

WELDS' QUALITY OF ALUMINIUM ALLOY COMPONENTS OF MILITARY AIRCRAFT EXECUTED BY ARC WELDING METHOD

JAKOŚĆ SPAWÓW ELEMENTÓW ZE STOPÓW AL WOJSKOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH WYKONANYCH METODĄ SPAWANIA ŁUKOWEGO

Piotr Woźny¹, Józef Błachnio², Krzysztof Dragan²

¹ Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 2 S.A., ² Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Abstract: The paper presents the problems arising in the process of repairs of aircraft (AC) components made of aluminium alloys during arc welding with the TIG (tungsten inert gas) method. The paper provides information on the rules applicable in the welding process qualification. The procedure algorithm when qualifying the welding process was presented in accordance with PN-EN ISO 15614-2. The main causes and factors affecting the formation of defects and welding imperfections were described and classified. The principles of preparing the components for welding and selection of a binder were discussed. The issue of effect of the welding parameters on the formation of defects and welding imperfections in relation to PN-L-01426 standard was raised. The application of computed tomography in assessment of the welded joints was described and tomograms from tests of butt welds of aluminium alloys made of the AW 5754 grade aluminium alloy were presented. On the example of the tomograms, the welding imperfections and defects formed in the tested joints were discussed. The usefulness of computed tomography in assessment of the welds' quality was shown.

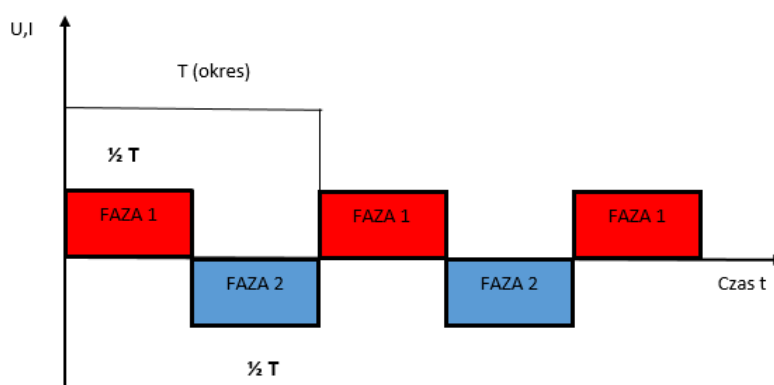
Keywords: welding, aluminium alloys, defects, tests, reliability

Streszczenie: W artykule przedstawiono problemy pojawiające się w procesie napraw elementów statków powietrznych (SP) wykonanych ze stopów aluminium, w trakcie spawania łukowego metodą TIG (tungsten inert gas). W artykule zawarto informacje dotyczące zasad obowiązujących w procesie kwalifikowania technologii spawania. Przedstawiono algorytm postępowania przy kwalifikowaniu technologii spawania zgodnie z normą. Opisano główne przyczyny i czynniki mające wpływ na powstawanie wad i niezgodności spawalniczych oraz dokonano ich klasyfikacji. Omówiono zasady przygotowania elementów do spawania oraz doboru spoiwa. Podjęto temat wpływu parametrów spawania na powstawanie wad i niezgodności spawalniczych w odniesieniu do normy PN-L 01426. Przedstawiono przykłady uszkodzeń eksploatacyjnych połączeń spawanych. Opisano zastosowanie metody tomografii komputerowej do oceny połączeń spawanych oraz przedstawiono tomogramy z badań spawów doczołowych stopów aluminium wykonanych ze stopu aluminium gatunku AW 5754. Na przykładzie tomogramów omówiono powstałe w badanych złączach niezgodności i wady spawalnicze. Wykazano przydatność tomografii komputerowej do oceny jakości spawów.

