

dr inż. Krzysztof Kubicki¹⁾
ORCID 0000-0002-1804-3389

Manufacturing errors analysis of welded aluminum structures

Błędy wykonawcze spawanych konstrukcji aluminiowych

DOI: 10.15199/33.2025.10.24

Abstract. Welding of aluminum alloy elements is more demanding than those made of steel. This causes a greater number of welding imperfections and defects. The aim of the work was to identify the causes of manufacturing errors in welded aluminum structures. Based on example joints with welding imperfections, an analysis of the causes of these errors was presented. Manufacturing recommendations for welds in aluminum alloy structures were given.

Keywords: metal structures; aluminum alloys; welding rules; welded joints; MIG; TIG.

Streszczenie. Spawanie elementów ze stopów aluminium jest bardziej wymagające niż wykonanych ze stali. Powoduje to powstawanie większej liczby niezgodności i wad spawalniczych. Celem pracy prezentowanej w artykule była identyfikacja przyczyn powstawania błędów wykonawczych spawanych konstrukcji aluminiowych. Na podstawie przykładowych połączeń z niezgodnościami spawalniczymi przedstawiono analizę przyczyn powstawania tych błędów. Podano zalecenia wykonawcze dotyczące spoin konstrukcji ze stopów aluminium.

Słowa kluczowe: konstrukcje metalowe; stopy aluminium; zasady spawania; złącza spawane; MIG; TIG.

Aluminum alloys are the second most commonly used metal in construction after steel. Their properties, such as lightness, exceptional strength-to-weight ratio, ductility, and corrosion resistance, make them a nearly ideal material for building structures. Aluminum is also easily recycled, making it one of the most sustainable and efficient building materials. Aluminum alloys are used not only in architecture and construction, but also in automotive, aviation, space, mechanical engineering, medicine, electronics, and various other industries. The range of applications and design issues of aluminum structures have been discussed in numerous works [1÷4].

In recent years, modern methods of welding aluminum alloys have been developed and are being refined: pulsed CMT-MIG (Cold Metal Transfer Arc-Metal Inert Gas) [5, 6], double pulse MIG [7], MIG with STITCH process [8]; laser [9]; laser-MIG hybrid techniques [10, 11] or continuous/pulsed hybrid laser [12], High-Speed MIG welding assisted by magnetic fields [13], plasma [14], STT (Surface Tension Transfer Arc Welding) [15], and FSW (Friction Stir Welding) [16÷18].

In practice, traditional welding methods – MIG (Metal Inert Gas) or TIG (Tungsten Inert Gas) – are most often used, as they are relatively cheap and allow for obtaining good quality welds [19, 20]. Welding of aluminum and its alloys is associated with certain limitations, mainly resulting from its properties, such as: high thermal conductivity, reactivity with gases, formation of difficult-to-melt oxides on the surface, high fluidity, tendency to hot cracks, and susceptibility to pore formation.

Welded joints offer many advantages, including high strength, tightness, and durability, provided they are properly executed. The principles of proper shaping of weld-

stopy aluminium są drugim po stali najczęściej stosowanym metalem w budownictwie. Ich właściwości, takie jak lekkość, wyjątkowo korzystny stosunek wytrzymałości do masy, plastyczność oraz odporność na korozję, czynią je prawie idealnym materiałem do wykonywania konstrukcji budowlanych. Aluminium jest również łatwe do recyklingu, dlatego też należy do najbardziej zrównoważonych i wydajnych materiałów budowlanych. Stopy aluminium znajdują zastosowanie nie tylko w architekturze i budownictwie, ale także w motoryzacji, lotnictwie, kosmonautyce, budowie maszyn, medycynie, elektronice i różnych gałęziach przemysłu. Zakres zastosowania i problemy projektowe konstrukcji aluminiowych zostały omówione w wielu pracach [1÷4].

W ostatnich latach powstały i są rozwijane nowoczesne metody spawania stopów aluminium: CMT-MIG z pulsem (Cold Metal Transfer Arc-Metal Inert Gas) [5, 6], MIG z podwójnym pulsem [7], MIG z procesem STITCH [8]; laser [9]; techniki hybrydowe łączące laser z MIG [10, 11] lub laser ciągły i pulsowy [12], High-Speed MIG z polami magnetycznymi [13], plazma [14], STT (Surface Tension Transfer Arc Welding) [15], a także FSW (Friction Stir Welding) [16÷18].

W praktyce najczęściej stosuje się tradycyjne metody spawania – MIG (Metal Inert Gas) lub TIG (Tungsten Inert Gas) – jako relatywnie tanie, a pozwalające uzyskać spoiny dobrej jakości [19, 20]. Spawanie aluminium i jego stopów wiąże się z pewnymi ograniczeniami, wynikającymi głównie z jego właściwości, takimi jak: duża przewodność cieplna, reaktywność z gazami, tworzenie się trudno topliwych tlenków na powierzchni, rzadkość, skłonność do pęknięć gorących czy podatność na tworzenie porów.

