

Możliwości łączenia aluminium z miedzią lutami miękkimi na osnowie Sn-Zn

Possibilities of aluminum to copper joining with solders based on Sn-Zn

Streszczenie

Aktualne trendy w technikach spajania koncentrują się na łączeniu materiałów o różnych właściwościach, przy możliwie najmniejszym obciążeniu temperaturowym materiałów rodzimych. W artykule przedstawiono problemy występujące podczas lutowania aluminium z miedzią. Analizowano przydatność dostępnych na rynku topników do lutowania miękkiego tej pary materiałów, jako spoiwo stosując niskotopliwy lut S-Sn91Zn9. Opracowano i testowano również topnik wg autorskiej receptury. Wykonano pomiary rozpląwności, zwilżalności, mikrotwardości, makro- i mikroskopowe oraz próby wytrzymałości na ścinanie połączeń lutowanych. Na podstawie wyników badań zaproponowano dalsze kierunki prac związanych z lutowaniem aluminium z miedzią spoiwami na bazie Sn-Zn.

Abstract

Current trends in bonding techniques focus on joining dissimilar materials at the lowest possible temperature load of native materials. Problems encountered during soldering aluminum to copper are presented in this paper. Usefulness of commercially available fluxes for soldering this pair of materials using low melting solder S-Sn91Zn9 was analyzed. Flux prepared according to the authors formula was developed and tested as well. Measurements of spreadability, wettability, micro-hardness, and also macro- and microscopic and shear strength testing of solder joints were made. Basing on the research results the future directions of work for soldering aluminum with copper with Sn-Zn based solders were proposed.

Problematyka lutowania aluminium z miedzią

Aluminium należy do grupy materiałów stwarzających duże trudności podczas spajania. Trudności te wynikają przede wszystkim ze specyficznych właściwości fizykochemicznych tego metalu, szczególnie w porównaniu z miedzią, z którą jest często łączone (tabl. I) [1÷6].

Najwięcej problemów podczas spajania aluminium powoduje jego stosunkowo niska temperatura topnienia (ok. 660°C), duże powinowactwo do tlenu, którego

skutkiem jest tworzenie się trudnotopliwej (2037°C) warstewki tlenków Al_2O_3 szczelnie pokrywających jego powierzchnię, duża przewodność cieplna oraz małe właściwości wytrzymałościowe, zwłaszcza w podwyższonej temperaturze [6, 7]. Obecność na powierzchni metalu tlenków Al_2O_3 , których temperatura topnienia jest trzykrotnie większa od temperatury topnienia czystego metalu, stanowi największą trudność podczas jego spajania, niezależnie od zastosowanej technologii (rys. 1). Gęstość tlenków Al ($3,9 \text{ kg/dm}^3$) jest również większa od gęstości czystego Al, co jest także niekorzystne zwłaszcza podczas jego spawania.

Znacznie więcej problemów stwarza jednak obecność tlenków podczas lutowania aluminium, zarówno miękkiego, jak i twardego. Powierzchniowa warstwa tlenków skutecznie ogranicza rozpląwanie się lutu, uniemożliwiając otrzymanie poprawnie wykonanego złącza. Mechaniczne i chemiczne usuwanie tlenków

Dr inż. Tomasz Piwowarczyk, prof. dr hab. inż. Zbigniew Mirski, dr hab. inż. Kazimierz Granat, prof. PWr, mgr inż. Tomasz Wojdat, inż. Miroslaw Zimon – Politechnika Wroclawska; dr inż. Dawid Majewski – Instytut Spawalnictwa, Gliwice

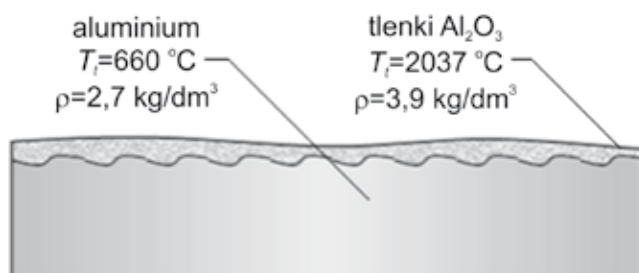
Tablica I. Właściwości fizykochemiczne i mechaniczne aluminium i miedzi [1÷6]
Table I. Physicochemical and mechanical properties of aluminum and copper [1÷6]

