

Zastosowanie warstw pośrednich nanoszonych różnymi metodami natryskiwania cieplnego do lutowania miękkiego aluminium z miedzią

Streszczenie. Przedstawiony niżej tekst opisuje możliwości zastosowania warstw nanoszonych metodami natryskiwania cieplnego, jako warstw pośrednich do lutowania. Wskazano na problemy występujące podczas lutowania miękkiego aluminium z miedzią oraz możliwości ich rozwiązania. Przedstawiono wyniki prób zwilżalności i rozplýwności spoiwa cynkowego z dodatkiem 4 % wag. Al na wcześniej naniesionych powłokach Al, Zn, Ni95Al5 oraz Ni85Al15 metodami natryskiwania LPCS (z ang. Low Pressure Cold Spraying), płomieniowego i łukowego. Następnie dokonano oceny lutowalności wykonanych warstw pośrednich oraz zaprezentowano wyniki badań metalograficznych różnoimennych złączy zakładkowych typu Al – Cu z naniesioną metodą LPCS na powierzchnię miedzi aluminiową warstwą pośrednią.

Abstract. The manuscript presents a possibility for application of coatings deposited by thermal spraying methods and working as interlayers in soldering process. Crucial problems occurring in aluminium-copper soldering process with potential solving are presented. Results of wettability and propagation of filler zinc with 4% wt. Al addition on sprayed Al, Zn, Ni95Al5 and Ni85Al15 coatings by Low Pressure Cold Spraying, flame and arc spraying methods and working as interlayers are shown. Finally an assessment of solder-ability of interlayers was conducted and metallographic analysis of dissimilar Al-Cu lap joints with deposited by LPCS method aluminium coating onto copper substrate is presented. A possibility for application of coatings deposited by thermal spraying methods and working as interlayers in soldering process

Słowa kluczowe: natryskiwanie cieplne, warstwy pośrednie, lutowalność, połączenia różnoimienne.
Keywords: thermal spraying, interlayers, solder-ability, dissimilar joints.

Wstęp

Rozwój techniki często wymusza na producentach stosowanie do budowy urządzeń materiałów różniących się właściwościami fizycznymi i mechanicznymi. Wywołuje to problemy podczas spajania tych materiałów. Do takiej grupy połączeń należą połączenia aluminium z miedzią, które są obecnie coraz częściej stosowane w różnych gałęziach przemysłu [1-3].

Obecnie, z uwagi na niewysoką temperaturę procesu, coraz częściej stosowaną technologią spajania jest lutowanie miękkie, do którego używa się spoiw cynkowych z dodatkiem aluminium, zwykle nieprzekraczającym 15 % wag. [1,3]. Taki dobór spoiw do lutowania podyktowany jest tym, że aluminium jest materiałem znacznie trudniej lutowalnym od miedzi, co wynika z obecności trudnotopliwej warstwy tlenków Al_2O_3 szczelnie pokrywającej jego powierzchnię. Jak podano w pracach [4,6,7] wykonywanie połączeń lutowanych typu Al-Cu, przy użyciu tych spoiw jest jednak znacznie utrudnione. Trudności te wynikają ze złej lutowalności oraz tworzącej się na granicy połączenia miedzi z lutownią strefy reakcyjnej o dużej twardości, ponad 500 HV 0,025 [4,6,7], którą mogą tworzyć fazy międzymetaliczne z układu Zn-Cu. Ma ona wpływ na obniżenie właściwości mechanicznych połączeń lutowanych Al-Cu, których wytrzymałość nie przekracza 28 MPa [4,6].

Sposobem, który pozwala na rozwiązanie tych problemów jest zastosowanie w procesie lutowania warstwy pośredniej, naniesionej na powierzchnię miedzi, która oprócz poprawy jej lutowalności spoiwami cynkowymi, skutecznie będzie ograniczać tworzenie się stref reakcyjnych. Do metod nanoszenia warstw zaliczyć można metody natrysku cieplnego, wśród których znajduje się natryskiwanie płomieniowe, łukowe, oraz natryskiwanie na zimno. Metody te umożliwiają budowanie warstw o grubości dochodzącej do kilkuset mikrometrów. Natryskiwanie płomieniowe, jak i łukowe, wymagają przetopu materiału natryskiwanego. Metoda niskociśnieniowego natryskiwania na zimno (z ang. Low Pressure Cold Spraying – LPCS) natomiast pozwala budować powłoki z proszku pozostającego w stanie stałym, ponieważ podczas procesu natryskiwania temperatura proszku jest znacznie niższa od

