

Badanie skłonności i określenie przyczyn tworzenia się pęknięć w lutospoinach złączy zakładkowych aluminium-stal niestopowa wykonanych metodą CMT oraz laserem diodowym dużej mocy

A study of susceptibility and evaluation of causes of cracks formation in braze-weld filler metal in lap joints aluminum-carbon steel made with use of CMT method and high power diode laser

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących skłonności do tworzenia się pęknięć w lutospoinach złączy zakładkowych cienkich blach aluminiowych i karoseryjnych blach stalowych obustronnie galwanizowanych cynkiem, które wykonywano laserem diodowym dużej mocy (HPDL) ROFIN DL 020 oraz łukowo metodą CMT z użyciem materiału dodatkowego odpowiednio w postaci proszku i drutu litego. Przedstawiono wyniki badań metalograficznych makroskopowych i mikroskopowych, rentgenografii strukturalnej, mikroanalizy rentgenowskiej EDS oraz pomiarów twardości. Wskazano na przyczyny powstawania w lutospoinach na osnowie aluminium, złączy różnoimiennych typu aluminium - ocynkowana stal niestopowa, kruchych faz międzymetalicznych typu Fe-Al.

Słowa kluczowe: lutowanie Cold Metal Transfer; lutowanie laserem diodowym dużej mocy; złącza różnoimienne; fazy międzymetaliczne; pękanie kruche; materiały trudno-spawalne; aluminium; stal niestopowa ocynkowana elektrolitycznie

Abstract

In this article results of studies on cracks formation susceptibility in braze-welded joints of thin aluminum sheets and double-sided zinc galvanized steel sheets for car body parts made by laser brazing with high power diode laser ROFIN DL 020 and CMT MIG-brazing, with filler material in form of powder and wire accordingly, were presented. Results of macro- and microscopic metallographic examinations, structural roentgenography, EDS microanalysis and hardness tests were presented. Causes of brittle intermetallic Fe-Al phases formation in Al-matrix filler metal in dissimilar aluminum – zinc plated carbon steel joints were pointed.

Keywords: CMT braze-welding; high power diode laser brazing; dissimilar joints; intermetallic phases; brittle cracking; difficult to weld materials; aluminium sheet; galvanized low carbon sheet steel

Wstęp

Karoseria współczesnego samochodu ma nie tylko odznaczać się walorami estetycznymi, ale przede wszystkim spełniać wymogi związane z bezpieczeństwem, trwałością, komfortem użytkowania oraz niskimi kosztami jej wytwarzania. Obecnie koncerny motoryzacyjne silnie konkurują

w tym obszarze, po przez wdrażanie nowatorskich rozwiązań konstrukcyjnych nadwozia samochodowego, wykorzystywanie do jego produkcji coraz wytrzymalszych gatunków stali (od stali o wysokiej wytrzymałości typu HSS do zaawansowanych nanostrukturalnych stali o bardzo wysokiej

Dr inż. Artur Czupryński; mgr inż. Bernard Wyględacz – Politechnika Śląska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: bernard.wyględacz@polsl.pl

wytrzymałości typu AHSS 3 generacji, rys. 1 a), wprowadzanie nowych technologii wykonywania elementów karoserii samochodowych (np. tailored blank i tailor roled blanks) oraz stosowanie nowoczesnych procesów ich łączenia, takich jak: klejenie, zgrzewanie tarciove, niskoenergetyczne lutowanie łukowe czy spawanie laserowe konwencjonalne oraz hybrydowe [1÷7]. Ważną ideą towarzyszącą projektowaniu nadwozi samochodów nowej generacji jest przede wszystkim zmniejszenie ciężaru pojazdu, co bezpośrednio przekłada się na wyższe osiągi i niższe koszty eksploatacji.

