. Szerokość strefy zmian cieplnych przedstawiono na rysunku 2. Dla cięcia plazmą, jej szerokość obejmuje obszar poniżej 0,7 mm. W wąskiej strefie zmiany strukturalne są znaczne co uwidacznia 50% wzrost twardości. Obróbka mechaniczna na głęboko-

ści 1 mm tak utwardzonej krawędzi znacznie poprawia udarność złącza i wytrzymałość spoiny.

Obróbka mechaniczna szerokiej strefy wpływu ciepła na krawędzi ciętej tlenem usuwa tylko część materiału zawierającą gruboziarnistą strefę przegrzaną. Wpływa to pozytywnie na właściwości udarnościowe linii wtopienia lecz w odległości 2 mm powtórna obróbka cieplna nieusuniętej części krawędzi powoduje spadek udarności.

Po przeanalizowaniu wyników badań powstaje obraz zmian właściwości złączy spawanych, których parametry wytrzymałościowe zależą nie tylko od zmiennych technologicznych ale także od sposobu przygotowaniu krawędzi rowka.

## Literatura

- [1] Pakos R.: Wpływ metody cięcia na właściwości stalowej krawędzi ciętej, Przegląd Spawalnictwa 8/2012.
- [2] Górka J., Krysta M.: Jakość cięcia stali obrobionej termomechanicznie plazmą powietrzną, laserem i strumieniem wody. Przegląd Spawalnictwa 8/2007.
- [3] Banasik M., Dworak J.: Cięcie i spawanie laserem CO<sub>2</sub>. Przegląd Spawalnictwa 8-10/2002.
- [4] Hidden S., Buhler B.: The Great Debate: Plasma or Oxyfuel? Welding Journal, March 2005.
- [5] Cool waterjet process heats up cutting market. Welding Design and Fabrication, November 2000.
- [6] PN-EN 1090-2. Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.
- [7] EN ISO 9013. Cięcie termiczne – Klasyfikacja cięcia termicznego – Specyfikacja geometrii wyrobu i tolerancji jakości.

## Przegląd Spawalnictwa Welding Technology Review Open Access Library

Przegląd Spawalnictwa uruchomił możliwość wolnego dostępu do pełnych treści artykułów w ramach Open Access Library. Artykuły w języku angielskim w formacie PDF zamieszczane są na tronie internetowej redakcji: [www.pspaw.ps.pl](http://www.pspaw.ps.pl).

Autorów zainteresowanych publikacją w Open Access Library prosimy o przesyłanie artykułów w języku polskim i angielskim. W miesięczniku nastąpi publikacja w języku polskim, a tekst w języku angielskim zostanie zamieszczony na stronie internetowej.