

BADANIA SKUTECZNOŚCI KLEJENIA I SPAWANIA STALI KONSTRUKCYJNEJ S235JR

Testing of effectiveness of bonding and welding of structural steel S235JR

Anna RUDAWSKA, Kamil KUTEK, Izabela MITURSKA, Leszek SEMOTIUK

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia wytrzymałości połączeń spawanych i klejowych stali konstrukcyjnej S235JR. Wykonane połączenia porównano pod względem skuteczności, gdzie kryterium określającym była wytrzymałość na ścinanie. Przedmiotem badań były trzy rodzaje połączeń spawanych: doczołowych, zakładkowych z jednym spawem, zakładkowych z dwoma spawami, jak i dwa rodzaje połączeń klejowych: doczołowych i zakładkowych. Łączone próbki wykonano z blachy stalowej konstrukcyjnej S235JR o grubości 4 mm. Do wykonania połączeń spawanych wykorzystano spawarkę inwertorową ADLER MMA-200. Połączenia spawane przygotowano z zastosowaniem spawania łukowego elektrodą otuloną klasyfikowaną wg PN-EN ISO 2560:2006-E38 A RC 12. Do wykonania połączeń klejowych zastosowano klej epoksydowy dwuskładnikowy Epidian 57/Z1/100:10. Przygotowanie powierzchni wszystkich próbek przeznaczonych do łączenia polegało na usunięciu nierówności krawędzi blach za pomocą szlifierki kątovej, usunięciu zanieczyszczeń przy użyciu środka do czyszczenia i odrzewniania powierzchni Fosol, a następnie odtłuszczeniu powierzchni preparatem Loctite 7063. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono zgodnie z normą EN DIN 1465. Uzyskane wyniki badań wskazały na różnice w otrzymanych wartościach wytrzymałości w zależności od zastosowanej metody łączenia, a także geometrii wykonanych połączeń. Na podstawie wyników badań zauważono, że lepsze wyniki wykazały połączenia spawane, co wskazuje na ich większą skuteczność, jednak w połączeniach spawanych w większości próbek zauważono wyraźną korozję w miejscu złączenia, czego nie zaobserwowano w przypadku połączeń klejowych.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, połączenia spawane, wytrzymałość, stal konstrukcyjna

Abstract: The article presents selected issues of welded joints and adhesive joints strength of structural steel S235JR. Joints were compared in terms of effectiveness, where criterion for determining was shear strength and value of destructive force. The subject of the study were three types of welded joints: butt, single-lap with single weld, single-lap with double welds, as well as two types of adhesive joints: butt and single-lap. Joined samples were made of S235JR steel sheet with a thickness of 4 mm. Welded joints were made by used inverter welder ADLER MMA-200. Welded joints were prepared by the arc welding with coated electrode classifiable according to PN-EN ISO 2560:2006-E38 A RC 12. In the case of adhesive joints, two-component epoxy adhesive consisting of epoxy resin Epidian 57 and hardener Z1 connected in a weight ratio of 100:10. Surface of all samples were preparation by removing uneven from edges of sheets with angle grinder, to remove impurities using cleaner and rust removal surface Fosol and then degreased with Loctite 7063. Strength test were carried out according to EN DIN 1465. Obtained test results pointed out the differences in the strength values obtained depending on the method of joining, as well as geometry of the made joints. Based on results observed that better results were achieved for welded joints and thus their effectiveness was higher, but in most of welded joints was observed corrosion at the joint, which was not observed in the case of adhesive joints.

Keywords: adhesive joints, welded joints, strength, structural steel

Wstęp

W technologii montażu w niemal wszystkich dziedzinach przemysłu bardzo ważną rolę odgrywa rodzaj połączeń montażowych. Aktualny postęp technologiczny pozwala na łączenie materiałów o różnych właściwościach fizykochemicznych i mechanicznych. Przedsiębiorstwa produkcyjne dążą do jak najlepszej jakości wykonywanych wyrobów, co powoduje wzrastające zapotrzebowanie na modyfikację technologii łączenia materiałów.