Właściwości fizykochemiczne i mechaniczne	Aluminium	Miedź
Gęstość ρ , kg/dm ³	2,7	8,9
Temperatura topnienia T_t , °C	660	1083
Temperatura wrzenia T_w , °C	2519	2595
Temperatura topnienia tlenków, °C	2037 (Al ₂ O ₃)	1064 (Cu ₂ O) 1336 (CuO)
Współczynnik rozszerzalności liniowej α , 1/K	23,6·10 ⁻⁶	16,7·10 ⁻⁶
Przewodność cieplna właściwa λ , W/m·K	237	397÷411
Przewodność elektryczna, MS/m	35,5	57
Skurcz odlewniczy, %	1,75	1,5÷2,5
Moduł sprężystości wzdłużnej, GPa	66,6	124
Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa	40	60
Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	60÷100	200÷250 ¹⁾
Wydłużenie względne A_{10} , %	30÷50	60 ²⁾
Przewężenie względne Z , %	27	46
Twardość, HBW	15÷20	45÷50 ³⁾
<i>Uwagi: 1) 2) 3) W wyniku przeróbki plastycznej na zimno wytrzymałość miedzi zwiększa się do 400 ÷ 450 MPa, a twardość do 120 HBW, przy zmniejszeniu wydłużenia do 1 ÷ 2 %</i>		

nie daje tu należytych wyników ze względu na natychmiastowe ponowne utlenianie się aluminium. Dlatego też lutowanie aluminium i jego stopów należy wykonywać pod osłoną odpowiednio aktywnego topnika, niezależnie od wstępnego przygotowania (oczyszczenia) ich powierzchni [7].

Lutowanie twarde umożliwia uzyskanie złączy o większej wytrzymałości mechanicznej niż lutowanie miękkie, co wynika z dyfuzyjnego charakteru złącza oraz większej wytrzymałości stosowanych lutów. Jednak wysoka temperatura lutowania stwarza niebezpieczeństwo roztopienia aluminium i jego erozji. Stąd coraz większego znaczenia nabiera lutowanie miękkie.

Luty miękkie, ze względu na niższą temperaturę topnienia (niższa temperatura procesu), umożliwiają



Rys. 1. Schemat budowy warstwy wierzchniej aluminium [8]
Fig. 1. Scheme of the surface layer structure of aluminum [8]

również uzyskanie większej estetyki złączy [9]. Możliwość uzyskania złączy o wymaganej wytrzymałości spowodowała, że lutowanie miękkie jest obecnie najczęściej stosowaną technologią spajania aluminium i jego stopów w takich dziedzinach przemysłu, jak: elektronika, elektrotechnika, radiotechnika oraz w przemyśle grzewczym, chłodniczym i klimatyzacyjnym. Coraz częściej stosuje się je również do lutowania akcesoriów aluminiowych ram rowerowych, takich jak przelotki mocujące linki, wsporniki i uchwyty [9].

Duże trudności, a w niektórych przypadkach nawet brak możliwości spawania lub zgrzewania miedzi i jej stopów sprawiają, że lutowanie stanowi podstawową, a niekiedy jedyną skuteczną metodę ich spajania [6]. Miedź jest jednym z najłatwiej lutowalnych metali, ze względu na to, że jej powierzchnia pokrywa się cienką i niezbyt trwałą chemicznie warstwą tlenków CuO lub Cu₂O. Podobnie jak w przypadku spawania, niedogodnością podczas lutowania miedzi jest jej bardzo duża przewodność cieplna (ok. 7÷11 krotnie większa od stali niestopowej), co wymaga stosowania źródeł ciepła o odpowiednio większej mocy cieplnej, zwłaszcza do lutowania elementów o dużej masie. Podczas projektowania złącza należy również uwzględnić dużą rozszerzalność cieplną miedzi i skurcz, co jest szczególnie ważne w przypadku złączy różnoimiennych, np. Al-Cu [6, 10÷14].

Do lutowania miękkiego miedzi – w zależności od wymaganych właściwości połączeń, metody lutowania,

a także ze względów ekonomicznych można stosować niemal wszystkie gatunki lutów miękkich. Do wykonywania połączeń jednoimiennych, miedź lutuje się z użyciem topników żywicznych na osnowie kalfoniowej, szczególnie w elektronice, lub topników bardziej aktywnych na bazie chlorków cynku i amonu. Do wykonywania połączeń różnoimiennych należy stosować topniki organiczne lub nieorganiczne, w zależności od wymaganej aktywności, dostosowanej zwykle do materiału łączzonego z miedzią [6].