Złącza spawane mają wiele zalet, w m.in. dużą wytrzymałość, szczelność i trwałość, pod warunkiem poprawnego ich wykonania. Zasady prawidłowego kształtowania spawanych złączy konstrukcji aluminiowych są analogiczne jak w przypadku konstrukcji stalowych [21]. Wykonanie prawidłowej spoiny w przypadku elementów ze stopów aluminium

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa; krzysztof.kubicki@pcz.pl

ed joints in aluminum structures are similar to those for steel structures [21]. However, creating a proper weld in aluminum alloy components is significantly more difficult than in steel components and requires specialized qualifications and experience from the welder. When welding aluminum alloys, parameter corrections are usually necessary. Lack of knowledge and skills are the primary causes of welding imperfections, particularly in aluminum alloy joints [22]. Improperly executed joints not only cause a loss of the structure's load-bearing capacity but also affect its durability, functionality, and aesthetics. The quality levels of such joints are specified in the PN-EN ISO 10042:2018-09 standard [23], and the classification of geometric welding imperfections is provided in the PN-EN ISO 6520-1:2009 standard [24]. It should be emphasized that workmanship defects in welds may lead to structural failure [25, 26].

Welding imperfections and defects

A weld imperfection is any deviation from a properly executed welded joint. It may take the form of a weld discontinuity or a deviation from the planned geometry. A defect, on the other hand, is an unacceptable weld imperfection, i.e., one in which limit values are exceeded.

Welding imperfections can be divided into external, e.g., surface cracks and pores, and internal, e.g., inclusions or bubbles. Six groups of weld imperfections are distinguished [24]:

- 1 – cracks;
- 2 – cavities;
- 3 – solid inclusions;
- 4 – lack of fusion and penetration;
- 5 – imperfect shape and dimensions;
- 6 – miscellaneous imperfections.

Weld cracks are the most serious defects in welded joints and can have various causes. These include: welding stresses (related to high thermal expansion and shrinkage during solidification); contamination; inappropriate filler metal composition; incorrect preparation of the joined components; or incorrect welding parameters. Improper initiation or termination of the weld (leaving a weld crater) or a notch caused, for example, by incomplete penetration, can also be a point where a crack will begin. Aluminum joints are particularly susceptible to hot cracks. Other welding defects can contribute to crack initiation. Fatigue cracks can develop during operation, especially under multi-variable loads [27÷30].

Many defects can be prevented by selecting the right filler metal, cleaning the base material, selecting the appropriate welding method (TIG for thin elements and MIG for thicker elements) [23], setting the appropriate welding parameters, such as arc voltage, welding current, AC balance and frequency, welding speed, shielding gas type and amount, arc extinction time, and sometimes by preheating (especially for thicker elements). The welding torch tilt angle is also important, as is a suitably low height of the tungsten electrode above the welded material in the case of the TIG method, and the appropriate stick-out length in the case of the MIG method.

jest jednak znacznie trudniejsze niż elementów stalowych i wymaga od spawacza specjalnych kwalifikacji oraz doświadczenia. Podczas spawania stopów aluminium potrzebna jest zwykle korekta parametrów. Brak wiedzy i umiejętności to podstawowe przyczyny powstawania niezgodności spawalniczych szczególnie w złączach ze stopów aluminium [22]. Nieprawidłowo wykonane złącza nie tylko powodują utratę nośności konstrukcji, ale także wpływają na jej trwałość, funkcjonalność użytkowania czy estetykę. Poziomy jakości takich złączy podano w normie PN-EN ISO 10042:2018-09 [23], a klasyfikację geometrycznych niezgodności spawalniczych w normie PN-EN ISO 6520-1:2009 [24]. Należy podkreślić, że niedociągnięcia wykonawcze spoin mogą prowadzić do awarii konstrukcji [25, 26].

Niezgodności i wady spawalnicze

Niezgodność spawalnicza to każde odchylenie od poprawnie wykonanego złącza spawanego. Może mieć charakter nieciągłości spoiny lub odchylenia od zaplanowanej geometrii. Wadą jest natomiast niedopuszczalna niezgodność spawalnicza, czyli taka, w przypadku której przekroczone są graniczne wartości.

Niezgodności spawalnicze można podzielić na zewnętrzne, np. pęknięcia powierzchniowe i pory oraz wewnętrzne, np. wtrącenia czy pęcherze. Wyróżnia się sześć grup niezgodności spawalniczych [24]:

- 1 – pęknięcia;
- 2 – pustki;
- 3 – wtrącenia stałe;
- 4 – przyklejenia i braki przetopu;
- 5 – niewłaściwy kształt i wymiary;
- 6 – różne.