Słowa kluczowe: spawanie, stopy aluminium, wady, badania, jakość

1. Wprowadzenie

Proces spajania metali podczas przeprowadzania napraw i remontów statków powietrznych (SP) musi zapewniać powtarzalność jakości uzyskanych połączeń. Zastosowana technologia bez względu na sposób realizacji automatyczny czy ręczny powinna gwarantować podobne parametry wytrzymałościowe dla wykonanych połączeń [4,5]. Ze względu na korzystne właściwości stopów aluminium wykorzystywane są one jako materiał konstrukcyjny w przemyśle lotniczym. Czynniki destrukcyjne występujące w procesie eksploatacji SP powodują zużycie i uszkodzenia elementów wykonanych ze stopów aluminium [9]. W związku z tym powstaje potrzeba realizacji napraw i regeneracji tych elementów. Powszechnie stosowaną metodą spawania stopów aluminium jest metoda spawania łukowego elektrodą nietopliwą w osłonie gazowej TIG. W czasie procesu spawania metodą wykorzystywany jest prąd przemienny o częstotliwości napięcia zasilającego 50/60 Hz. W przebiegu prostokątnym gdy elektroda ma potencjał dodatni to przez cały półokres występuje zjawisko oczyszczania katodowego strefy złącza (elektroda jest anodą a materiał spawany katodą). W drugim półokresie następuje chłodzenie elektrody i zarazem podgrzanie jeziora spawalniczego (elektroda jest katodą a materiał spawany anodą). Metoda TIG polega więc na zajarzaniu łuku elektrycznego i wygaszaniu co każde pół cyklu przy przejściu prądu przez „zero” z częstotliwością 100 razy na sekundę (rys.1). W porównaniu z metodą spawania laserowego gdzie wymagane jest zastosowanie drogich stacjonarnych stanowisk spawalniczych, metoda TIG jest relatywnie tania a wyposażenie stanowiska stosunkowo łatwe do przemieszczania. Mimo że jest to metoda powszechnie stosowana i bogato opisana w literaturze przedmiotu to w praktycznym zastosowaniu pojawiają się problemy technologiczne i wykonawcze. Utrzymanie wysokiego reżimu technologicznego oraz konieczność precyzyjnego doboru parametrów powoduje, że spajanie metodą TIG wymaga wysokich kwalifikacji i doświadczenia zarówno od projektanta procesu jak i bezpośredniego wykonawcy [10,11].



Rys.1 Spawanie aluminium – wykres przebiegu kształtu fali prądu przemiennego (fala prostokątna) [11,12]

Faza I - biegunowość dodatnia elektrody wolframowej - rozpraszanie warstwy tlenków pokrywających powierzchnię aluminium,

Faza II - uzyskiwanie odpowiedniego przetopu - intensywne podgrzewanie jeziorka spawalniczego.

2. Uszkodzenia eksploatacyjne połączeń spawanych w elementach wojskowych SP

Na każdy rodzaj połączenia spawanego w elementach SP działają różnego rodzaju obciążenia amogące doprowadzić do jego uszkodzenia. Połączenia spawane ulegają zniszczeniu w momencie przekroczenia określonego naprężenia niszczącego [4]. Również taki sam efekt może nastąpić przy znacznie mniejszej wartości naprężenia w przypadku ich cyklicznego występowania w długim okresie czasu. Mamy wtedy do czynienia ze zjawiskiem zmęczenia materiału[8]. Pęknięcia zmęczeniowe połączeń spawanych rozwijają się przy naprężeniach niższych niż granica plastyczności materiału rodzimego połączenia i bez zauważalnych odkształceń plastycznych. Często zmęczeniowy charakter zniszczenia wskazuje, że powodem pęknięcia są warunki eksploatacji, a nie jakość złącza spawanego. Wytrzymałość zmęczeniową determinuje najsłabsze miejsce połączenia w którym rozpoczyna się pęknięcie czyli karb geometryczny spiętrzający naprężenie[3]. Złącza spawane ze względu na niedoskonałość geometryczną i niedoskonałość procesu spawania zawierają niezgodności i wady będące przyczyną spiętrzenia naprężenia. Wypukłość lica lub wyciek grani spoiny wywołują nawet trzykrotne spiętrzenie wartości naprężenia[5,6]. O ile kształt lica można skorygować obróbką mechaniczną, to spiętrzenia graniowego praktycznie nie można zmniejszyć.