Przygotowanie do badań

Do badań wybrano aluminium EN AW-1050A wg PN-EN 573-3:2010 *Aluminium i stopy aluminium. Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie. Część 3: Skład chemiczny i rodzaje wyrobów*, o minimalnej zawartości Al 99,5% oraz miedź ECu58-CuETP (wg PN – M1E) zawierającą 99,9% Cu. Arkusze blach pocięto na odpowiednie wymiary, właściwe do badań. Jako spoiwo wybrano bezołowiowy lut S-Sn91Zn9 (nr stopu 801 wg PN-EN ISO 9453:2008 *Luty miękkie. Składy chemiczne i postacie*). Jest to stop eutektyczny o temperaturze topnienia 199°C i składzie chemicznym podanym w tablicy II. W próbach przygotowawczych testowano również inne gatunki spoiw cynowo-cynkowych (S-Sn80Zn20, S-Sn70Zn30), jednak z uwagi na ich gorsze właściwości i wyższe temperatury topnienia w końcowych badaniach zdecydowano się na stosowanie jedynie lutu eutektycznego. Celem badań był dobór odpowiedniego topnika, który pozwoliłby na uzyskanie właściwego połączenia aluminium-miedź, z wykorzystaniem wybranego lutu.

Pomiary rozpląwności

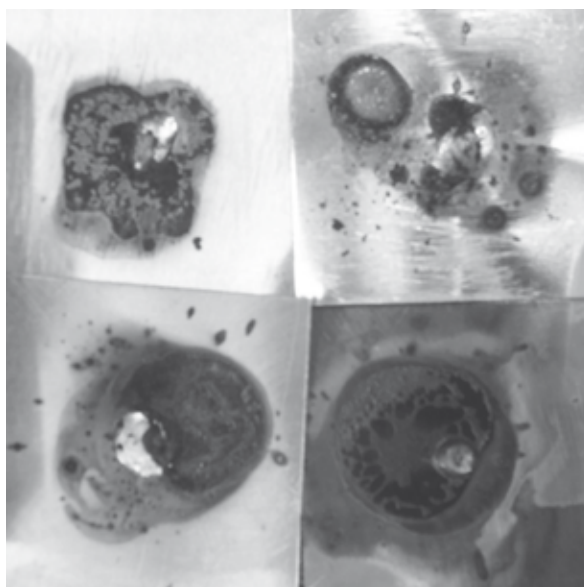
Wstępnie wytypowano 16 topników, pochodzących od różnych producentów. Selekcji dokonano na podstawie próby rozpląwności, na blaszkach aluminiowych i miedzianych o grubości 0,5 mm i wymiarach 50x50 mm. Do prób rozpląwności stosowano luty o masie 0,5 g, pocięte na odcinki o długości ok. 1 mm. Próbkę lutu pokryto topnikiem o masie równej połowie masy lutu. Bezpośrednio przed próbami podłoże aluminiowe i miedziane oczyszczono papierem ściernym 400 i odtłuszczono rozpuszczalnikiem Nitro. Próby wykonano przez nagrzewanie płomieniowe palnikiem propan-

powietrze. Czas nagrzewania od początku płynięcia lutu wynosił 5 s.

Wstępne badania rozpląwności pozwoliły na wyeliminowanie większości topników, gdyż w próbach z ich wykorzystaniem zanotowano brak poprawnego zwilżania zarówno powierzchni aluminiowej, jak i miedzianej. Dodatkowo w większości przypadków obserwowano palenie się topnika, za co odpowiedzialna jest metoda grzania (płomień od góry), a nawet jego zwęglenie przed osiągnięciem temperatury topnienia lutu (rys. 2). W efekcie do dalszych badań wytypowano jedynie dwa topniki, dla których wyniki badań wstępnych były najkorzystniejsze: Eurotop Al 380 (Euromat) i DM2013 (Instytut Spawalnictwa, Gliwice). Topnik w postaci pasty Eurotop Al 380 jest niekorozyjnym produktem na bazie związków cezu przewidzianym do lutowania miękkiego, ale w jego górnym zakresie temperaturowym. Topnik DM2013 na bazie trójetanoloaminy został specjalnie przygotowany do wykonywania połączeń różnoimiennych aluminium-miedź w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach.

Właściwe pomiary rozpląwności wykonano, układając wcześniej przygotowane blaszki aluminiowe i miedziane o wymiarach 50x50 mm na ceramicznej siatce wypoziomowanego trójnoga. Zastosowano nagrzewanie płomieniowe od dołu palnikiem Bunsena na gaz propan-butan z regulacją doprowadzanego powietrza. Czas nagrzewania od momentu początku płynięcia lutu również wynosił 5 s.