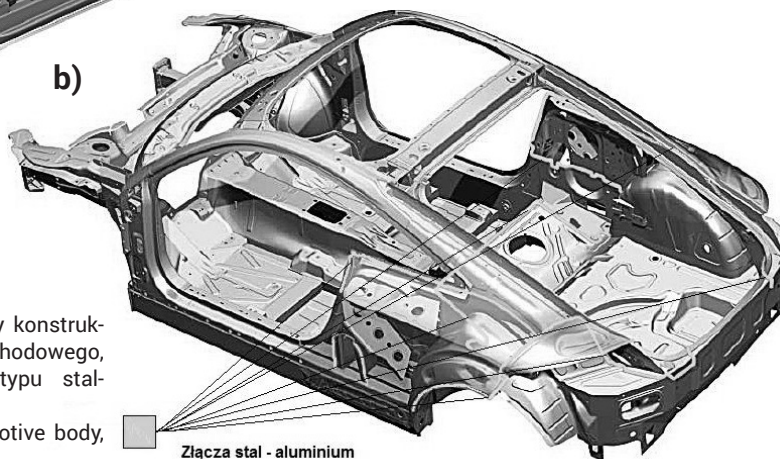
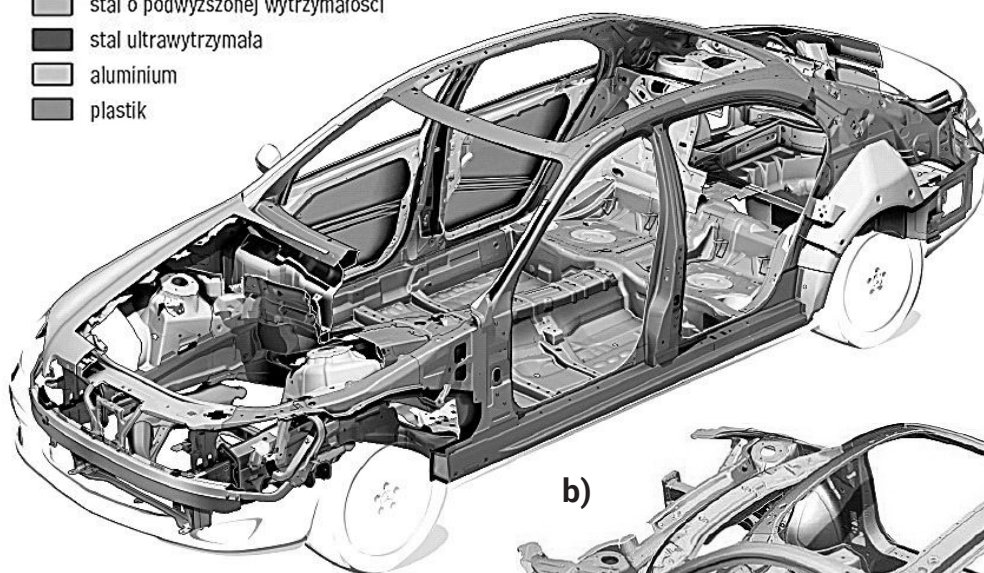
Realizuje się to przez zwiększenie grubości blachy w miejscach najbardziej narażonych na zgniecenie w czasie kolizji, np. słupków bocznych nadwozia i drzwi przednich oraz przez łączenie ze sobą technikami spawalniczymi elementów tłoczonych z arkuszy blach stalowych pokrytych galwanicznie powłoką cynkową i blach aluminiowych, rys. 1 b). Duże możliwości w spajaniu tego typu materiałów stwarza technologia lutowania, szczególnie z wykorzystaniem spoiw o niskim zakresie temperatur likwidusu i solidusu, np. Zn-Al4 (385÷418 °C) lub Al-Si12 (573÷585 °C). Niemniej jednak istotnym problemem dotyczącym tego typu połączeń są pęknięcia lokalizujące się najczęściej w obszarze materiału lutowanego, tuż przy powierzchni cynkowej powłoki ochronnej blachy stalowej [8].

Technologię lutowania wysokotemperaturowego elementów tylnej klapy w samochodzie Volkswagen Caddy przedstawiono na przykładzie źródła laserowego YLS-5000-BR rosyjskiej firmy IPG o mocy 5 kW (rys. 2). Jest to nowoczesny laser włóknowy, gdzie promieniowanie laserowe wytwarzane jest w specjalnym światłowodzie, który jest pompowany przy pomocy odpowiednio dobranych pakietów diod laserowych. Konstrukcja tego źródła sprawia, że jego sprawność wynosi 42%, co jest obecnie wynikiem doskonałym, choć trwają już prace nad źródłami o sprawności powyżej 50%.