Pęknięcia spawalnicze są najpoważniejszymi wadami złączy spawanych i mogą mieć różne przyczyny. Należą do nich: naprężenia spawalnicze (związane z dużą rozszerzalnością termiczną i skurczem przy zestaleniu); zanieczyszczenia; nieodpowiedni skład spoiwa; niepoprawne przygotowanie łączonych elementów czy niewłaściwe parametry spawania. Niepoprawne zainicjowanie lub zakończenie spoiny (pozostawienie krateru spawalniczego) albo korb spowodowany np. brakiem pełnego przetopu może być również miejscem, w którym zacznie się pęknięcie. Złącza aluminiowe są szczególnie podatne na pęknięcia gorące. Do zainicjowania pęknięć mogą przyczynić się inne wady spawalnicze. W czasie eksploatacji, szczególnie przy obciążeniach wielokrotnie zmiennych mogą powstać pęknięcia zmęczeniowe [27÷30].

Wielu wadom można zapobiec przez dobór właściwego spoiwa, oczyszczenie materiału podstawowego, wybór odpowiedniej metody spawania (w przypadku elementów cienkich – TIG, a grubszych – MIG) [23], ustawienie właściwych parametrów spawania, takich jak napięcie łuku, natężenie prądu spawania, balans i częstotliwość prądu przemiennego, prędkość spawania, rodzaj i ilość gazu osłonowego, czas wygaszania łuku, a niekiedy przez wstępne podgrzanie (szczególnie grubszych elementów). Istotny jest także kąt pochylenia uchwytu spawalniczego, a w przypadku metody TIG również

Examples of execution errors

Execution errors lead to the formation of welding imperfections and defects. These errors are usually caused by a lack of knowledge and skills on the part of welding personnel or by failure to comply with the required technological procedures. When welding aluminum alloys, attention must be paid to many aspects. Although most TIG and MIG welding machines are universal, they must be properly re-configured for aluminum welding. For example, in the MIG method, it is necessary not only to change the wire but also to replace the wire liner (with a Teflon or graphite one), the contact tip in the welding torch (with a larger inner diameter), and the wire feed rollers (with U-groove rollers). Proper selection of parameters is crucial for achieving high-quality welds. For standard components, manufacturer recommendations for the welding machine can often be used. However, in the case of more complex joints – such as parts with significant thickness differences or unusual geometries – it is best to determine welding parameters through trial and error.

Photos 1÷7 show examples of welding imperfections and defects. Aluminum alloys 1050 and 5xxx series were used. Regardless of the welding method, at the beginning (photo 1) and end (photo 2) of the weld, base metal melting can occur at the edges of the joined components. Avoiding this defect is quite difficult while ensuring proper penetration; however, the use of a run-on or run-off tab allows for effective prevention of this undesirable effect. At the weld end, a crater forms (photo 1a), resulting from excessively rapid cooling of the weld pool. This often leads to crack formation and, in extreme cases, a hole. Setting a longer arc extinction time and allowing the weld pool to “fade out” gradually at the end of the weld, while adding filler wire, enables proper crater filling. In photo 1, the area indicated by the arrow shows the result of welding without shielding gas. This produces an irregular, oxidized weld with high porosity.

In the butt joint shown in photo 1, full penetration was achieved, whereas in photo 2, sections without penetration are visible (at the beginning of the weld and in the middle – after a welding interruption) due to insufficient temperature of the welded components. At the end of the weld, on the other hand, excessive heat buildup in the material resulted in excessive penetration. When using the TIG method, penetration depth can be controlled more precisely than with MIG welding. Careful observation of the weld pool, and adjusting the welding speed and the amount of filler wire accordingly – while simulta-

odpowiednio mała wysokość elektrody wolframowej nad materiałem spawanym, a przy metodzie MIG właściwa długość wolnego wylotu.

Przykłady błędów wykonawczych

Błędy wykonawcze powodują powstawanie niezgodności i wad spawalniczych. Błędy te wynikają zwykle z braku wiedzy i umiejętności personelu spawalniczego lub niezachowania reżimu technologicznego. Przy spawaniu stopów aluminium należy zwrócić uwagę na wiele aspektów. Mimo że większość urządzeń spawalniczych TIG i MIG jest uniwersalna, to należy przed spawaniem aluminium przebroić te urządzenia, np. przy metodzie MIG konieczna jest nie tylko zmiana drutu, ale także przewodnika (na teflonowy lub grafitowy), końcówki prądowej uchwytu spawalniczego (większa średnica otworu) i rolki prowadzącej drut (rowki w kształcie litery U). W celu poprawnego wykonania spoin kluczowy jest dobór parametrów. Spawając typowe elementy, można wykorzystać zalecenia producenta urządzenia, ale w przypadku bardziej złożonych złączy, np. elementów mocno różniących się grubością czy o nietypowej geometrii, najlepiej dobierać parametry spawania metodą prób.