Pośród połączeń montażowych wyróżnia się połączenia rozłączne i nierozłączne. Wśród połączeń nierozłącznych wymienia się następujące rodzaje spajania materiałów: spawanie, zgrzewanie, lutowanie i klejenie [9, 5, 2]. Spajanie należy do najczęściej spotykanych procesów technologicznych w przemyśle maszynowym. Procesy te różnią się między sobą stanem skupienia

materiałów podstawowych i spoiwa w miejscu spajania, charakterem wiązań, jakie tworzą się w połączeniach oraz rodzajem doprowadzonej energii cieplnej i/lub mechanicznej w celu utworzenia połączenia [1]. Dla porównania wybranych właściwości poszczególnych metod łączenia, w trakcie badań przedstawionych w pracy wykonano połączenia zakładkowe i doczołowe metodą spawania i klejenia.

Spawanie znalazło największe zastosowanie spośród wymienionych metod, dlatego też na przestrzeni lat taki sposób montażu bardzo się rozwinął. Do dziś metody spawania i ich parametry poddawane są ciągłym badaniom w celu poprawienia jakości wykonywanych połączeń. Drugim analizowanym sposobem łączenia jest klejenie, które należy do intensywnie rozwijanych technologii łączenia materiałów w różnych dziedzinach przemysłu [4, 10, 7, 8] oraz stanowi cenne uzupełnienie

stosowanych dotychczasowo metod łączenia, w dużej mierze dzięki swojej uniwersalności. Klejenie umożliwia łączenie praktycznie wszystkich materiałów o znaczeniu przemysłowym.

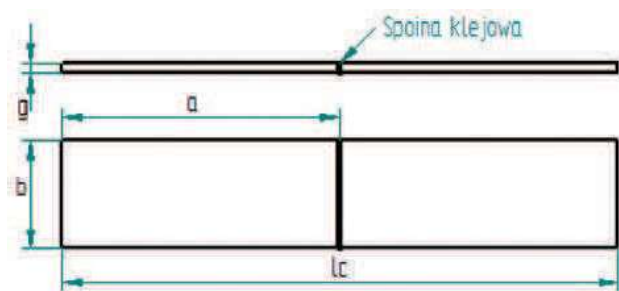
W pracy skoncentrowano się na badaniach skuteczności połączeń klejowych i spawanych blach ze stali S235JR, przy założonych rodzajach połączeń, gdzie kryterium porównawczym była wytrzymałość połączeń na ścinanie.

Badania doświadczalne

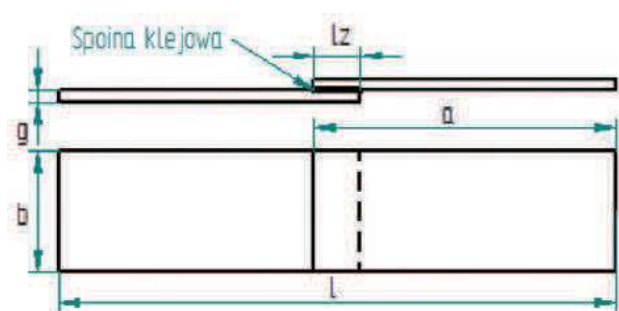
Badania doświadczalne polegały na wykonaniu połączeń klejowych i spawanych, które zostały przygotowane z prostokątnych próbek wyciętych z blachy stali konstrukcyjnej S235JR, których wymiary geometryczne przedstawiono w tab. 1. Wykonano po 10 próbek dla każdego rodzaju połączeń.

Charakterystyka połączeń klejowych

Do badań wykorzystano połączenia klejowe doczołowe (rys. 1) oraz jednozakładkowe (rys. 2) obciążone na ścinanie, których schemat oraz wymiary przedstawiono na rysunkach i w tab. 1.



Rys. 1. Schemat doczołowego połączenia klejowego
Fig. 1. The butt adhesive joint geometry



Rys. 2. Schemat zakładkowego połączenia klejowego
Fig. 2. The single-lap adhesive joint geometry

Tabela 1. Wymiary połączeń klejowych
Table 1. The adhesive joints dimension

Oznaczenie wymiaru	a [mm]	b [mm]	g [mm]	l_z [mm]	l [mm]	l_z [mm]
Wymiar	100 ± 1	$20 \pm 0,5$	$4 \pm 0,1$	$200 \pm 0,1$	185 ± 1	15 ± 1

Do wykonania połączeń klejowych zastosowano kompozycję klejową, sporządzoną z żywicy epoksydowej Epidian 57 i utwardzacza Z1 w stosunku wagowym 100:10 (Epidian 57/Z1/100:10). Kompozycję klejową odważono i wymieszano ręcznie, a następnie usunięto pęcherze gazowe na specjalnym stanowisku wyposażonym w pompę próżniową, bezpośrednio przed procesem klejenia.