Przebieg i wyniki badań

Przeprowadzone badania miały na celu ustalenie warunków formowania lutowanego oraz czynników mogących powodować pękanie kruche lutowanych na osnowie aluminium w różnoimiennych złączach zakładkowych cienkich blach aluminiowych i stali niestopowej obustronnie ocynkowanej elektrolitycznie, wykonywanych w technologii lutowania laserem diodowym dużej mocy z użyciem spoiwa w postaci proszku oraz w procesie niskoenergetycznego lutowania łukowego metodą CMT drutem elektrodowym litym. Na podstawie badań wizualnych i badań metalograficznych makroskopowych ocenie poddane zostały kształt lutowanego i jakość złączy lutowanych. Szczegółowe badania metalograficzne mikroskopowe, rentgenografii strukturalnej i mikroanalizy rentgenowskiej EDS pozwoliły na ocenę struktury lutowanego, materiałów rodzimych oraz przyczyniły się do określenia czynników mogące sprzyjać powstawaniu kruchych faz międzymetalicznych w lutowanych aluminiowych złączy różnoimiennych aluminium - ocynkowana stal niestopowa. Złącza próbne wykonano na stanowisku zmechanizowanym wyposażonym stół krzyżowy z prowadnicami prostoliniowymi i układem dociskowym utwierdzającym lutowane blachy oraz stosownie do prowadzonych prób, laser diodowy dużej mocy ROFIN DL 020 wraz z talerzykowym podajnikiem proszku oraz urządzenie spawalnicze TransPuls Synergic 3200 CMT MV R wraz z osprzętem. Podczas lutowania laserowego głowicę ustawiono prostopadle do powierzchni stołu ustalając położenie plamki wiązki lasera tak jak pokazano na rysunku 2a, a dyszę podajnika proszku aluminium skierowano pod kątem 45° w stosunku do powierzchni łączonych blach, w sposób zapewniający podawanie spoiwa lutowniczego w os złącza.

- a)
- stal miękka
 - stal stopowa
 - stal o podwyższonej wytrzymałości
 - stal ultrawytrzymała
 - aluminium
 - plastik

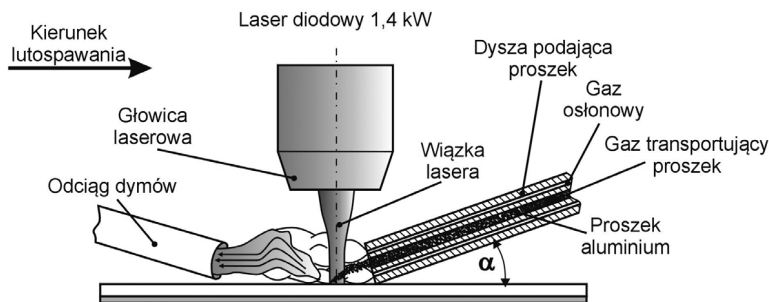


Rys. 1. Karoseria samochodu osobowego: a) materiały konstrukcyjne wykorzystywane przy budowie nadwozia samochodowego, b) przykładowe miejsca występowania połączeń typu stal-aluminium w konstrukcji nadwozia samochodowego

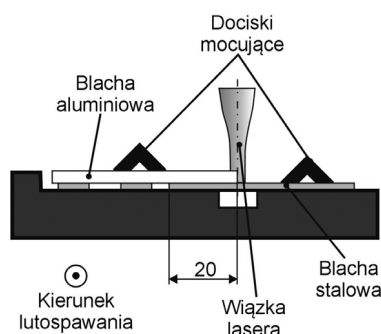
Fig. 1. Car body: a) materials used for building automotive body, b) locations of steel-aluminium joints in car chassis

Proces lutowania łukowego metodą CMT prowadzono prądem stałym z biegunowością dodatnią w pozycji podłonej, ruchem w prawo, kąt pochylenia uchwytu spawalniczego względem powierzchni łączonych blach wynosił 90° , a łuk spawalniczy oparto na powierzchni blachy aluminiowej, rys. 2 b).