Na fotografiach 1÷7 przedstawiono przykładowe niezgodności i wady. Wykorzystano stopy aluminium 1050 i serii 5xxx. Niezależnie od metody spawania, przy rozpoczęciu (fotografia 1) i zakończeniu (fotografia 2) spoiny, na krawędziach łączonych elementów może dojść do podtopienia materiału podstawowego. Uniknięcie tej wady jest dosyć trudne przy jednoczesnym zapewnieniu właściwego przetopu, ale zastosowanie płytki wybiegowej pozwala w łatwy sposób zabezpieczyć się przed tym niekorzystnym efektem. Na zakończeniu spoiny tworzy się krater (fotografia 1a), który powstaje przy zbyt szybkim stygnięciu spoiny i często powoduje powstawanie pęknięć, a w skrajnym przypadku otworu. Ustawienie dłuższego czasu wygaszania łuku i tzw. rozmycie jeziora spawalniczego na końcu spoiny, z jednoczesnym dodaniem drutu spawalniczego, pozwala prawidłowo wypełnić krater. Na fotografii 1, w miejscu wskazanym strzałką, widoczny jest efekt spawania bez gazu osłonowego. Tworzy się wówczas nieregularna utleniona spoina o dużej porowatości.

W połączeniu doczołowym przedstawionym na fotografii 1 uzyskany jest pełny przetop, natomiast na fotografii 2 występują odcinki bez przetopu (na początku spoiny i w połowie długości – po przerwie w spawaniu) z powodu zbyt niskiej temperatury spawanych elementów. Z kolei pod koniec spoiny, gdy materiał zbyt się nagrzał, powstał zbyt duży przetop. Podczas spawania metodą TIG można lepiej kontrolować głębokość penetracji niż w metodzie MIG. Uważna obserwacja jeziora spawalniczego i na tej pod-

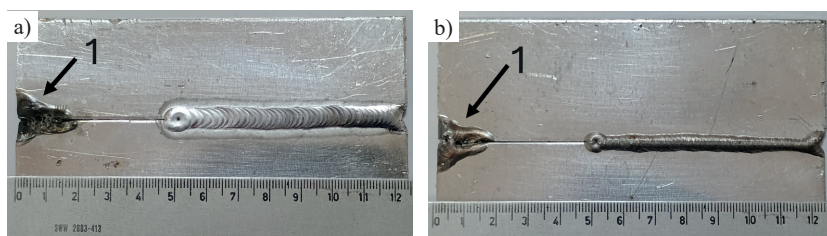


Photo 1. Butt joint of 2 mm thick sheets using the TIG method: a) weld face; b) weld root

Fot. 1. Połączenie doczołowe blach grubości 2 mm metodą TIG: a) lico spoiny; b) grani spoiny

neously maintaining proper electrode positioning relative to the workpiece – allows the welder to avoid such defects. However, this requires a high level of experience and skill from the welder.

When joining thin components, burn-through of the weld (photo 3) can easily occur. Burn-through is the collapse of the weld pool, usually caused by improper welding parameter settings. One of the difficulties in welding aluminum – and in avoiding burn-through – is that the material does not noticeably change color as its temperature increases, which makes it easy to overheat.

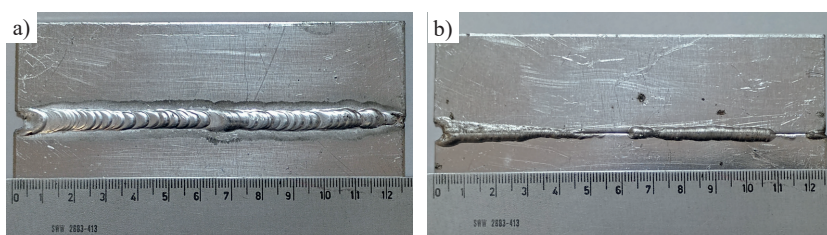


Photo 2. Butt joint of 2 mm thick sheets using the MIG method: a) weld face; b) weld root

Fot. 2. Połączenie doczołowe blach grubości 2 mm metodą MIG: a) lico spoiny; b) gran spoiny

Penetration issues also occur in lap joints (photo 4) and in joints with fillet welds, where achieving the proper temperature at the weld root is particularly challenging. In the latter case, the welding arc initially heats the joined components not directly at the root but at some distance from it. This may result in melting along the weld edges while failing to achieve proper root penetration. In lap joints involving materials of different thicknesses, lack of fusion (cold lap) is often observed. This can be eliminated by directing the electrode in such a way that the thicker material is heated more intensely first. In photo 4a, it can also be seen that the weld was started some distance from the edge, which caused deformation of the sheet ends and the formation of a notch at that location.