W uszkodzeniach eksploatacyjnych połączeń spawanych zauważamy też pęknięcia o charakterze kruchym, tj. pęknięcia praktycznie bez odkształceń plastycznych w ich rejonie. I tu oprócz wspomnianych obciążeń oscylacyjnych czynnikiem destrukcyjnymi może być kontakt elementu spawanego z substancjami eksploatacyjnymi tj. parą wodną, płynami agresywnymi i gazami aktywnymi chemicznie[3]. Spowoduje to przyspieszone zniszczenia połączenia np. w skutek korozji. Ponadto spoiny szczepne lub niepełny przetop w spoinach również będą działały jako koncentratory naprężeń, a więc miejsca, w których należy spodziewać się inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. W przypadku występowania drgań eksploatacyjnych spoiny szczepne stają się szczególnie silnymi inicjatorami pęknięcia zmęczeniowego [4,8]. Przykłady uszkodzeń spawów przedstawiono na rys. 2,3,4.

*Welds' quality of aluminium alloy components of military aircraft executed...
Jakość spawów elementów ze stopów al wojskowych statków powietrznych...*



a

Rys.2a Urwany króciec przewodu instalacji klimatyzacji w SWC (strefie wpływu ciepła)



b

Rys.2b Nieszczelność na spawie skrzydłowego zbiornika paliwowego



a

Rys.3a Pęknięcia spawów otworów rewizyjnych zbiornika paliwowego



b

Rys.3b Pęknięcie spawu w węźle uzbrojenia



a

Rys.4a Częściowe rozerwanie spawu korpusu hydroakumulatora

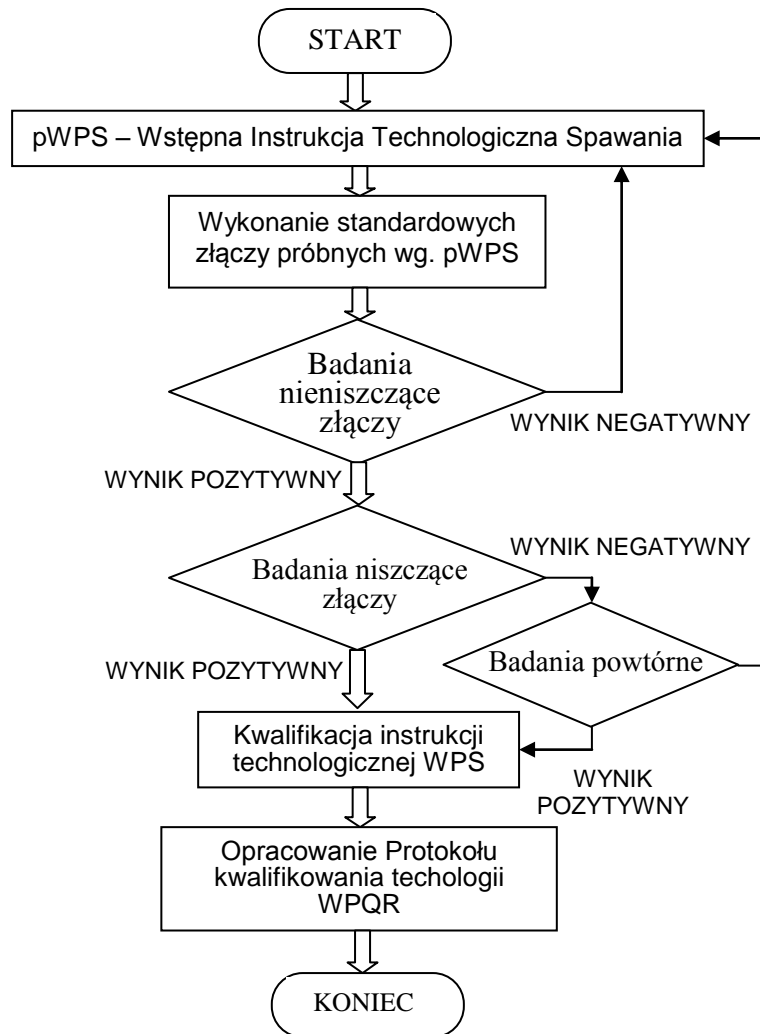


b

Rys.4b Pęknięty spaw zbiornik-akumulator płynu

3. Kwalifikowanie technologii spawania aluminium i jego stopów

Ze względu na odpowiedzialność konstrukcji w procesie napraw uszkodzeń SP wymagane jest stosowanie kwalifikowanej technologii spawania wg normy PN-EN ISO 15614-2:2008.