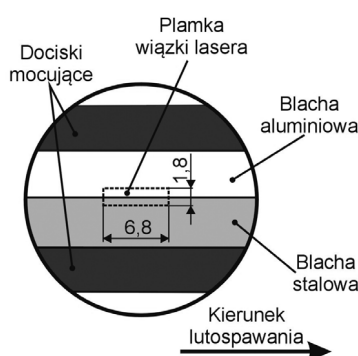
Widok poprzeczny do kierunku lutowania



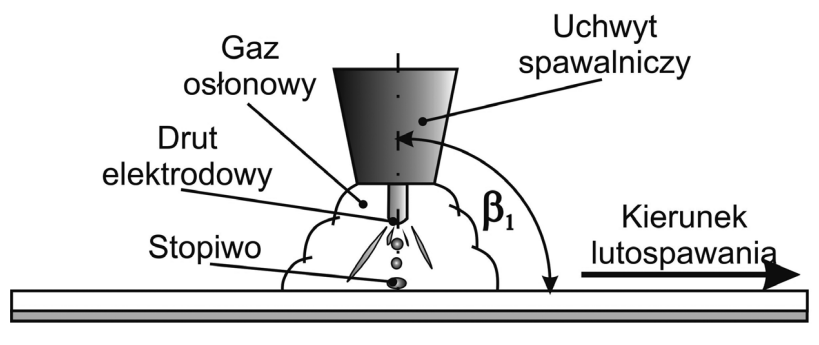
Widok w kierunku lutowania



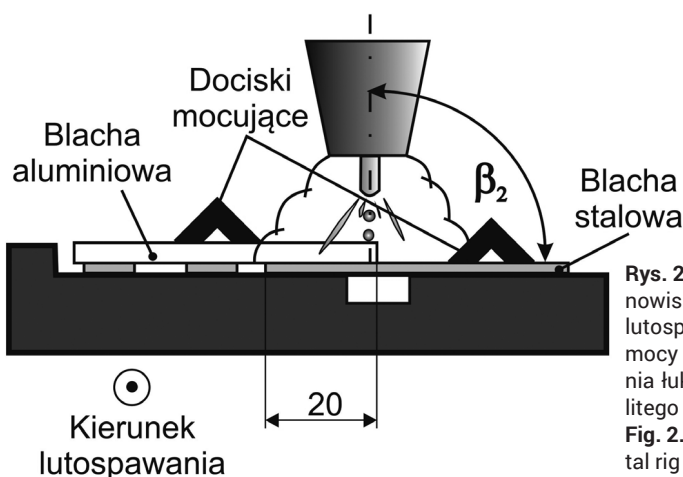
Usytuowania plamki lasera



Widok poprzeczny do kierunku lutowania



Widok w kierunku lutowania



Do wykonania złączy zakładkowych użyto cienkich blach o wymiarach 1,0x150x100 mm wykonanych ze stali miękkiej niestopowej przeznaczonej do bezpośredniej obróbki plastycznej gatunku DC04+ZE75/75 (wg EN ISO 10152:2011) obustronnie elektrolitycznie pokrytych powłoką cynkową o grubości 7,5 μm oraz blach o wymiarach 2,0x150x100 mm wytworzonych z aluminium gatunku 1050A (wg EN ISO 573-3:2014). Skład chemiczny oraz właściwości wytrzymałościowe materiałów lutowanych przedstawiono w tablicach I i II.

Próby lutowania laserowego przeprowadzono użyciem proszku aluminium gatunku 1070A (wg PN-EN 573-3:2014) o granulacji 450 μm (tabl. III). Spoiwo o takim składzie chemicznym, znajduje zastosowanie w procesach łączenia technikami spawalniczymi elementów wykorzystywanych w przemyśle chemicznym, spożywczym, elektronicznym i budownictwie.

Materiał dodatkowy do lutowania łukowego metodą CMT stanowił drut elektrodowy lity o średnicy 1,2 mm gatunku S Al 4047 (AlSi12) - wg normy EN ISO 18273:2016 (tabl. IV). Spoiwo typu AlSi12 wykorzystywane jest głównie do napraw odlewów ze stopów aluminium zawierających 7÷12% Si np. G-AlSi12, G-AlSi8Cu3, G-AlMg3Si i innych. Nadaje się również do spajania różnorodnych stopów aluminium, szczególnie tych narażonych na ryzyko pęknięć gorących oraz do wykonywania konstrukcji aluminiowych pracujących w podwyższonej temperaturze. Znajduje zastosowanie w procesach łączenia technikami spawalniczymi elementów wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym oraz HVAC.