temperatury topnienia zastosowanego metalu. W metodzie LPCS sprężony gaz roboczy (powietrze lub azot) jest podgrzewany do temperatury w przedziale 200-650 °C oraz przyspieszany do prędkości naddźwiękowych podczas przepływu przez zbieżno-rozbieżną dyszę de Laval. Cząstki proszku o granulacji <50 μm wprowadzane są w części rozbieżnej dyszy, gdzie zyskują prędkość od przepływającego gazu w wyniku działania siły oporu. W wyniku wysokiej energii kinetycznej, cząstki odkształcają się plastycznie w momencie kontaktu z podłożem i dochodzi do połączenia mechanicznego oraz metalurgicznego. Zaletą metody LPCS, oprócz dużej wydajności, jest stosunkowo niska temperatura natryskiwania warstw. Dzięki temu naniesione warstwy nie są utlenione w tak dużym stopniu, jak ma to miejsce w przypadku natryskiwania płomieniowego [8-11].

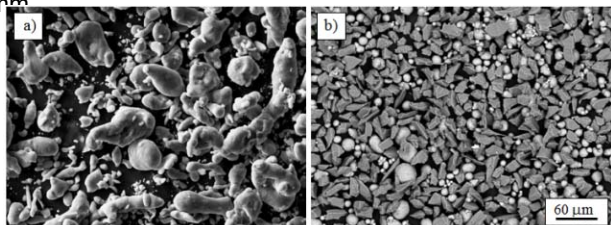
W artykule zaproponowano zastosowanie warstw pośrednich do lutowania miękkiego aluminium z miedzią nanoszonych metodami natryskiwania cieplnego, tj. metodą natryskiwania płomieniowego, łukowego oraz LPCS. Oceny lutowalności warstw dokonano na podstawie badań rozplýwności i zwilżalności powierzchni przy wykorzystaniu lutu cynkowego. Dla wybranych powłok wykonano połączenia lutowane.

Metodyka badań

W przeprowadzonych badaniach porównano zwilżalność i rozplýwność warstw aluminiowych naniesionych metodą niskociśnieniowego natryskiwania na zimno LPCS, warstw aluminiowych, cynkowych i niklowych naniesionych metodą natryskiwania płomieniowego oraz warstwy niklowej naniesionej metodą natryskiwania łukowego. Warstwy LPCS natryskiwane były przy wykorzystaniu niskociśnieniowego urządzenia DYMET 413, wyposażonego w palnik z wewnątrz wbudowaną nagrzewnicą oraz dyszą de Laval o wyjściowej średnicy Ø5 mm. Palnik był przymocowany do manipulatora pracującego w układzie 3 osiowym: x, y i z. Podczas procesu wykorzystano powietrze podgrzane do 200 °C o ciśnieniu 9 bar. Pozostałe parametry procesu: (a) masowe natężenie podawania proszku 40 g/min, (b) posuw palnika

10 mm/s, (c) odległość dyszy od podłoża 10 mm. W procesie wykorzystano dwa rodzaje proszków, aluminium (Al) – (PyroGarage, Polska), oraz aluminium z dodatkiem korundu ($\text{Al}+\text{Al}_2\text{O}_3$) – (Centrum Natryskiwania Proszkowego, Obnińsk, Rosja), o granulacji odpowiednio - $63+10\ \mu\text{m}$ oraz $-45+5\ \mu\text{m}$, odpowiednio (rys. 1). Dodatek korundu ma na celu zwiększenie gęstości, przyczepności oraz zmniejszenia porowatości powłoki. Materiały warstw zostały wybrane z uwagi na bardzo dobrą lutowność aluminium spoiwami cynkowymi [2]. Do prób lutowności, warstwy nanoszono na próbki miedziane gat. Cu-ETP w kształcie kwadratów o wymiarach $30\times 30\ \text{mm}$ i grubości 5 mm, które przed procesem natryskiwania poddano odtłuszczeniu oraz obróbce strumieniowo-ściernej, przy użyciu korundu o ziarnistości $800\ \mu\text{m}$ i ciśnieniu 6 bar.