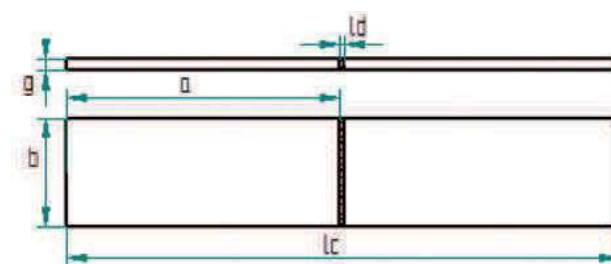
Klej nanoszono na jedną z łączonych powierzchni. Połączenia klejowe przygotowano w warunkach laboratoryjnych, w których temperatura wynosiła $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, zaś wilgotność sięgała poziomu ok. $31\% \pm 1\%$. Czas utwardzania kleju wynosił 10 dni.

Charakterystyka połączeń spawanych

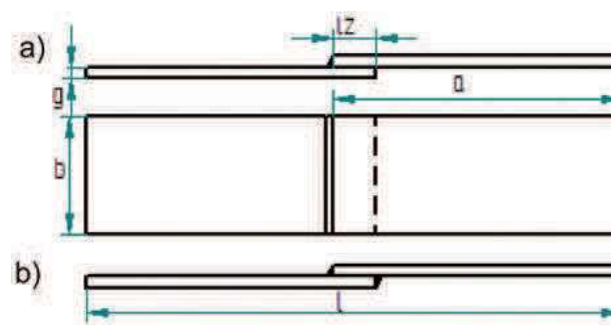
W badaniach użyto również połączenia spawane doczołowe i na zakładkę blach ze stali S235JR (tab. 2). Schemat oraz wymiary wykonanych połączeń przedstawiono na rys. 3, 4a i 4b i w tab. 3.

Tabela 2. Rodzaje zastosowanych połączeń spawanych
Table 2. The types of welded joints

Połączenia spawane		
Połączenie doczołowe	Połączenie zakładkowe	
	Spaw pojedynczy	Spaw podwójny



Rys. 3. Schemat doczołowego połączenia spawanego
Fig. 3. The butt welded joint



Rys. 4. Schemat zakładkowego połączenia spawanego: a) z jednym spawem, b) z podwójnym spawem
Fig. 4. The single-lap welded joint geometry: a) with single weld, b) with double weld

Tabela 3. Wymiary połączeń spawanych
Table 3. The welded joints dimension

Oznaczenie wymiaru	a [mm]	b [mm]	g [mm]	l_z [mm]	l [mm]	l_d [mm]	l_z [mm]
Wymiar	100±1	20±0,5	4±0,1	202±1	185±1	2±0,5	15±1

Połączenia spawane przygotowano z zastosowaniem spawania łukowego elektrodą otuloną klasyfikowaną wg PN-EN ISO 2560:2006-E38 A RC 12 z wykorzystaniem spawarki inwertorowej ADLER MMA-200, w temperaturze 25°C. Połączenia spawane, podobnie jak połączenia klejowe, zostały poddane niszczącym badaniom wytrzymałościowym.

Sposób przygotowania powierzchni łączonych elementów

Przygotowanie powierzchni elementów przeznaczonych do wykonania obu rodzajów analizowanych połączeń polegało na usunięciu nierówności krawędzi blach za pomocą szlifierki kątovej BOSCH GWS 850CE, wyposażonej w ściernicę listkową talerzową, zbudowaną z listków (lamelek) z płótna ściernego z ziarnem korundowym, nałożonych równomiernie, wachlarzowo na podstawie z włókna szklanego. Kolejnym etapem przygotowania powierzchni łączonych elementów było usunięcie zanieczyszczeń przy użyciu preparatu do czyszczenia i odrdzewiania powierzchni Fosol firmy Libella, a następnie odłuszczenie powierzchni preparatem Loctite 7063.