Przed przystąpieniem do wykonania złączy próbnych łączone elementy pozycjonowano względem siebie na stole wyposażonym w oprzyrządowanie mocujące, za każdym razem nakładając blachę aluminiową na blachę stalową oraz ustalając zakładkę wynoszącą 20 mm.

Optymalne parametry technologiczne lutowania laserowego proszkowego oraz niskoenergetycznego lutowania łukowego metodą CMT, umożliwiające wykonanie różnorodnych złączy zakładkowych, w procesie łączenia cienkich blach wytworzonych z aluminium gatunku 1050A i stali niestopowej gatunku DC04 obustronnie ocynkowanej elektrolitycznie zestawiono w tablicach V i VI.

Rys. 2. Sposób mocowania blach i konfiguracji źródła ciepła na stanowiskach badawczych przeznaczonych do zmechanizowanego lutowania podczas: a) lutowania laserem diodowym dużej mocy (HPDL) z użyciem spoiwa w postaci proszku, b) lutowania łukowego metodą CMT z zastosowaniem drutu elektrodowego litego

Fig. 2. Means of fixture and heat source configuration in experimental rig for mechanized braze-welding during: a) high power diode laser (HPDL) braze-welding with additional material in form of powder, b) CMT MIG-brazing with additional material in form of wire

Tablica I. Zawartość składników stopowych oraz właściwości mechaniczne blachy ze stali miękkiej niestopowej do bezpośredniej obróbki plastycznej gatunku DC04+ZE75/75 obustronnie ocynkowanej elektrolitycznie (wg EN ISO 10152:2011)

Table I. Content of alloying elements and mechanical properties of soft steel plate for direct plastic working grade DC04+ZE75/75 zinc galvanized from both sides

Skład chemiczny [%]			
C	Mn	P	S
<0,08	<0,40	<0,03	<0,03
Właściwości mechaniczne			
R _e [MPa]	R _m min. [MPa]	A ₅ min. [%]	Grubość warstwy cynku [µm]
140÷220	270÷350	38	7,5

Tablica II. Zawartość składników stopowych oraz właściwości mechaniczne blachy ze stopu aluminium gatunku 1050A (wg EN ISO 573-3:2014)

Table II. Content of alloying elements and mechanical properties of aluminium plate grade 1050A (acc. EN ISO 573-3:2014)

Skład chemiczny [%]								
Al	Fe	Si	Zn	Ti	Mg	Mn	Cu	inne
99,5	<0,4	<0,25	<0,07	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,03
Właściwości mechaniczne								
R _e [MPa]	R _m min. [MPa]			A ₅ min. [%]				
20	65÷95			26				

Tablica III. Zawartość składników stopowych w proszku aluminium gatunku 1070A (wg PN-EN 573-3:2014)

Table III. Contents of alloying elements of aluminium powder grade 1070A (acc. PN-EN 573-3:2014)

Zawartość składników stopowych [%]							
Al	Si	Zn	Fe	Ti	Cu	Mn	Mg
>99,70	<0,20	<0,07	<0,25	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03

Tablica IV. Zawartość składników stopowych w proszku aluminium gatunku 1070A (wg PN-EN 573-3:2014)

Table IV. Contents of alloying elements of aluminium powder grade 1070A (acc. PN-EN 573-3:2014)

Skład chemiczny [%]				
Al	Si	Fe	Mn	Zn
reszta	12,0	<0,60	<0,15	<0,20
Właściwości mechaniczne				
R _{p0,2} [MPa]	R _m min. [MPa]		A ₅ min. [%]	
80	170		12	

Tablica V. Optymalne parametry technologiczne umożliwiające wykonanie różnoimiennych złączy zakładkowych w procesie lutowania laserem diodowym dużej mocy cienkich blach wytworzonych z aluminium gatunku 1050A oraz stali niestopowej gatunku DC04 obustronnie ocynkowanej elektrolitycznie z zastosowaniem spoiwa w postaci proszku aluminium gatunku 1070A