Warstwy natryskiwane płomieniowo naniesiono stosując płomień $\text{C}_2\text{H}_2 - \text{O}_2$ i pistolet typu Uni-Spray-Jet, firmy AMIL. Do natryskiwania warstw aluminiowej (Al) i cynkowej (Zn) użyto prętów Al i Zn o średnicy 3,17 mm ($1/8''$), Euromat, Polska, natomiast warstwy nikłowe naniesiono z proszku Ni95Al5 o granulacji $45 \div 90\ \mu\text{m}$, Euromat, Polska. Do natryskiwania łukowego użyto pistoletu typu Arc Spray Unit 4P firmy MOGUL, natężenie prądu wynosiło 400 A oraz napięciu łuku 20 V. Powłokę naniesiono z drutu Ni85Al15 o średnicy 1,6 mm, Euromat, Polska. We wszystkich przypadkach odległość natryskiwania wynosiła $100 \div 120\ \text{mm}$.

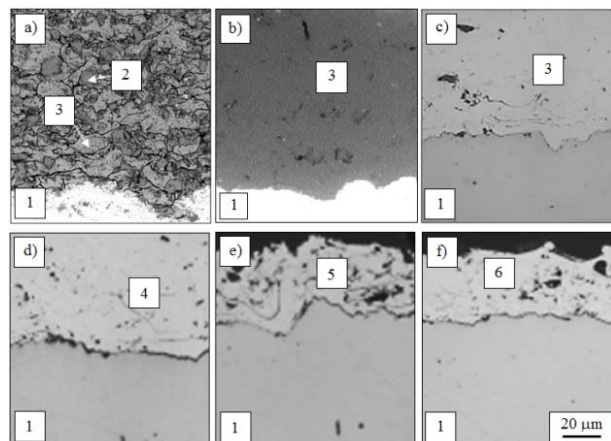


Rys. 1. Proszki użyte do natryskiwania warstw LPCS: Al (a) oraz $\text{Al}+\text{Al}_2\text{O}_3$ (b)

Przed przystąpieniem do prób zwilżalności i rozpylności, powłoki LPCS szlifowano ręcznie papierami o oznaczeniu: 80, 200, 400, 600, 800 i 1000, w celu usunięcia falistości powstałej podczas procesu natryskiwania oraz uzyskania chropowatości powierzchni nieutrudniającej jej zwilżania ciekłym lutem. Otrzymane powłoki Al oraz $\text{Al}+\text{Al}_2\text{O}_3$ wykazywały średnią chropowatość powierzchni odpowiednio $R_a \sim 0,36\ \mu\text{m}$ i $R_t \sim 4,97\ \mu\text{m}$ oraz $R_a \sim 0,2\ \mu\text{m}$ i $R_t \sim 6,73\ \mu\text{m}$. Powłoki natryskiwane płomieniowo z uwagi na płaską powierzchnię bez falistości badane były bez obróbki powierzchniowej, stąd miały chropowatość $R_a \sim 11\ \mu\text{m}$ i $R_t \sim 75 \div 110\ \mu\text{m}$.

Mikrostrukturę powłok naniesionych metodami LPCS oraz płomieniowo przedstawiono na rys. 2. Warstwy LPCS Al i $\text{Al}+\text{Al}_2\text{O}_3$ miały grubość $250\ \mu\text{m}$, warstwy naniesione płomieniowo Al, Zn i Ni95Al5 wykazywały grubość $150\ \mu\text{m}$, natomiast warstwy natryskiwane łukowo Ni85Al15 - $40\ \mu\text{m}$.

W badaniach zastosowano jeden lut cynkowy zawierający 4 % wag. Al. Wyboru dokonano na podstawie temperatury topnienia, a mianowicie lut L-ZnAl4 jest lutem około-eutektycznym, w związku z czym charakteryzuje się największym zakresem temperatury topnienia, wynoszącym $382 \div 387\ ^\circ\text{C}$ [12]. Próbki wraz z lutem L-ZnAl4 o masie 0,1 g i topnikiem 192 NX, o masie równej połowie masy lutu, układano na siatce pokrytej ceramiką, ułożoną na trójnogu laboratoryjnym i podgrzewano od dołu płomieniem propanowo-powietrznym, przy użyciu palnika Bunsena. Od momentu stopienia się lutu, próbki nagrzewano przez 5 sekund.