Badania wytrzymałościowe

Po upływie czasu utwardzania spoiny klejowej (10 dni), połączenia poddano badaniom wytrzymałościowym na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150 zgodnie z normą ISO 4587. Badania wytrzymałościowe wykonano przy zachowaniu osiowego zamocowania próbek i równomierności obciążenia statycznego oraz zachowaniu stałej prędkości trawersy 5 mm/min. Dla

połączeń doczołowych otrzymano wyniki wytrzymałości na rozciąganie, natomiast dla połączeń zakładkowych – wytrzymałość na ścinanie.

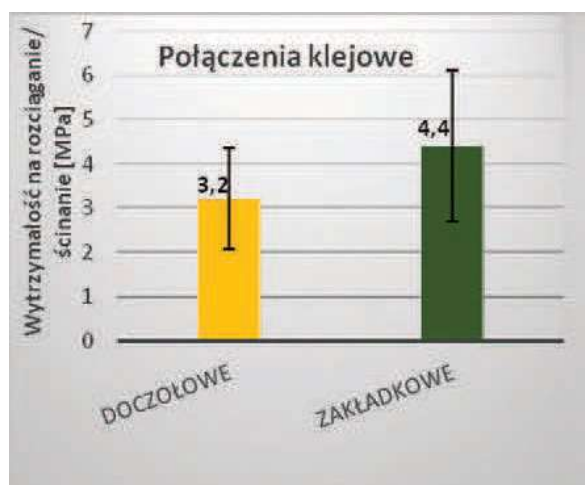
Wyniki badań

Otrzymane wyniki badań niszczących połączeń klejowych i spawanych przedstawiono na rys. 5 i 6.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można zauważyć, że największą wytrzymałość uzyskano dla połączeń spawanych doczołowo. Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie dla tych połączeń jest ponad czterokrotnie większa niż połączeń spawanych zakładkowych i wynosi 423,2 MPa. Połączenia spawane doczołowe mają największą wartość odchylenia standardowego. Wyniki dla tego rodzaju połączeń są najbardziej powtarzalne, ponieważ w większości próbek zniszczeniu uległ materiał rodzimy. W przypadku połączeń klejowych analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że połączenia klejowe zakładkowe są korzystniejszym rozwiązaniem niż połączenia doczołowe. Dla połączeń klejowych doczołowych średnia wytrzymałość na ścinanie wynosi 3,2 MPa, natomiast dla połączeń klejowych zakładkowych jest o 37% większa i wynosi 4,4 MPa. Biorąc pod uwagę pozostałe analizowane czynniki można stwierdzić, że w przypadku próbek klejonych połączenia zakładkowe okazują się bardziej korzystne niż połączenia doczołowe.

Podsumowanie i wnioski

Połączenia spawane i klejowe należą do grupy połączeń nierozłącznych i znajdują szerokie zastosowanie



Rys. 5. Wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali S235JR
Fig. 5. The results of tensile strength of the joints S235JR steel sheets



Rys. 6. Wytrzymałość połączeń spawanych blach ze stali S235JR
Fig. 6. The results of the strength of welded joints S235JR steel sheets

w przemyśle oraz technologii montażu. Cechują się możliwością łączenia materiałów o skomplikowanych kształtach, a połączenia klejowe także możliwością łączenia materiałów o różnych właściwościach.

Do przeprowadzonych badań wykorzystano spawanie elektrodą topliwą, otuloną. Metoda ta została wybrana ze względu na powszechność zastosowania, dużą popularność w procesie technologii montażu oraz możliwość spawania stali konstrukcyjnej S235JR [6]. Zastosowano trzy rodzaje połączeń: doczołowe, zakładkowe z jednym spawem oraz zakładkowe z podwójnym spawem.

Do wykonania połączeń klejowych zastosowano dwa rodzaje połączeń: zakładkowe oraz doczołowe, a także wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy Epidian 57/Z1/100:10.