Rys.5 Algorytm kwalifikowania technologii spawania [16]

W normie zawarto wymagania odnoszące się do badań technologicznych oceniających wstępną instrukcję technologiczną spawania łukowego aluminium i jego stopów. Ponadto określono warunki przeprowadzania badania technologii spawania i zakresy kwalifikacji dla wszystkich praktycznych operacji spawalniczych [16].

Wymóg kwalifikowania technologii spawania przed rozpoczęciem produkcji zawarty jest w normie PN-EN ISO 3834-2. Metoda kwalifikowania musi być zgodna z normą wyrobu lub z wyspecyfikowanymi ustaleniami [17]. Kwalifikowanie technologii spawalniczych oznacza potwierdzenie przez jednostkę notyfikowaną (np. UDT, TÖV, PRS, Lloyd Register, Bureau Veritas itp.) poprawności stosowanej przez przedsiębiorstwo technologii spawalniczej.

Wymagania dotyczące treści instrukcji technologicznych spawania łukowego zawarte są w normie PN-EN ISO 15609-1: 2007. Instrukcja oprócz danych identyfikacyjnych wytwórcy powinna zawierać odniesienia do wstępnej instrukcji technologicznej spawania oraz dane materiału podstawowego i wymiary tj. zakresy grubości złączy lub zakresy średnicy zewnętrznej rur. Ponadto w instrukcji powinny znajdować się informacje dotyczące konstrukcji złącza, pozycji spawania, metod przygotowania złącza i opis techniki spawania wraz z parametrami technologicznymi [18].

4. Główne przyczyny i czynniki mające wpływ na powstawanie wad i niezgodności spawalniczych

Wady i niezgodności spoiny powstają wskutek błędów w procesie spawania, co prowadzi do uszkodzeń połączeń. Rozróżniamy dwa zasadnicze rodzaje wad spawalniczych:

- zewnętrzne - które można zaobserwować przy oględzinach zewnętrznych;
- wewnętrzne - powstające wewnątrz spoiny w czasie spawania.
- Znając źródło powstawania wad można zidentyfikować czynniki, które prowadzą do ich powstawania:
 - PERSONEL - niskie kwalifikacje pracowników;
 - WYPOSAŻENIA - przestarzały sprzęt, zły stan techniczny spawarek;
 - OTOCZENIE - nieodpowiednie warunki środowiskowe;
 - METODA - niewłaściwe technologie spawania;
 - ZARZĄDZANIE - zła organizacja pracy, brak kontroli.



Rys.6 Rodzaje wad spawalniczych [6,10,12]

W celu zmniejszenia ryzyka wystąpienia wad i niezgodności spawalniczych spowodowanych przyczynami technicznymi należy [6,10,12]:

- cyklicznie sprawdzać stan techniczny spawarek i wyposażenia pomocniczego;
- zaplanować i przeprowadzać przeglądy i remonty spawarek;
- zwiększyć nadzór nad sprzętem spawalniczym używanym w trudnych warunkach eksploatacyjnych;
- dokonywać niezbędnych wymian sprzętu zużytego;
- w miejsce wycofanego z użytkowania sprzętu spawalniczego zakupywać sprzęt wysokiej jakości z zapewnionym serwisem i obsługą posprzedażną.

Drugą grupą przyczyn mających wpływ na powstawanie wad i niezgodności spawalniczych są przyczyny technologiczne. W celu ich wyeliminowania należy:

- przeanalizować dobór metody do zaplanowanego procesu;
- uwzględnić w procesie technologicznym grubość i właściwości materiałów elementów spawanych;
- zweryfikować dobór parametrów procesu oraz materiałów pomocniczych;
- zapewnić właściwe warunki przechowywania materiałów spawalniczych;
- zapewnić wysokiej jakości gazy osłonowe.
- W obszarze organizacyjnym procesu spawania należy:
 - usprawnić organizację pracy;
 - poprawić kontrole procesów produkcji oraz kontrole pracowników;
 - zapewnić środki finansowe na zakup nowych maszyn i urządzeń.