Table V. Optimal technological parameters enabling formation of dissimilar thin plate lap joints by high power diode laser braze-welding made of aluminium grade 1050A and carbon steel DC04 zinc galvanized from both side with use of additional material in form of grade 1070A aluminium powder

Moc wyjściowa P [W]	Prędkość spawania V _{sp} [m/min]	Ilość podawanego proszku V [g/min]	Natężenie przepływu gazu Q [dm ³ /min]	Skład chemiczny osłony gazowej
1400	0,2	1,0	2,5	100% Ar

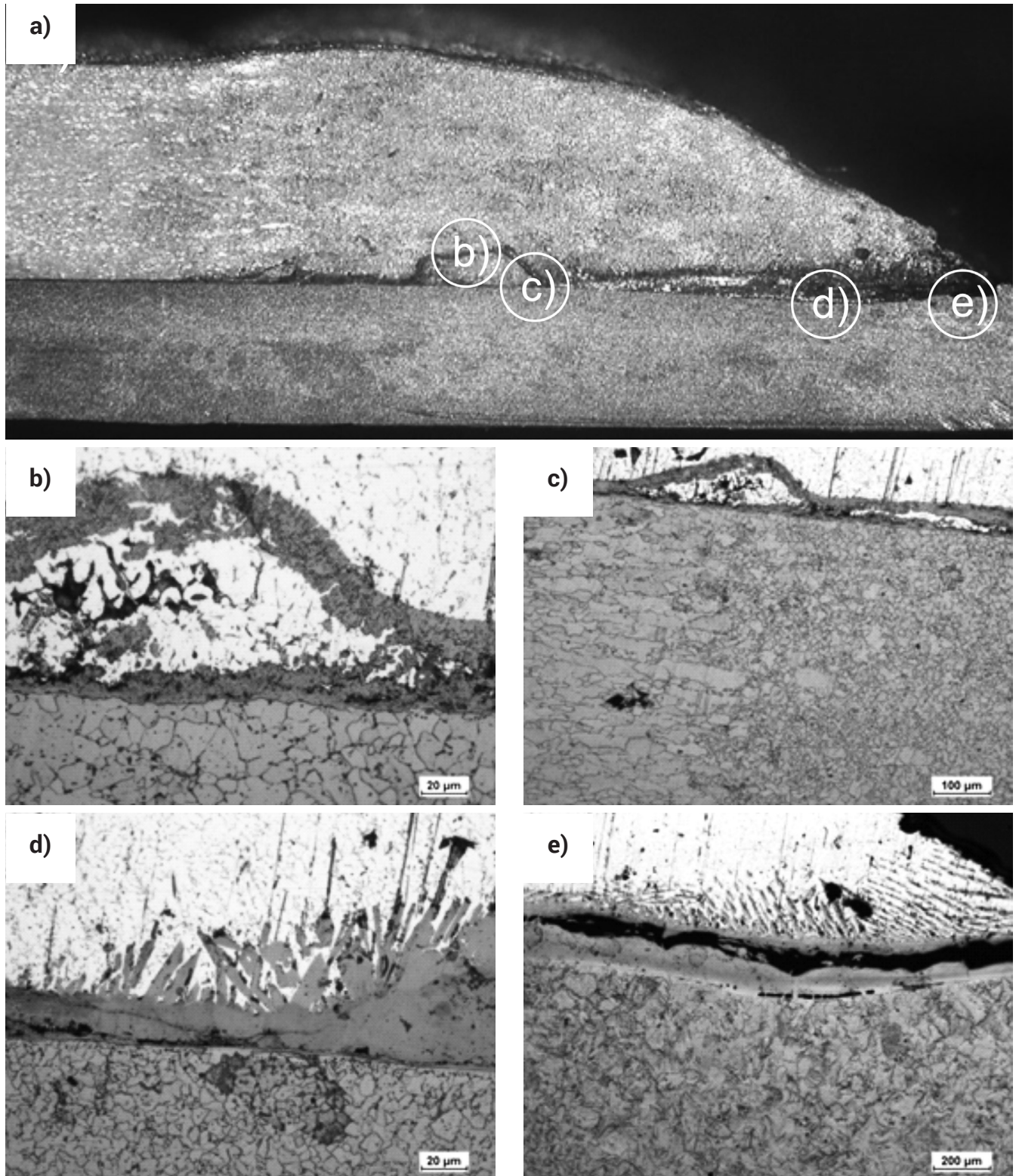
Tablica VI. Optymalne parametry technologiczne umożliwiające wykonanie różnoimiennych złączy zakładkowych w procesie lutowania łukowego metodą CMT cienkich blach wytworzonych z aluminium gatunku 1050A oraz stali niestopowej gatunku DC04 obustronnie ocynkowanej elektrolitycznie z zastosowaniem spoiwa w postaci drutu elektrodowego litego S Al 4047