Dla topnika DM2013 przygotowanego w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach największa zanotowana

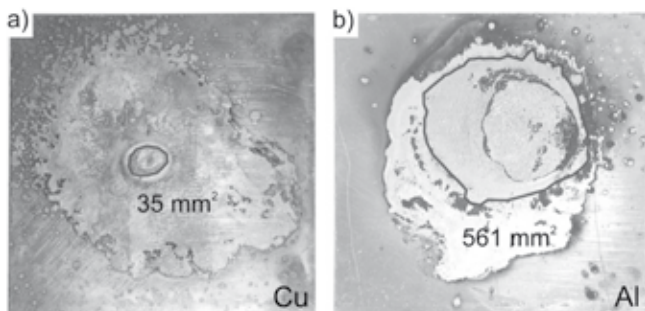


Rys. 2. Zwęglenie topnika AlumWeld podczas prób rozpląwności
Fig. 2. AlumWeld flux carbonization during spreadability tests

Tablica II. Skład chemiczny lutu S-Sn91Zn9 wg PN-EN ISO 9453:2008; % wag.

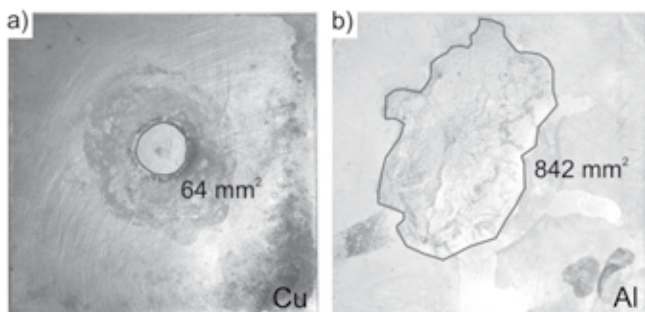
Table II. The chemical composition of S-Sn91Zn9 solder acc. PN-EN ISO 9453:2008; % mas.

Fe	Ni	Al	Cu	As	Pb	Zn	Ag	Sb	Bi	Cd	Au	In	Sn
max 0,02	max 0,01	max 0,001	max 0,05	max 0,03	max 0,1	8,5 ±9,5	max 0,1	max 0,1	max 0,1	max 0,002	max 0,05	max 0,1	reszta



Rys. 3. Rozpływność lutu S-Sn91Zn9 z topnikiem DM2013 na miedzi (a) i aluminium (b)

Fig. 3. Spreadability of S-Sn91Zn9 solder with DM2013 flux on copper (a) and aluminium (b) surface



Rys. 4. Rozpływność lutu S-Sn91Zn9 z topnikiem Eurotop Al 380 na miedzi (a) i aluminium (b)

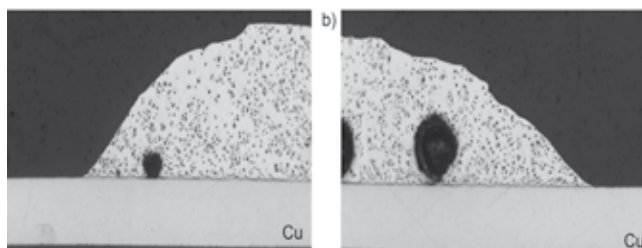
Fig. 4. Spreadability of S-Sn91Zn9 solder with Eurotop Al 380 flux on copper (a) and aluminium (b) surface

rozpływność na blaszkach miedzianych wynosiła 35 mm², natomiast dla aluminium 561 mm² (rys. 3). Znaczne dysproporcje między otrzymanymi polami rozpływności wynikają z faktu, iż w przypadku lutowania materiałów różnometalicznych topniki sporządza się zwykle dla aluminium sprawiającego większe problemy. Miedź jako materiał dobrze lutowalny nie jest traktowana priorytetowo podczas opracowywania receptur topników. Analogiczna sytuacja występowała w przypadku topnika Eurotop Al 380, dla którego największe pola rozpływności wynosiły: 64 mm² na miedzi i 842 mm² na aluminium (rys. 4).

Badania makroskopowe

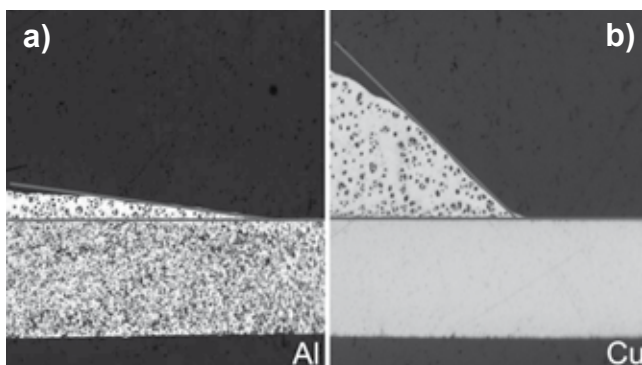
Obserwacje makroskopowe wykazały obecność strefy reakcyjnej o szerokości dochodzącej do ok. 4÷30 μm na granicy lutownicy z podłożem miedzianym. Zaobserwowano również znacznej objętości pęcherze w lutownicy (rys. 5a, 5b).