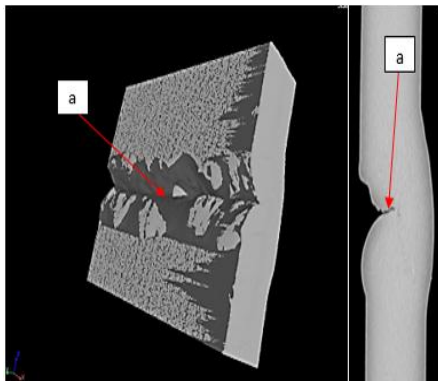
5. Przykładowe wady spawalnicze

Przemysłowa tomografia komputerowa jest nowoczesną metodą wykrywania wad spawalniczych i obecnie najszybciej rozwijającą się dziedziną badań nieniszczących. Głównymi elementami tomografu jest detektor i lampa rentgenowska. Układ ten pozwala obrazować w przestrzeni trójwymiarowej wiele warstw o różnej grubości [7]. Przedstawione tomogramy zawierają obraz wad spawalniczych w próbkach połączenia blach aluminiowych gat. AN 5754. Klasyfikacja wad i niezgodności spawalniczych oraz kryteria ich oceny zawarte są w normie PN-L-01426:1995 gdzie ustalono wytyczne do kontroli i odbioru złączy spawanych elementów konstrukcji lotniczych [13]. W normie PN-ISO 5817:2009 określono poziomy jakości spawów odnoszące się do jakości produkcji [14]. Ponadto w normie PN-ISO 10042:2008 niezgodności określone zostały w zależności od ich rzeczywistych wymiarów [15].

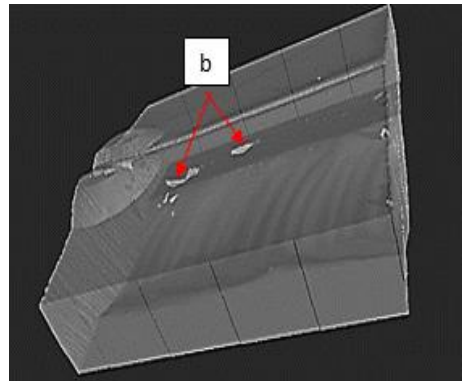
Na rys. 7-10 przedstawiono tomogramy uzyskano przy badaniu wpływu parametrów spawania na powstawanie niezgodności i wad spawalniczych. W wyniku badań potwierdzono istotny wpływ natężenia prądu spawania, wydatku gazu osłonowego rodzaju spoiwa, prędkości spawania na jakość spoin. Ustalono między innymi następujące zależności:

- niski udział wtrąceń niemetalicznych w przypadku dokładnego usunięcia tlenków na powierzchni łączonej;
- brak przetopu dla niewystarczającego natężenia prądu spawania;
- zwiększenie wycieków od strony grani wraz ze wzrostem natężenia prądu spawania;
- brak przetopu grani przy dużej prędkości spawania;
- mała porowatość spoiny porów przy wysokim wydatku gazu osłonowego.

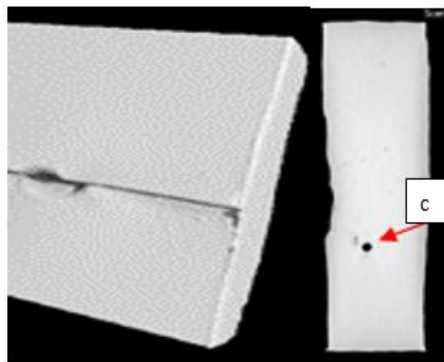
*Welds' quality of aluminium alloy components of military aircraft executed...
Jakość spawów elementów ze stopów al wojskowych statków powietrznych...*



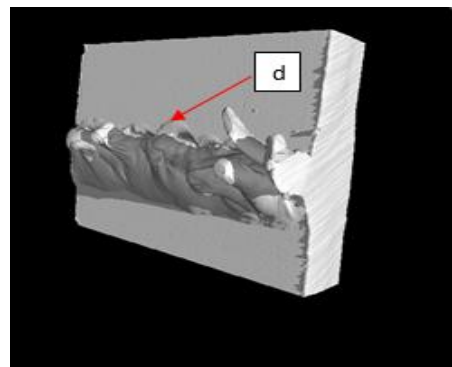
Rys.7 a-brak przetopu od strony grani [1]