Rys. 2. Mikrostruktura powłok naniesionych metodą LPCS: $\text{Al}+\text{Al}_2\text{O}_3$ (a), Al (b), metodą płomieniową: Al (c), Zn (d), Ni95Al5 (e) i łukowo: Ni85Al15 (f) 1 – Cu, 2 – Al_2O_3 , 3 – Al, 4 – Zn, 5 – Ni95Al5, 6 – Ni85Al15

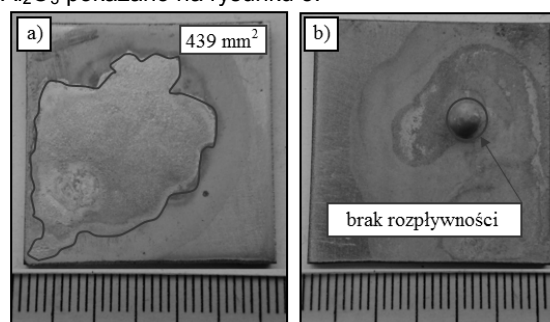
Próbki do badań metalograficznych, po zainkludowaniu, szlifowano na wodnych papierach ściernych do ozn. 4000, a następnie polerowano je zawiesiną z tlenkiem aluminium o granulacji $0,3\ \mu\text{m}$. Uzyskane zglądy poddano obserwacji przy pomocy mikroskopu świetlnego Nikon Eclipse MA200, oraz skaningowego Phenom G2.

Wyniki i dyskusja

Rozpylność i zwilżalność

Oceny lutowności warstw dokonano na podstawie badań rozpylności i zwilżalności lutów Zn. Są to zjawiska ściśle ze sobą powiązane - jedno jest następstwem drugiego (rozpylność jest następstwem zwilżalności). Badania wykonywane były w oparciu o próbę rozpylności (metodą rozpylności), której miarą jest wielkość pola powierzchni rozpylenia się lutu (w rozpatrywanym przypadku był to lut L-ZnAl4) na danym podłożu. Do jej wyznaczenia użyto programu optyczny DP-Soft do archiwizacji i cyfrowej obróbki zdjęć z funkcją planimetrywania powierzchni. Przeprowadzono analizę porównawczą warstw nanoszonych metodą LPCS z warstwami natryskiwany płomieniowo i łukowo.

Przykładowe powierzchnie rozpylności lutu L-ZnAl4 na podłożu Cu-ETP z naniesionymi LPCS warstwami Al i $\text{Al}+\text{Al}_2\text{O}_3$ pokazano na rysunku 3.



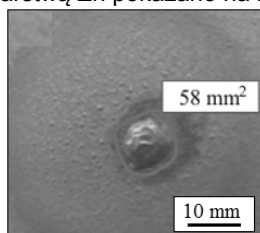
Rys. 3. Rozpylność lutu L-ZnAl4 na podłożu Cu-ETP z naniesioną LPCS warstwą Al (a) i brak rozpylności lutu L-ZnAl4 na podłożu Cu-ETP z naniesioną LPCS warstwą $\text{Al}+\text{Al}_2\text{O}_3$ (b)

Rozpylność lutu L-ZnAl4 na podłożu miedzianym gat. Cu-ETP z naniesioną LPCS warstwą Al była bardzo dobra, o czym świadczy duże pole powierzchni rozpylności, których średnia wartość z pięciu pomiarów wynosi $410\ \text{mm}^2$. Jest to wartość niemal dwukrotnie większa niż w przypadku rozpylności lutu L-ZnAl4 na powierzchni aluminium gat. EN AW-1050A (czyste aluminium, Al99,5)

[6]. Natomiast na podłożach z naniesioną LPCS warstwą Al z dodatkiem Al_2O_3 lut L-ZnAl4 nie rozpływał się wcale, co zostało przedstawione na rys. 3 b. Za każdym razem na powierzchni próbki tworzyła się kulka lutu niezwilżająca jej powierzchni. Obecność cząstek Al_2O_3 w powłoce uniemożliwiła rozplynięcie lutu. Lut cynkowy roztwarza osnowę Al, pozostawiając wystające cząstki korundu, które są trudno zwilżalne przez lut. Z tego względu w dalszej części badań nie badano już warstw Al z dodatkiem korundu.