Lack of penetration frequently occurs in joints made at a small angle (photo 5b). Such joint designs should be avoided

stawie dostosowanie prędkości spawania oraz ilości podawanego drutu, przy jednoczesnej kontroli położenia elektrody względem materiału, pozwala uniknąć powstawania takich wad. Wymaga to jednak od spawacza dużego doświadczenia.

Przy łączeniu cienkich elementów łatwo może dojść do przepalenia spoiny (fotografia 3). Przepalenie jest zapadnięciem się jeziora spawalniczego, powstałym najczęściej na skutek złego ustawienia parametrów spawania. Trudność spawania aluminium, w tym uniknięcie przepalenia, wynika również z tej przyczyny, że ze wzrostem temperatury praktycznie nie zmienia się barwa materiału i łatwo go przegrzać.

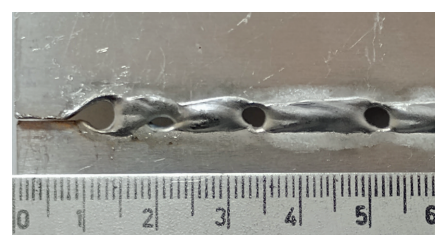


Photo 3. Butt joint of 1,5 mm thick sheets using the MIG method

Fot. 3. Połączenie doczołowe blach grubości 1,5 mm metodą MIG

Problemy z przetopem występują również w połączeniach zakładkowych (fotografia 4) i w połączeniach ze spoinami pachwinowymi, w przypadku których trudno jest uzyskać właściwą temperaturę w grani spoiny. W tym ostatnim przypadku łuk spawalniczy rozgrzewa w pierwszej kolejności elementy łączone nie w samej grani, ale w pewnym oddaleniu. Może to skutkować podtopieniami na krawędzi spoiny przy jednoczesnym braku właściwego przetopu. W połączeniach zakładkowych elementów

o różnej grubości można często zaobserwować przyklejenie. Można je wyeliminować, prowadząc elektrodę w taki sposób, aby w pierwszej kolejności bardziej nagrzewała grubszy materiał. Na fotografii 4a widać również, że rozpoczęcie spoiny nastąpiło w pewnej odległości od krawędzi. Spowodowało to odkształcenie końców blach i powstanie w tym miejscu karbu. Brak przetopu często występuje w przypadku elementów łączonych pod małym kątem (fotografia 5b). Należy unikać projektowania

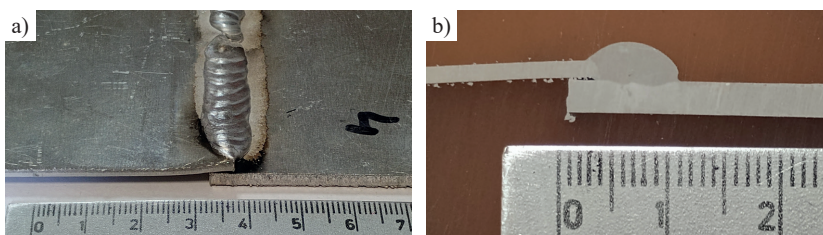


Photo 4. Lap joint of 1,5 and 3 mm thick sheets using the MIG method: a) weld face; b) metallographic section

Fot. 4. Połączenie zakładkowe blach grubości 1,5 i 3 mm metodą MIG: a) lico spoiny; b) przekrój metalograficzny

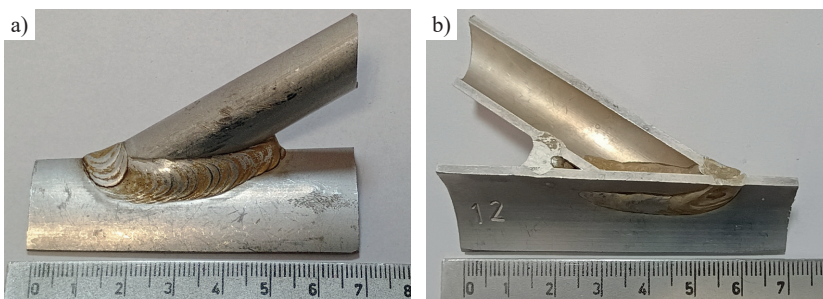


Photo 5. MIG connection of pipes with a wall thickness of 2 mm: a) weld face; b) joint cross-section

Fot. 5. Połączenie rur o grubości ścianki 2 mm metodą MIG: a) lico spoiny; b) przekrój łącza

when the angle between joined parts is less than 30° (a minimum of 45° is recommended).