Table VI. Optimal technological parameters enabling formation of dissimilar thin plate lap joints by high power diode laser braze-welding made of aluminium grade 1050A and carbon steel DC04 zinc galvanized from both side with use of additional material in form of S Al 4047 solid wire

Natężenie prądu I [A]	Napięcie łuku U [V]	Prędkość spawania V _{sp} [cm/min]	Prędkość podawania drutu V _d [m/min]	Natężenie przepływu gazu Q [dm ³ /min]	Skład chemiczny osłony gazowej
78	12,4	45	4,5	12	100% Ar

Po procesie lutowania wykonane złącza zakładkowe cienkich blach z aluminium gatunku 1050A i obustronnie ocynkowanej stali niestopowej gatunku DC04 poddano badaniom wizualnym. Badania wykonano zgodnie z warunkami opisanymi w PN-EN ISO 17637:2011. Wyniki badań złącza wytworzone w technologii lutowania laserem diodowym dużej mocy z użyciem materiału dodatkowego w postaci proszku aluminium gatunku 1070A jak i złącza lutowanego łukowego metodą CMT z zastosowaniem drutu elektrodowego litego gatunku S Al 4047 wskazywały

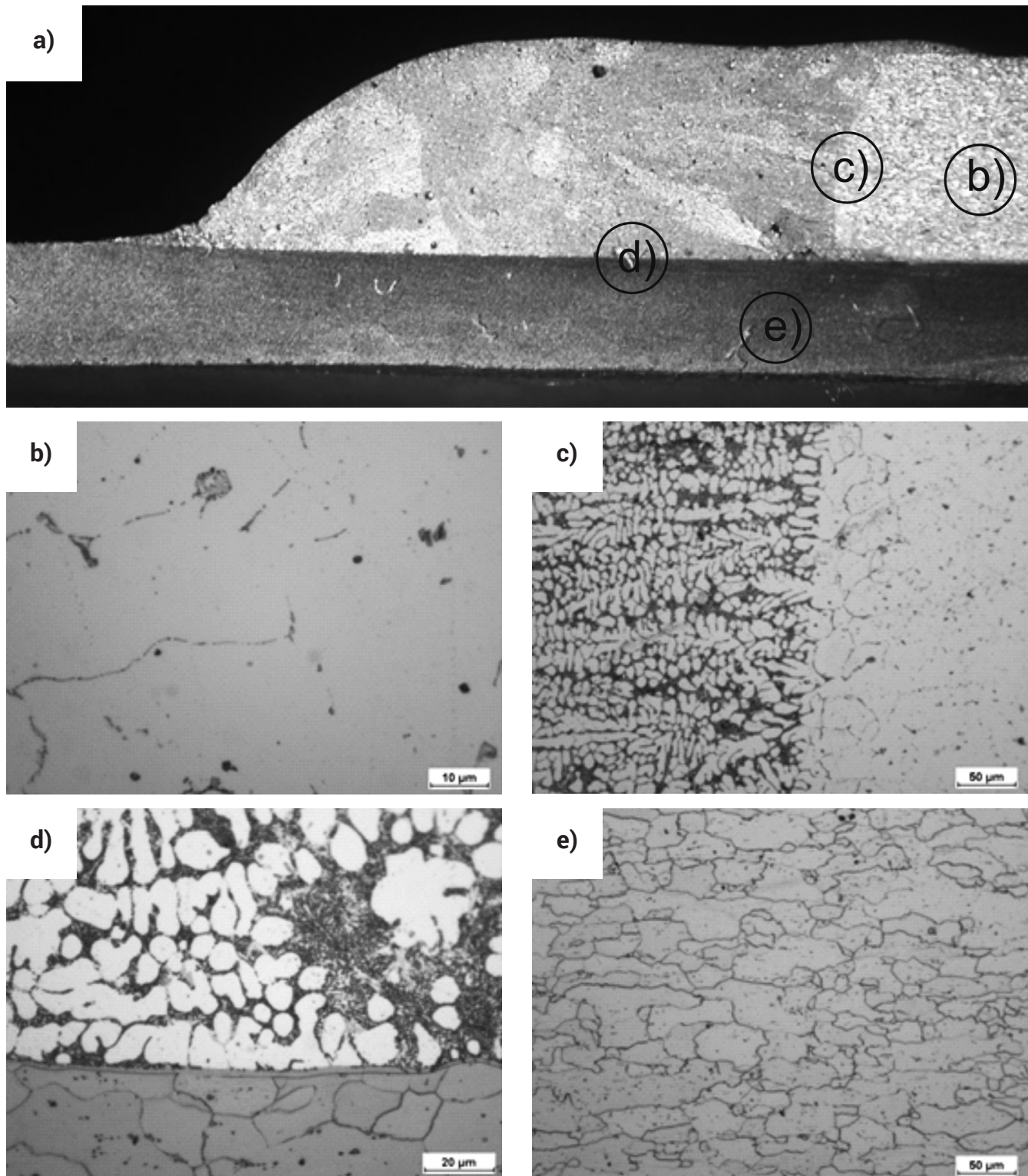
na prawidłową rozpląność i przebieg formowania stopu lutowniczego, które w obu przypadkach we właściwy sposób pokrywało blachę stalową. Wykonane lutowania odznaczały się regularnym kształtem, poprawnymi wymiarami oraz metalicznym połyskiem i dużą gładkością lica. Od spodu złącza zakładkowych, na powierzchni blachy stalowej, w miejscu oddziaływania źródła ciepła, nie zauważono uszkodzenia zabezpieczenia antykorozyjnego. W złączach nie stwierdzono wad typu pęknięcia zewnętrzne, przyklejenia lub brak wypełnienia rowka spawalniczego.