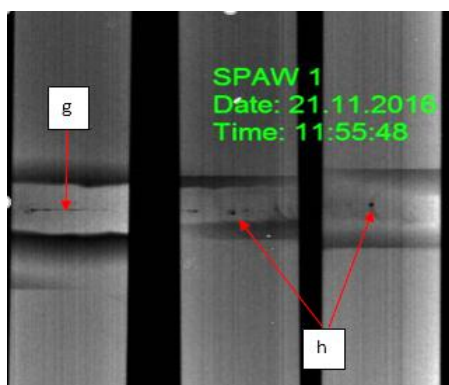
Rys.8 b-wtrącenia niemetaliczne [1]



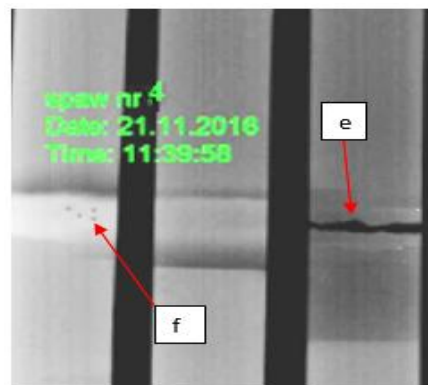
Rys.9 c- kulisty pęcherz gazowy [1]



Rys.10 d - nadmiar materiału spoiny od strony grani [1]



Rys.11 g-pęknięcie grani, h-pęcherze gazowe

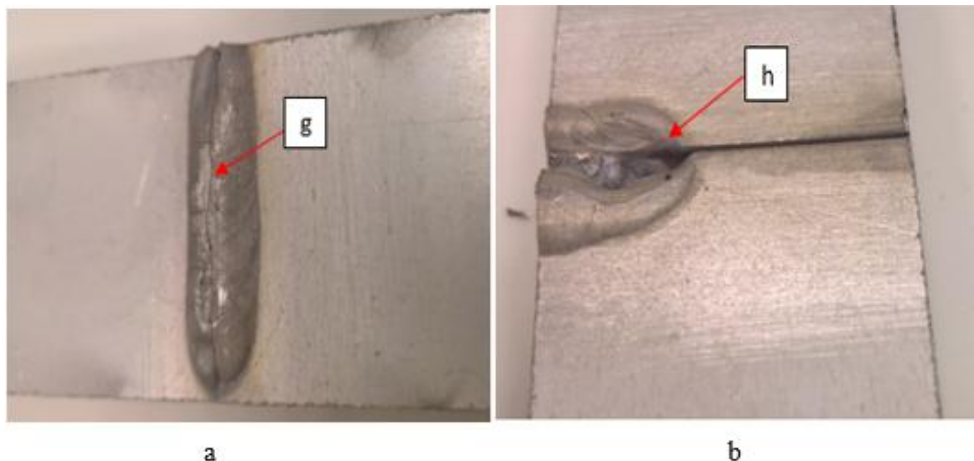


Rys.12 e-brak przetopu, f-pęcherze gazowe

Badania tomografem przemysłowym zostały potwierdzone metodą radiografii cyfrowej. Badania radiograficzne są uważane za podstawową metodę badań nieniszczących o największej wiarygodności wyników. Pozwalają wykrywać takie wady wewnętrzne jak: pęknięcia, porowatości, jamy skurczowe, pęcherze czy wtrącenia obcych materiałów[2]. Radiografia umożliwia uzyskiwanie obrazu prześwietlanego obiektu na kliszy radiograficznej lub w postaci cyfrowej (rys.11).