Przygotowane zglądy metalograficzne posłużyły także do graficznych pomiarów kątów zwilżania. Potwierdziły one wcześniej wykonywane próby rozpływności. Niezależnie od zastosowanego topnika, zdecydowanie lepszą zwilżalność osiągnięto dla powierzchni aluminium, w porównaniu z miedzią (rys. 6). W tabelicy III zestawiono średnie wartości kąta zwilżania dla różnych powierzchni oraz topników.



Rys. 5. Niezgodności w lutowni spoiwem S-Sn91Zn9, topnik DM2013

Fig. 5. Defects in solder with S-Sn91Zn9, flux DM2013



Rys. 6. Kąty zwilżania ciekłym lutem S-Sn91Zn9 powierzchni aluminium (a) i miedzi (b), lut S-Sn91Zn9, topnik DM2013

Fig. 6. Contact angles of liquid solder S-Sn91Zn9 on aluminium surface (a) and copper (b), flux DM2013

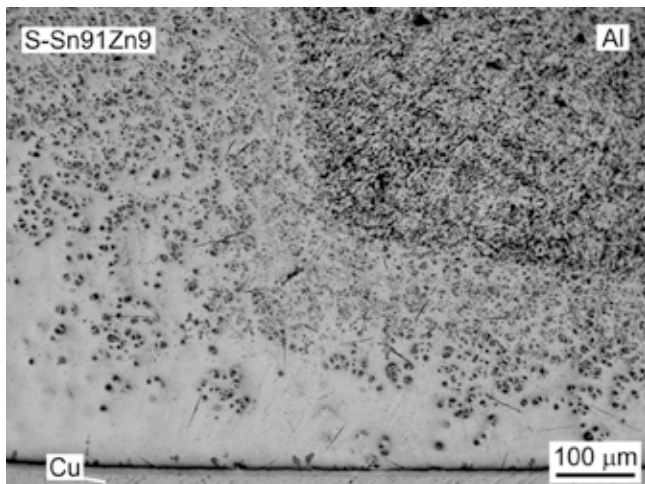
Tablica III. Średnie wartości kątów zwilżania dla różnych powierzchni oraz topników

Table III. Average values of contact angles for different surfaces and fluxes

Topnik	Aluminium	Miedź
DM2013	8°	45°
Eurotop Al 380	8°	20°

Badania mikroskopowe

Próbki do badań metalograficznych inkludowano w żywicy epoksydowej. Po utwardzeniu próbki szlifowano kolejno na tarczach diamentowych o oznaczeniach od 80 do 4000 (ilość ziaren ściernych na cm²). Końcowy etap przygotowania zglądów polegał na polerowaniu próbek przy użyciu wodnej zawiesiny tlenku glinu. Obserwacje próbek przeprowadzono w stanie nietrawionym przy użyciu mikroskopu świetlnego CK40M firmy Olympus, sprzężonego z aparatem cyfrowym Olympus Camedia C 3030 i systemem archiwizacji obrazu. Na rysunku 7 pokazano mikrostrukturę połączenia lutowanego aluminium z miedzią, wykonanego lutem S-Sn91Zn9 pod osłoną topnika DM2013



Rys. 7. Mikrostruktura połączenia lutowanego Al-Cu wykonanego lutem S-Sn91Zn9, topnik DM2013, w stanie nietrawionym

Fig. 7. Microstructure of solder joint Al-Cu performed with S-Sn91Zn9 solder, flux DM2013, unetched

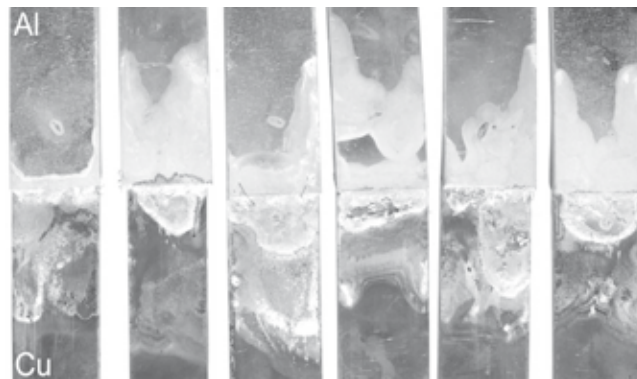
na bazie trójetanoloaminy. Widoczne jest roztrwanie aluminium przez agresywne oddziaływanie lutu, na granicy lutownicy z miedzią tworzy się strefa reakcyjna o szerokości 4 μm, a w niektórych miejscach nawet do 30 μm.