Achieving full penetration is also difficult at the start of the weld (photo 6b). This defect can be prevented by holding the arc slightly longer at the starting point or by preheating the material locally before welding.

Execution errors are easily made when welding components of different thicknesses (photo 7), due to the unpredictable temperature distribution. In this case, improper edge preparation and incorrect welding parameters resulted in a lack of full penetration at the corner joint (1), between the tube walls and the casting (4), as well as in some sections of the joints between the tubes (3). Additionally, a root-side crack in the weld occurred (2).

Summary

The most common welding imperfections and defects encountered when welding aluminum alloys include root leakage, lack of penetration, improper weld face shape in difficult welding positions, hot cracking, and – in the MIG method – high porosity and oxidation in the heat-affected zone. Defects in welds of aluminum alloy structures may result from design errors (e.g., incorrect detailing of structural joints, inappropriate selection of the welding method or filler metal), but most often they are caused by execution errors. Civil engineers typically do not possess sufficient knowledge required to properly design welded joints in aluminum structures, nor to supervise or inspect such welds. It appears that designers should work in close cooperation with welding personnel. Most welded joints in aluminum structures are made under workshop conditions and supervised by qualified staff. This practice should also be applied to welded joints made on construction sites. When welding in shielding gas environments outdoors, protection against weather conditions (such as wind and moisture) must be ensured – for example, by using a welding tent. Personnel performing welded joints in aluminum components must

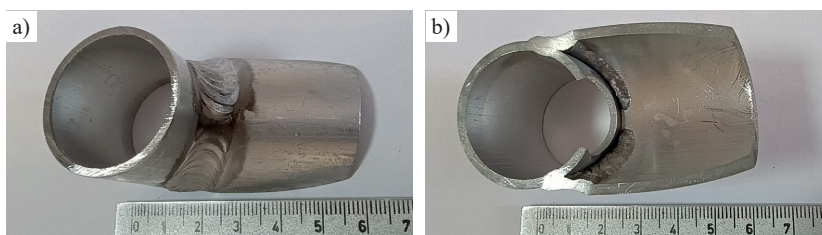


Photo 6. MIG connection of pipes with a wall thickness of 2 mm: a) weld face; b) joint cross-section

Fot. 6. Połączenie rur o grubości ścianki 2 mm metodą MIG: a) lico spoiny; b) przekrój złącza

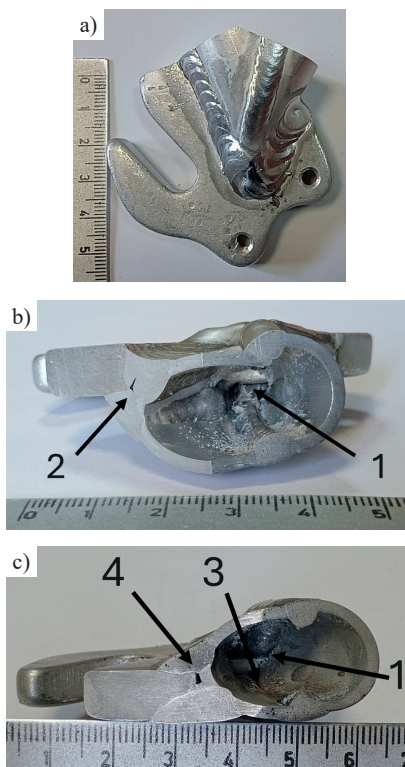


Photo 7. MIG connection of pipes with a wall thickness of 2 mm with an 8 mm casting: a) weld faces of joint 1; b) cross-section of joint 1; c) cross-section of joint 2 (description in text)

Fot. 7. Połączenie rur o grubości ścianek 2 mm z odlewem 8 mm metodą MIG: a) lica spoin złącza 1; b) przekrój złącza 1; c) przekrój złącza 2 (opis w tekście)

połączeń, w których kąt pomiędzy łączonymi elementami jest mniejszy niż 30° (zalecane minimum 45°). Pełny przetop trudno jest także uzyskać w miejscach rozpoczęcia spoiny (fotografia 6b). Można tego błędu uniknąć, przytrzymując

łuk na starcie nieco dłużej lub wstępnie podgrzewając elementy w tym miejscu.

Błędy wykonawcze łatwo popełnić przy spawaniu elementów o różnej grubości (fotografia 7) ze względu na nieprzewidywalny rozkład temperatury. Niewłaściwe przygotowanie krawędzi i niewłaściwe ustawienie parametrów spawania spowodowały w tym przypadku brak pełnego przetopu w narożu styku (1), między ściankami rur a odlewem (4) oraz na niektórych odcinkach styków między rurami (3). Ponadto nastąpiło pęknięcie spoiny od strony grani (2).