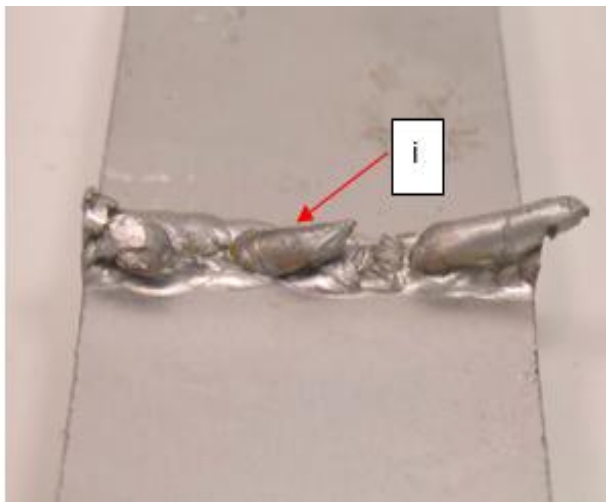
6. Podsumowanie-praktyczne problemy przy spawaniu aluminium

W czasie pracy spawalniczych szczególną uwagę należy zwrócić na czystość spawanych powierzchni. Dokładne usunięcie tlenku aluminium ze spajanych powierzchni ma na celu uniknięcie sytuacji, w której tlenek charakteryzujący się wysoką temperaturą topnienia i ciężarem większym od roztopionego materiału może w spoinie powodować wtrącenia. W miarę jak warstwa tlenku jest coraz grubsza jej powierzchnia staje się porowata i zaczyna wchłaniać wilgoć z otoczenia, zwłaszcza w wysokiej temperaturze i wilgotności[12]. Powoduje to wraz z nieodpowiednimi warunkami przechowywania spoiwa wprowadzenie do spoiny wodoru. Podczas krzepnięcia spoiny, wodór wydziela się w postaci bąbelków gazu, które stygnąc w metalu powodują porowatości. Wtrącenia, których przyczyną jest tlenek na powierzchniach połączenia oraz porowatość i pęcherze gazowe pochodzące od wodoru zmniejszają wytrzymałość spoiny i często są przyczyną jej dyskwalifikacji. Bardzo ważnym elementem jest czystość gazu osłonowego. W przypadku argonu i helu powinna ona wynosić ponad 99,5%. Wysokiej jakości gaz umożliwi prawidłowe utworzenie się łuku elektrycznego a ponadto zabezpieczy elektrodę i miejsce połączenia przed utlenianiem.



Rys.12a g- pęknięcie od strony grani w spoinie doczołowej spowodowane dużym naprężeniem cieplnym

Rys.12b h- ubytek materiału powstały w wyniku przegrzania



Rys.13 i - wypływy materiału od strony grani spowodowany zbyt dużym natężeniem prądu spawania

Zastosowanie Ar i He zmniejsza ryzyko powstania wadliwego spawu. Istotnym elementem technologii spawania jest dobór materiału spoiwa. Wiąże się to z ryzykiem powstawania pęknięć w przypadku, gdy zastosowane zostanie spoiwo zastyga szybciej od materiału spawanego (rys.12a). Zaleca się, więc stosować spoiwo z materiału krzepnącego wolniej od materiału połączenia[10]. Jakość spoiny w znacznym stopniu zależy od ustawionych parametrów urządzenia spawalniczego. Niewłaściwy ich dobór może spowodować, że za wysoka temperatura i długi czas jarzenia łuku elektrycznego zmieni właściwości i strukturę materiału spawanego. Często jest to obniżenie wytrzymałości połączenia w SWC (strefa wpływu ciepła). Dobór wartości natężenia prądu spawania zależy od grubości i rodzaju materiału spawanego, zastosowanej elektrody nietopliwej a także rodzaju gazu osłonowego. Za niskie natężenie może spowodować wadę połączenia w postaci braku przetopu. Z kolei za wysokie powodować będzie wady powstałe w wyniku przegrzania materiału takie jak ubytki w materiale (rys.12b), wypływ materiału od strony grani (rys.13) i podtopienia lica. Zbyt wysokie natężenie może powodować nadtopienie elektrody wolframowej a co za tym idzie wtrącenia metaliczne w spoinie.