Statyczna próba ścinania połączeń lutowanych

Statyczną próbę wytrzymałości na ścinanie połączeń lutowanych Al-Cu przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej firmy INSTRON model 3369 w zakresie obciążeń do 50 kN. W celu zapewnienia osiowości obciążenia, eliminującego zginanie złącza, zastosowano elementy korygujące zamocowanie próbek w uchwycie.

Do statycznej próby ścinania różnoimiennych złączy lutowanych przygotowano próbki z blach aluminiowych o grubości 3 mm i miedzianych o grubości 2 mm. Lutowano elementy o wymiarach: długość 90 mm i szerokość 30 mm (rys. 8). Złącza wykonano przez nagrzewanie płomieniem propanowo-powietrznym przy użyciu lutu S-Sn91Zn9 i dwóch wybranych topników. Szerokość zakładki, którą wyznaczono na podstawie warunku wytrzymałościowego, wynosiła 3 mm.

Powierzchnie łączone wstępnie oczyszczano mechanicznie papierem ściernym wzdłuż blachy zgodnie z kierunkiem płynięcia lutu, następnie usunięto zanieczyszczenia przez płukanie w acetonie. Pomędzy ułożonymi blachami nakładano odważoną warstwę topnika, a przy ich krawędziach umieszczono druciki dystansowe o grubości 0,2 mm odpowiadającej optymalnej szczelinie kapilarnej. Blachy układano na wy poziomowanym stole i zabezpieczano dociskiem. Każdorazowo blacha miedziana znajdowała się na dole,



Rys. 8. Połączenia zakładkowe Al-Cu bezpośrednio po lutowaniu, lut S-Sn91Zn9, topnik Al 380

Fig. 8. Overlap joints of Al-Cu immediately after soldering, S-Sn91Zn9 solder, flux Al 380

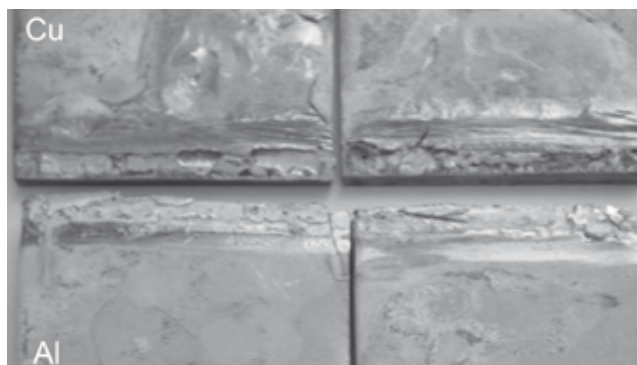
zaś blacha aluminiowa na górze zakładki. Wynika to z większej pojemności cieplnej miedzi. Przygotowane próbki lutowano płomieniem propanowo-powietrznym. Ogrzewano blachy ruchami kolistymi, omijając bezpośrednio ogrzewanie płomieniem okolic topnika, w odpowiednim momencie lut podawano ręcznie. Po procesie blachy pozostawiono do ostygnięcia. Nadlew lutu z połączenia usunięto mechanicznie.

Podczas wykonywania połączeń pod osłoną topnika DM2013 stwierdzono problemy z kapilarnością lutu. Okazało się jednak, że topnik ten wykazuje tzw. krótkie okno technologiczne i gdy lut jest aktywny, dosyć szybko następuje zwęglenie topnika. Z tego względu

Tablica IV. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie dla złączy wykonanych z zastosowaniem topnika Eurotop Al 380

Table IV. Shear strength tests results for joints obtained using Eurotop Al 380 flux

Nr próbki	Siła ścinająca F , kN	Powierzchnia A , mm ²	Wytrzymałość na ścinanie R_p , MPa
1	3,16	91	35
2	3,23	91	35
3	5,58	108	52
4	4,87	90	53
5	3,65	81	45