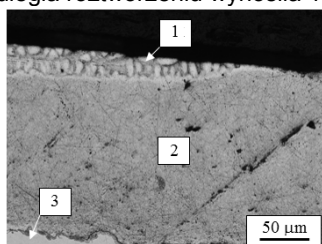
Warstwy Al i Ni95Al5 naniesione metodą natrysku płomieniowego oraz Ni85Al15 naniesione metodą natrysku łukowego, podobnie jak warstwa Al + Al_2O_3 , nie były zwilżane spoiwem cynkowym. Przyczyną braku zwilżalności było znaczne utlenienie powłok podczas ich nanoszenia. Nanoszenie powłok odbywało się, bowiem w strumieniu sprężonego powietrza, w wysokiej temperaturze. Podjęte próby usunięcia warstwy tlenkowej przez trawienie chemiczne, nie przyniosły poprawy. Na brak zwilżalności wpływ mogła mieć również wielokrotnie większa wartość parametrów chropowatości powierzchni warstw natryskiwanych płomieniowo i łukowo w porównaniu z parametrami chropowatości warstw LPCS.

Jedynie w przypadku warstw Zn możliwe było wyznaczenie pola rozplynięcia się lutu L-ZnAl4. Jednak nieduża wartość pól powierzchni rozplywności, wynosząca średnio 55 mm^2 , świadczy o jej niedostatecznej lutowności. Przykładową powierzchnię rozplywności lutu L-ZnAl4 na podłożu Cu-ETP z naniesioną metodą natrysku płomieniowego warstwą Zn pokazano na rysunku 5.



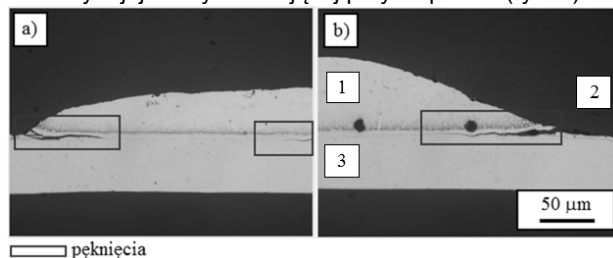
Rys. 5. Rozplywność lutu L-ZnAl4 na podłożu Cu-ETP z naniesioną metodą natrysku płomieniowego warstwą Zn

Do oceny zwilżalności miedzi gat. Cu-ETP z naniesioną LPCS warstwą Al, dokonano pomiarów kąta zwilżania Θ . W tym celu próbki przecięto w połowie rozplyniętej kropki lutu i przygotowano zglady metalograficzne, które po sfotografowaniu posłużyły do graficznego wyznaczenia kąta zwilżania (rys. 6). Średnia wartość kąta zwilżania wynosiła 2° , co świadczy o bardzo dobrej zwilżalności warstwy Al. Podobnie jak aluminium gat. EN AW-1050A [1], warstwa Al naniesiona na podłożu miedziane gat. Cu-ETP, w wyniku oddziaływania lutu L-ZnAl4 ulega roztwarzaniu. Grubość warstwy, jaka ulega roztwarzaniu zależy przede wszystkim od czasu nagrzewania mierzonego od momentu przejścia lutu ze stanu solidus w stan likwidus. W przypadku prób rozplywności i zwilżalności, czas ten wynosił 5 s, a grubość warstwy, jaka uległa roztworzeniu wynosiła $14 \div 20 \mu\text{m}$.



Rys. 6. Przykładowa zwilżalność lutem L-ZnAl4 podłoża miedzianego z naniesioną metodą LPCS warstwą Al, 1 – stopiony lut, 2 – warstwa Al, 3 – Cu

Zwilżalność warstw Zn nanoszonych metodą natrysku płomieniowego była niezadowalająca, kąt zwilżania wynosił w zakresie $\Theta = 34 \div 54^\circ$ [5]. Ponadto w większości przypadków stwierdzono oddzielenie się warstwy Zn na końcach rozplyniętej kropki lutu od podłoża miedzianego, co świadczy o jej niewystarczającej przyczepności (rys. 7).