Istotne dla procesu spawania jest natężenie przepływu gazu osłonowego, które standardowo mieści się w przedziale od 6-15 l/min. Niewłaściwie dobrana dysza gazowa powodować będzie mieszanie gazu osłonowego z powietrzem i zawirowania przepływającego gazu osłonowego. Zjawiska te obniżają skuteczność osłony gazów obojętnych a więc przyczyniają się do obniżenia jakości spawów. Z powyższego wynika, że uzyskanie połączenia charakteryzującego się

odpowiednimi parametrami wytrzymałościowymi wymaga szczególnego zachowania reżimu technologicznego i organizacyjnego na stanowisku naprawczym. Duża ilość czynników wpływających na jakość spoiny sprawia, że wykonywanie napraw elementów SP metodą spawania łukowego musi być poprzedzone procesem kwalifikowania technologii wykonawczej zgodnie z obowiązującymi normami.

7. Literatura:

- [1] Błachnio J., Kułaszka A., Chalimoniuk M., Giewoń J., Woźny P., Raport z badań, ITWL, Warszawa, 2016.
- [2] Czuchryj J., B. Kupisz B., Badania złączy spawanych. Przegląd metod, KaBe, Krosno, 2009
- [3] Ciszewski A., Radomski T., Szummer S., Materiałoznawstwo, OWPW, Warszawa, 2003
- [4] Dutka K., Stabryła J., Przyczyny pękania elementów spawanych zbiornika procesowego, Przegląd spawalnictwa 5/2011
- [5] Ferenc K., Ferenc J.: Konstrukcje spawane, Projektowanie. WNT, Warszawa 2000
- [6] Ferenc K.: Spawalnictwo. WNT, Warszawa 2007
- [7] Jeziński G.: Radiografia przemysłowa. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1993
- [8] Kocańda S., Zmęczeniowe pęknięcie metali. Wydawnictwo WNT, Warszawa 1985
- [9] Łunarski J.: Zarządzanie jakością w przemyśle lotniczym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012
- [10] Mizerski J., Spawanie, wiadomości podstawowe, REA, Warszawa, 2008
- [11] Mizerski J., Spawanie w osłonie gazów metodą TIG, REA, Warszawa, 2008
- [12] Pilarczyk J., Poradnik inżyniera. Spawalnictwo, WNT, Warszawa, 2003
- [13] PN-L-01426:1995 Lotnictwo i kosmonautyka - Spawanie konstrukcji lotniczych - Wytyczne kontroli i odbioru złączy spawanych ze stali, stopów żaroodpornych i żarowytrzymałych oraz stopów aluminium
- [14] PN-ISO 5817:2009 Spawanie - Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) - Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych
- [15] PN-ISO 10042:2008 Spawanie - Złącza spawane łukowo w aluminium i jego stopach. Poziomy jakości dla niezgodności spawalniczych
- [16] PN-EN ISO 15614-2:2008 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali - Badanie technologii spawania - Część 2: Spawanie łukowe aluminium i jego stopów.

*Welds' quality of aluminium alloy components of military aircraft executed...
Jakość spawów elementów ze stopów al wojskowych statków powietrznych...*

- [17] PN-EN ISO 3834-2 Wymagania jakości dotyczące spawania materiałów metalowych Część 2: Pełne wymagania jakości
- [18] PN-EN ISO 15609-1:2007 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali - Instrukcja technologiczna spawania Część 1: Spawanie łukowo.



Mgr Piotr Woźny jest specjalistą metrologiem w Wojskowych Zakładach Lotniczych nr 2 S.A. w Bydgoszczy. Obszarem jego zainteresowań są pomiarowe metody diagnostyczne stosowane w procesie napraw i obsługa SP oraz jakość pomiarów w procesach eksploatacyjnych. Jest doktorantem Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych.



Prof. dr hab. inż. Józef Błachnio jest pracownikiem naukowym Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Posiada uprawnienia MNiSW w dyscyplinach: lotnictwo i kosmonautyka, inżynieria materiałowa oraz budowa i eksploatacja maszyn.



Dr hab. inż. Krzysztof Dragan ukończył studia magisterskie w 2001 na kierunku fizyka techniczna w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie oraz obronił pracę doktorską w 2008 roku w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Obecnie jest kierownikiem Zakładu Zdatności do Lotu w tym samym Instytucie. Jego zainteresowania badawcze obejmują nieniszczące badania struktur kompozytowych, monitorowanie stanu technicznego statków lotniczych, oraz metody zaawansowanej analizy sygnału i przetwarzania obrazu.