Podsumowanie

Najczęściej spotykane niezgodności i wady spawalnicze, charakterystyczne w przypadku spawania stopów aluminium, to wyciek grani, brak przetopu, niepoprawny kształt lica spoin wykonywanych w trudnych pozycjach, pęknięcia gorące, a w metodzie MIG duża porowatość i utlenienie w strefie wpływu ciepła. Wady spoin konstrukcji ze stopów aluminium mogą powstawać na skutek błędów projektowych (np. niewłaściwego ukształtowania węzłów konstrukcyjnych, niepoprawnego doboru metody spawania czy spoiwa), ale najczęściej są wynikiem błędów wykonawczych. Inżynierowie

budownictwa zwykle nie mają wystarczającej wiedzy potrzebnej zarówno do prawidłowego zaprojektowania połączeń spawanych konstrukcji aluminiowych, jak i do nadzoru oraz odbioru takich złączy. Wydaje się, że projektanci powinni ściśle współpracować z personelem spawalniczym. Większość styków spawanych konstrukcji aluminiowych wykonywanych jest w warunkach warsztatowych i tam nadzorowanych przez kompetentny personel. Taka praktyka powinna być również stosowana przy wykonywaniu złączy spawanych na budowie. Należy pamiętać, aby przy spawaniu w osłonie gazów w warunkach polowych zapewnić ochronę przed wpływem czynników atmosferycznych (wiatr, wilgoć) np. przez zastosowanie namiotu spawalniczego. Przy wykonywaniu spawanych złączy

be highly qualified and experienced. Welding is a special process that must be carried out under strict supervision by certified welding personnel holding IWE or IWS qualifications, in accordance with the guidelines of the International Institute of Welding (IIW) and the European Welding Federation (EWF).

Photos: author

Received: 27.05.2025

Revised: 08.07.2025

Published: 23.10.2025

elementów aluminiowych personel musi mieć wysokie kwalifikacje i duże doświadczenie. Spawanie jest procesem specjalnym, który podlega ścisłemu nadzorowi przez certyfikowany personel spawalniczy, posiadający uprawnienia IWE i IWS zgodnie wytycznymi Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa (IIW) i Europejskiej Federacji Spawalnictwa (EWF).