Na podstawie wytrzymałościowych badań niszczących oraz ich analizy można sformułować następujące wnioski:

- zastosowanie połączeń spawanych doczołowych przyniosło korzystny wpływ na wytrzymałość na ścinanie w przypadku spawania. Wytrzymałość na rozciąganie połączeń spawanych doczołowo wynosi 423,2 MPa. Wytrzymałość połączeń spawanych zakładkowych z jednym spawem stanowi 11,86% wytrzymałości połączeń spawanych doczołowo, natomiast wytrzymałość połączeń spawanych zakładkowych z podwójnym spawem stanowi 18,73% wytrzymałości połączeń spawanych doczołowo,
- średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie połączeń spawanych doczołowo była ponad czterokrotnie większa niż połączeń spawanych zakładkowych, jednak wartość odchylenia standardowego była największa, co wskazuje na dużą precyzję i wysokie umiejętności spawacza,
- największe średnie wydłużenie próbek uzyskały połączenia spawane zakładkowe z podwójnym spawem i w tych połączeniach złom wystąpił w rodzimym materiale, nie w miejscu spoiny. W tym przypadku należy również zwrócić uwagę, że zniszczenie materiału świadczy o wyższej wytrzymałości samej spoiny, niż materiału łączonego, którego wytrzymałość wg EN 10025 wynosi $R_m = 360\text{--}510$ MPa. Wytrzymałość w przypadku tych połączeń wyniosła 79,3 MPa, czyli można sądzić, że zastosowanie dwóch spawów spowodowało obniżenie właściwości wytrzymałościowych materiału rodzimego,
- połączenia spawane zakładkowe z jednym spawem uzyskały najslabsze wyniki wytrzymałościowe wśród połączeń spawanych, a zniszczenie wystąpiło w miejscu wykonania spoiny,
- w połączeniach spawanych w większości próbek zauważono wyraźną korozję w miejscu złączenia,
- wśród połączeń klejowych korzystny wpływ na cechy wytrzymałościowe przyniosło zastosowanie połączeń zakładkowych,
- połączenia klejowe doczołowe osiągnęły niskie wyniki wytrzymałościowe, co może wynikać ze zbyt małej powierzchni przylegania łączonych materiałów.

Podsumowując, zarówno połączenia spawane, jak i klejowe wymagają przeprowadzenia odpowiednich czynności wstępnych, aby wykonać takie połączenia. Podczas procesu klejenia oraz spawania istotną rolę odgrywa odpowiedni dobór geometrii i sposób ich wykonania. Wniosek można, że w przypadku łączenia elementów wykonanych ze stali konstrukcyjnej S235JR skutecznym sposobem łączenia ze względów wytrzymałościowych są połączenia spawane, jednak w przypadku połączeń klejowych nie wystąpiło zjawisko korozji w miejscu łączenia ze sobą materiałów. Prowadzenie dalszych badań analizowanych połączeń, uwzględniając zarówno czynniki konstrukcyjne, jak i technologiczne, wpływające na skuteczność połączeń spawanych i klejowych, mogłoby pozwolić na poprawę uzyskiwanych wyników wytrzymałościowych.

LITERATURA

- [1] Ferenc K. 2007. „Spawalnictwo”. Warszawa: WNT.
- [2] Godzimirski J., A. Komorek. 2008. „Trwałość zmęczeniowa zakładkowych i czołowych połączeń klejowych”. *Przegląd Mechaniczny* (12): 40–44.
- [3] ISO 4587:2003 – Adhesives – Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies.
- [4] Majda P. 2007. „Wybrane problemy analizy połączeń klejowych komponentów stalowych”. *Przegląd Spawalnictwa* (7): 40–45.
- [5] Mistur L., J. Czuchraj. 2005. „Metody spawania oraz sposoby oceny jakości złączy spawanych”. Krosno: KaBe.
- [6] Rudawska A., Ł. Sosnowski. 2013. „Wybrane zagadnienia wytrzymałości połączeń spawanych i klejowych stali konstrukcyjnej S235JR”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* (1): 49–56.
- [7] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Politechnika Lubelska.
- [8] Rudawska, A. i in. 2016. „Wytrzymałość połączeń klejowych po różnym czasie sezonowania”. *Przetwórstwo Tworzyw* (3): 126–131.
- [9] Siwek B. 2002. „Połączenia spawane, zgrzewane, lutowane i klejone”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [10] Vedula S. 2010. “Infrared thermography and ultrasonic inspection of adhesive bonded structures”. Overview and validity, Clemson University.

dr hab. inż. Anna Rudawska, prof. PL – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: a.rudawska@pollub.pl

inż. Kamil Kutek – absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, e-mail: kutek.kamil93@gmail.com

mgr inż. Izabela Miturska – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: i.miturska@pollub.pl

dr inż. Leszek Semotiuk – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: l.semotiuk@pollub.pl