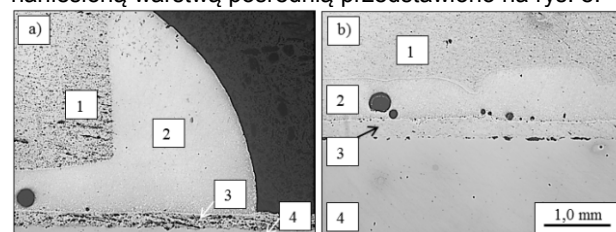
Rys. 7. Pęknięcia poprzeczne powodujące oddzielenie się warstwy Zn od podłoża miedzianego a) i b), 1 – stopiony lut, 2 – warstwa Zn, 3 – próbka Cu

Przeprowadzone próby rozplywności i zwilżalności, jednoznacznie wykazały, że warstwy nanoszone metodą natrysku płomieniowego, z uwagi na brak lub niedostateczną ich lutowność oraz niedużą przyczepność do podłoża miedzianego, nie są zalecane, jako warstwy pośrednie do procesów lutowania. Natomiast bardzo dobre wyniki otrzymane w przypadku warstwy Al nanoszonej metodą LPCS, stwarzają możliwości szerokiego zastosowania tej metody do wytwarzania warstw pośrednich do procesów lutowania oraz są zachęcające do prowadzenia dalszych badań.

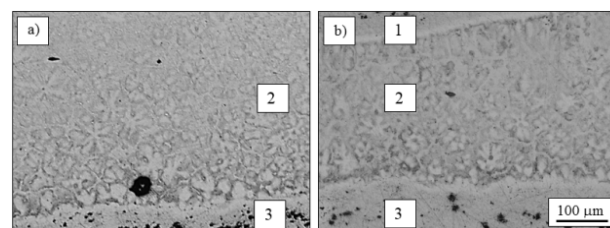
Badania metalograficzne

Do badań metalograficznych wykonano złącza zakładkowe aluminium gat. EN AW1050A z miedzią gat. Cu-ETP z naniesioną na jej powierzchni metodą LPCS warstwą Al o grubości $250 \mu\text{m}$. Złącza wykonano przez nagrzewanie płomieniem propanowo-powietrzny przy użyciu lutu L-ZnAl4. Długość zakładki wynosiła 15 mm, a szerokość szczeliny lutowniczej $0,2 \text{ mm}$ i została ustalona za pomocą stalowych drutów dystansowych.

Makrostrukturę złącza zakładkowego typu Al – Cu z naniesioną warstwą pośrednią przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Makrostruktura złącza zakładkowego typu Al – Cu z warstwą pośrednią Al wykonanego przy użyciu lutu L-ZnAl4 a) i b), 1 – próbka Al, 2 – lutownina, 3 – warstwa Al, 4 – próbka Cu



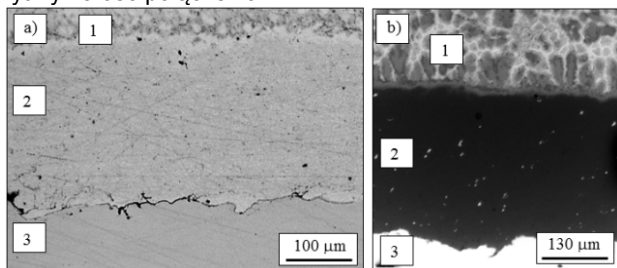
Rys. 9. Mikrostruktura lutownicy w złączu zakładkowym typu Al – Cu, 1 – próbka Al, 2 – lutownina, 3 – porowata powłoka Al

Makrostruktura złącza typu Al – Cu uwidacznia obecność pęcherzy gazowych w niektórych miejscach

lutownicy oraz roztwarzanie powierzchni aluminium przez lut cynkowy (rys. 8 b). Widoczna jest również porowata struktura aluminiowej warstwy pośredniej.

Z kolei mikrostruktura złącza pokazana na rysunku 9, wskazuje na występowanie w strukturze lutu dendrytów roztworu stałego η oraz eutektyki $\eta + \alpha$, z układu równowagi fazowej stopów aluminium-cynk, rozmieszczonej w przestrzeniach między-dendrytycznych.