Rys. 9. Przełom próbek po statycznej próbie ścinania

Fig. 9. Sample fracture after static shear test

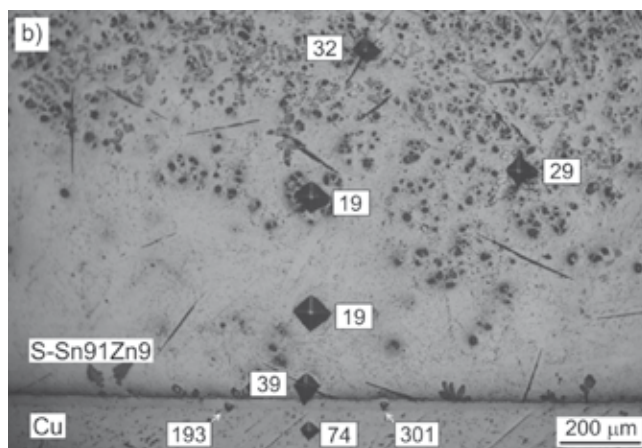
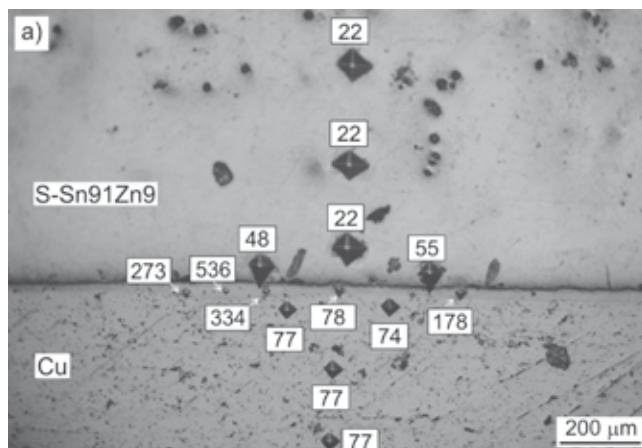
topnik ten wyeliminowano z dalszych prób lutowania.

Wyniki statycznej próby ścinania złączy wykonanych pod osłoną topnika Eurotop Al 380 zamieszczono w tablicy IV. Średnią wytrzymałość osiągnięto na poziomie 44 MPa, przy znacznym rozrzucie wyników (35÷54 MPa, tj. ponad 20%). Wynika to z obecności kruchych faz na granicy strefy reakcyjnej. Na rysunku 9 pokazano charakterystyczne rodzaje złomów po próbie ścinania. W większości był on mieszany z przewagą złomu kohezyjnego.

Pomiary mikrotwardości połączeń lutowanych

Pomiary mikrotwardości przeprowadzono metodą Vickersa przy użyciu mikrotwardościomierza PMT3, przy obciążeniu ostrośłupa diamentowego równym 25 G, zgodnie z zaleceniami PN EN ISO 6507-1:2007 *Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badań*.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że mikrotwardość lutownicy S-Sn91Zn9 wynosi ok. 22 HV_{0,025}, materiału rodzimego – miedzi ok. 77 HV_{0,025} i aluminium ok. 32 HV_{0,025}. Jak wcześniej wspomniano, na granicy połączenia lutownicy z miedzią powstaje strefa reakcyjna, której mikrotwardość miejscowo przekracza wartość 500 HV_{0,025} (rys. 10). Ze względu na znaczny gradient twardości występuje tu tendencja do powstawania pęknięć cieplnych.



Rys. 10. Rozkład mikrotwardości HV_{0,025} połączenia miedzi z lutownicą S-91Sn9Zn z zastosowaniem topnika Eurotop Al 380 (a, b)
Fig. 10. Microhardness HV_{0,025} distribution of copper-solder S-91Sn9Zn joint using flux Eurotop Al 380 (a, b)

Podsumowanie

Na podstawie analizy literatury i badań własnych sformułowano następujące wnioski:

- Dostępne na rynku topniki do lutowania miękkiego w większości nie zwilżają zadowalająco powierzchni aluminium i miedzi. Jedynie dwa spośród 16 wytypowanych do badań topników dobrze zwilżyły powierzchnię aluminium, natomiast słabo miedź, mimo że ta uchodzi za materiał dobrze lutowalny. Potwierdziły to także próby rozpląwności, dla których wyniki różnią się ponad 10-krotnie na korzyść podłoża aluminiowego.
- W badaniach makroskopowych wykazano występowanie licznych niezgodności w połączeniach lutowanych, takich jak pory, skupiska pęcherzy gazowych. Badania mikroskopowe wykazały roztrawianie aluminium w wyniku oddziaływania agresywnego lutu S-Sn91Sn9 i utworzenie strefy reakcyjnej na granicy połączenia z miedzią o szerokości 4÷30 μm.

- Pomiary mikrotwardości potwierdziły występowanie twardych i kruchych faz w strefie reakcyjnej, na granicy lutownicy z miedzią. Mikrotwardość przekraczała w tym miejscu wartość 500 HV_{0,025} przy średniej twardości lutownicy 22 HV_{0,025} i miedzi ok. 75 HV_{0,025}.
- Wyniki statycznej próby ścinania wykonane dla złączy uzyskanych pod osłoną topnika Eurotop Al 380 charakteryzowały się dużą rozbieżnością, przy średniej wartości równej 44 MPa. Charakter złomu był mieszany, z przewagą kohezyjnego.
- Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują na konieczność poszukiwania nowych receptur topników do lutowania miękkiego aluminium z miedzią przy stosowaniu niskotopliwego lutu S-Sn91Zn. Topnik Eurotop Al 380 stosowany w pracy z uwagi na wysoki zakres temperaturowy jego aktywności, prowadzi do wydłużenia czasu lutowania i przegrzania złączy lutowanych.