Fotografie: autor

Artykuł wpłynął do redakcji: 27.05.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.07.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] Kwiatkowski T. Aluminium w nowoczesnych konstrukcjach budowlanych. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo; 2012; nr 167, z. 18:108-115.
- [2] Efthymiou E, Cöcen ÖN, Ermolli SR. Sustainable Aluminium Systems. Sustainability; 2010; 2(9):3100-3109.
- [3] Gwóźdź M. Problemy projektowe współczesnych konstrukcji aluminiowych. Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej; 2007; z. 4-A.
- [4] Kossakowski P. Stopy aluminium jako materiał konstrukcyjny ustrojów nośnych mostów. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo; 2016; DOI: 10.17512/znb.2016.1.15.
- [5] Bruckner J. Metoda CMT – rewolucja w technologii spawania, Przegląd Spawalnictwa; 2009; 7-8:24-28.
- [6] Rajendran C, Sonar T, Ivanov M, Sandeep Ch, Shanthi C, Gurajala NK, Balachandrar K, Xu J. Enhancing tensile properties of pulsed CMT-MIG welded high strength AA2014-T6 alloy joints: Effect of post weld heat treatment. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture; 2024; DOI: 10.1016/j.ijlmm.2023.10.004.
- [7] Ye Z, Zhu H, Wang S, Wang W, Yang J, Huang J. Fabricate high-strength 7075 aluminum alloy joint through double pulse MIG welding process. Journal of Manufacturing Processes; 2024; DOI: /10.1016/j.jmapro.2024.07.066.
- [8] Makles K, Kudła K, Wojsyk K, Nowak M. Analiza stapienia drutu elektrodowego w procesie STITCH. w: Winczek J., Postawa P., Gucwa M. Innowacje w technologii i automatyzacji. Częstochowa: Wydawnictwo PCz; 2021. pp. 193-202.
- [9] Jia F, Wang Ch, Liu Y, Wang G, Jiang N. Mechanism analysis of laser welding strength improvement of dissimilar materials based on surface micro-texture. Optics and Lasers in Engineering; 2025; DOI:10.1016/j.optlas-eng.2025.108902.
- [10] Jia Y, Wen T, Huang N, Zhang J, Xiao J, Chen S. Huang, W. Research on aluminum alloy welding process based on high frequency and low power pulsed Laser-MIG hybrid welding. Optics & Laser Technology; 2022; DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.107899.
- [11] Liu J, Zhu H, Li Z, Cui W, Shi Y. Effect of ultrasonic power on porosity, microstructure, mechanical properties of the aluminum alloy joint by ultrasonic assisted laser-MIG hybrid welding. Optics & Laser Technology; 2019; DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105619.
- [12] Wang M, Xia P, Guo J, Yin Y, Zhan X, Feng X. Study on the microstructure and mechanical properties of continuous/pulsed hybrid laser shallow penetration welding joints of 6061 aluminium alloy. Optics & Laser Technology; 2025; DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111390.
- [13] Wu L, Han X, Wu X, Wu Y, Chen J, Su H, Wu Ch. The study of high-speed MIG welding assisted by compound external magnetic fields for 6N01-T6 aluminum alloy. Journal of Manufacturing Processes; 2022; DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.09.028.
- [14] Wang X, Yan Z, Liu K, Meng D, Pan R, Xiao J, Jiang F, Chen S. Microstructure and mechanical properties of welds at keyhole closures in variable-polarity plasma arc aluminum welding. Journal of Manufacturing Processes; 2024; DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.12.032.
- [15] Nagasai BP, Ramaswamy A, Mani J. Tensile properties and microstructure of surface tension transfer (STT) arc welded AA 6061-T6 aluminum alloy joints. Materials Today: Proceedings; 2023; DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.576.
- [16] He Z, Peng Y, Yin Z, Lei X. Comparison of FSW and TIG welded joints in Al-Mg-Mn-Sc-Zr alloy plates. Transactions of Nonferrous Metals Society of China; 2011; DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60915-1.
- [17] Lacki P, Derlatka A. Zastosowanie technologii FSW w strukturach aluminiowych, Obróbka Plastyczna Metali; 2013; XXIV/3:205-218.
- [18] Abolusoro OP, Khothane MC, Mhike W, Omoniyi P, Kailas SV, Akinlabi ET. Influence of welding parameters and post weld heat treatment on mechanical, microstructures and corrosion behaviour of friction stir welded aluminium alloys. Journal of Materials Research and Technology; 2024; DOI:10.1016/j.jmrt.2024.07.175.
- [19] Kubicki K. Efficiency and quality of the aluminium alloy welding process depending on the method used. Scientific Papers Of Silesian University Of Technology Organization And Management Series; 2024; DOI:10.29119/1641-3466.2024.204.21.
- [20] Wang Q, Wan Z, Zhao T, Zhao Y, Yan D, Wang G, Wu A. Tensile properties of TIG welded 2219-T8 aluminum alloy joints in consideration of residual stress releasing and specimen size. Journal of Materials Research and Technology; 2022; DOI:10.1016/j.jmrt.2022.03.059.
- [21] Kubicki K, Wojsyk K. Zasady bezpiecznego i ekonomicznego projektowania oraz wykonywania konstrukcji spawanych. Materiały Budowlane; 2022; DOI:10.15199/33.2022.12.06.
- [22] Woźny P, Błachnio J, Dragan K. Jakość spawów elementów ze stopów Al wojskowych statków powietrznych wykonanych metodą spawania łukowego. Journal of KONBiN; 2017; DOI:10.1515/jok-2017-0076.
- [23] PN-EN ISO 10042:2018-09 Spawanie – Złącza spawane łukowo w aluminium i jego stopach – Poziomy jakości dla niezgodności spawalniczych.
- [24] PN-EN ISO 6520-1:2009 Spawanie i procesy pokrewne – Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach – Część 1: Spawanie.
- [25] Wichtowski B, Hałas R. Przyczyny stanu przedawaryjnego aluminiowych masztów antenowych w świetle badań. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane; 2011:899-906.
- [26] Stabryła J, Dutka K. Wpływ technologiczności na awarię spawanej konstrukcji aluminiowej. Welding Technology Review, 2013; DOI: 10.26628/wtr.v85i6.251.
- [27] Arunakumara PC, Sagar HN, Gautam B, George R, Rajeev S. A review study on fatigue behavior of aluminum 6061 T-6 and 6082 T-6 alloys welded by MIG and FS welding methods. Materials Today: Proceedings; 2023; DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.242.
- [28] Duan Ch, Hao X, Luo X, Xiankun Cao, Hangcheng Xu, Zongtao Zhu. Microstructure and fatigue properties of laser-MIG hybrid welding of medium-thickness 6005A aluminum alloy. Engineering Failure Analysis; 2024; DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108753.
- [29] Xing S, Pei X, Mei J, Dong P, Su S, Zhen Ch. Weld toe versus root fatigue failure mode and governing parameters: A study of aluminum alloy load-carrying fillet joints. Marine Structures; 2023; DOI: 10.1016/j.marstruc.2022.103344.
- [30] Siwowski T. Procedura oceny zmęczenia pomostów metalowych w obiektach mostowych. Drogi i mosty; 2012; 1:53-79.