Badania przy użyciu mikroskopii świetlnej (rys.10a) i skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) (Rys. 10b) umożliwiły zaobserwowanie wąskiej, wyraźnej ciągłej warstwy między lutownicą a powłoką Al, będącej najprawdopodobniej efektem dyfuzji. Występowanie zjawisk dyfuzyjnych nie oznacza jednak, że na granicy powłoki Al z lutownicą występują kruche fazy międzymetaliczne. Jest to najprawdopodobniej dyfuzja powierzchniowa związana z mechanizmami zwilżania, których w niniejszej pracy nie badano szczegółowo, mogąca mieć korzystny wpływ wytrzymałość połączenia.



Rys. 10. Wąska, ciągła warstwa na granicy powłoka – lutownina będąca najprawdopodobniej efektem dyfuzji: LM (a) SEM (b), 1 – lutownina, 2 – powłoka Al, 3 – próbka Cu

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Warstwy Al nanoszone metodą nisko-ciśnieniowego natrysku LPCS, charakteryzują się bardzo dobrą zwilżalnością spoiwa cynkowego, o czym świadczą nieduże wartości kąta zwilżania ($\Theta = 2^\circ$), co stwarza możliwość ich zastosowania jako warstw pośrednich w procesach lutowania.
2. Dodatek korundu do proszku Al powoduje, że naniesiona warstwa nie jest zwilżana spoiwami cynkowymi.
3. Warstwa Al naniesiona na podłożu miedziane Cu-ETP skutecznie ogranicza tworzenie się stref reakcyjnych na granicy połączenia z lutownicą, co może mieć korzystny wpływ na właściwości mechaniczne różnoimiennych połączeń lutowanych typu Al-Cu.
4. Warstwy nanoszone metodą natrysku płomieniowego i łukowego nie są zalecane, jako warstwy pośrednie do

lutowania z uwagi na ograniczoną lutowność wynikającą z dużego stopnia ich utlenienia na całym przekroju.

LITERATURA

- [1] HOWARD H. M., Solders and soldering, *McGraw Hill Professional*, (2001).
- [2] RAHN A., The basics of soldering, *Wiley*, (1993).
- [3] PECHT M., Soldering processes and equipment, *John Wiley & Sons*, (1993).
- [4] MIRSKI Z., GRANAT K., DRZENIEK H., PIWOWARCZYK T., WOJDAT T.: Lutowanie miękkie aluminium z miedzią, *Przegląd Spawalnictwa*, (2009), n.11, 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*, (2010), n.9, 48-53.
- [6] MIRSKI Z., WOJDAT T.: Połączenia lutowane aluminium z miedzią, stałą niestopową i stopową spoiwami cynkowymi, *Przegląd Spawalnictwa*, (2013), n.4, 2-8.
- [7] MIRSKI Z., WOJDAT T., PIWOWARCZYK T., STACHOWICZ M.: Bariery dyfuzyjne zapobiegające kruchości połączeń lutowanych aluminium z innymi metalami, *Przegląd Spawalnictwa*, (2013), n.8, 13-22.
- [8] CHAMPAGNE V. K.: The cold spray materials deposition process - Fundamentals and applications, *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge, (2007).
- [9] MAEV R. G., LESHCHYNSKY V.: Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray, *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim, (2008).
- [10] ASSADI H., GÄRTNER F., STOLTENHOFF T., KREYE H.: Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia*, 51 (2003), 4379–4394.
- [11] KOIYULUOTO H., LAGERBOM J., KYLMALAHTI M., YUORISTO P.: Microstructure and Mechanical Properties of Low-Pressure Cold-Sprayed (LPCS) Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 17 (2008), 721-727.
- [12] EUROMAT: *Katalog lutów i topników*, Wrocław (2009).

Autorzy: dr inż. Tomasz Wojdat, Politechnika Wrocławska, Katedra Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, E-mail: tomasz.wojdat@pwr.edu.pl, mgr inż. Marcin Winnicki, Politechnika Wrocławska, Katedra Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, E-mail: marcin.winnicki@pwr.edu.pl, dr inż. Małgorzata Rutkowska-Gorczyca, Politechnika Wrocławska, Katedra Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, E-mail: malgorzata.rutkowska-gorczyca@pwr.edu.pl, prof. dr hab. inż. Zbigniew Mirski, Politechnika Wrocławska, Katedra Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, E-mail: zbigniew.mirski@pwr.edu.pl, prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, Politechnika Wrocławska, Katedra Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, E-mail: andrzej.ambroziak@pwr.edu.pl