Literatura

- [1] Ashby M. F., Jones D. R. H.: Materiały inżynierskie I, WNT, Warszawa 1997.
- [2] Lange A.: Badania spoiw do lutowania twardego różnoimien-nych połączeń aluminium - miedź, Rozprawa doktorska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [3] Schoer H.: Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen, DVS – Verlag, Düsseldorf 1998.
- [4] Mirski Z., Granat K., Drzeniek H., Piwowarczyk T., Wojdat T.: Lutowanie miękkie aluminium z miedzią, Przegląd Spawalnictwa, nr 11/2009, s. 15 – 19.
- [5] Mirski Z., Granat K., Drzeniek H., Piwowarczyk T., Wojdat T.: Badanie zwilżalności lutów cynkowych na powierzchni aluminium i innych metali, Przegląd Spawalnictwa, nr 9/2010, s. 48-53.
- [6] Pod red. Pilarczyka J.: Poradnik inżyniera. Spawalnictwo, Tom 1 i 2, WNT, Warszawa 2003 i 2005.
- [7] Radomski T., Ciszewski A.: Lutowanie, WNT, Warszawa 1985.
- [8] Mirski Z., Drzeniek H., Wojdat T.: Analiza i ocena topników do lutowania aluminium i jego stopów, Spajanie, nr 1/2012, s. 39-42.
- [9] Różański M.: Wpływ dodatku tytanu w spoiwach cynkowych na zwilżalność powierzchni i własności mechaniczne połączeń lutowanych aluminium w gat. EN AW – 1050, Przegląd Spawalnictwa, nr 2/2013, s. 19 – 23.
- [10] Cooper K.P., Jones H.N.: Microstructural evolution in rapidly solidified Al-Cu-Si ternary alloys, Journal of Material Science, Vol. 36/2001, s. 5315-5326.
- [11] Ambroziak A., Derlukiewicz W., Białucki P.: Lutowanie akcesoriów do aluminiowych ram rowerowych, Przegląd Spawalnictwa, nr 10/2010, s. 12 – 15.
- [12] Mirski Z., Granat K., Bulica A.: Problemy występujące przy spajaniu miedzi ze stałą kwasoodporną, Wyd. OBR Gospodarki Remontowej Energetyki, Wrocław 2005, s. 211-222.
- [13] Mirski Z., Granat K., Winiowski A., Bulica A.: Porównanie metod spajania miedzi ze stałą austenityczną, Inżynieria Materiałowa, nr 3/2006, s. 205-208.
- [14] Prasalek A.: Lutowanie beztopnikowe miedzi ze stałą X6Cr-NiTi18-10 spoiwem CP 102 (L-Ag15P), Rozprawa doktorska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.

Podziękowania

Autorzy dziękują firmie MBO-Hutmen we Wrocławiu oraz P. Prezesowi mgr inż. Andrzejowi Marciniakowi i Pani mgr inż. Edycie Żelasko za udostępnienie lutów i topników do badań.

4METAL.PL

Ponad 2000 podwykonawców z całego świata

[katalog firm] PONAD 2000 FIRM Z CAŁEGO ŚWIATA
PODZIELONYCH NA KATEGORIE

[giełda pracy] OGŁOSZENIA PRACOWNIKÓW
I PRACODAWCÓW Z BRANŻY

NEW

[giełda materiałów] OGŁOSZENIA KUPNA I SPRZEDAŻY, SZCZEGÓŁOWO
PODZIELONE NA GATUNKI I KształTY MATERIAŁÓW

[giełda maszyn] PONAD 2300 AKTUALNYCH OGŁOSZEŃ
KUPNA I SPRZEDAŻY

[wydarzenia] LISTA TARGÓW I IMPREZ BRANŻOWYCH
ZE ŚWIATA

[aktualności] TECHNOLOGIE, WYWIADY, SPRAWOZDANIA,
WSZYSTKO CZEGO POTRZEBUJESZ

[media] INFORMACJE O CZASOPISMACH
BRANŻOWYCH Z CAŁEGO ŚWIATA

[video] RELAGJE, WYWIADY,
PREZENTACJE

 www.4metal.pl

 www.4metal.de

 www.4metal.cz

 www.4metal.com

 www.4metal.nl

 www.4metal.at

 www.4metal.be

 www.4metal.ru

 www.4metal.ch

 www.4metal.li

 www.4metal.ro

 www.4metal.hu

 www.4metal.us



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011

GET THE MEMBERSHIP