Rys. 3. Makrostruktura i mikrostruktury próbki pobranej z różnoimennego złącza zakładkowego aluminium 1050A - ocynkowana stal niestopowa DC04, lutowanego laserem diodowym dużej mocy z zastosowaniem proszku aluminium gatunku 1070A (aluminium u góry, stal na dołu): a) makrostruktura złącza; b), c), d), e) mikrostruktura obszarów styku lutowspoiny z ocynkowaną stalą niestopową
Fig. 3. Macro- and microstructure of sample cut from dissimilar lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 brazed-welded by high power diode laser with additional material in form of grade 1070A aluminium powder (aluminium in the top, steel in the bottom): a) joint macrostructure; b), c), d), e) braze metal – galvanized carbon steel plate contact area microstructure

Badania metalograficzne w skali makro i mikroskopowej wykonano w celu oceny struktury i identyfikacji ewentualnych niezgodności zlokalizowanych wewnątrz wykonanych lutospoin. Prace badawcze przeprowadzono na trawionych zglądach metalograficznych wyciętych ze złącza w kierunku prostopadłym do jego osi. Wstępnej obserwacji przekroju poprzecznego lutospoin w skali makro dokonano przy użyciu mikroskopu stereoskopowego stosując powiększenie

od 4 do 25 razy. Dalsze badania metalograficzne przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego w obszarach charakterystycznych złącza przy powiększeniu od 100 do 800 razy. Zdjęcia makrostruktury złącza wraz z obrazami mikrostruktury przedstawiającymi obszary materiałów rodzimych, SWC, linii przejścia pomiędzy lutospoiną a materiałami łączonymi oraz materiału lutospoiny przedstawiono na rysunkach 3÷4.



Rys. 4. Makrostruktura i mikrostruktury próbki pobranej z różnoimiennej złącza zakładkowego aluminium 1050A - ocynkowana stal niestopowa DC04, lutospawanego łukowo metodą CMT z zastosowaniem drutu elektrodowego litego gatunku S Al 4047 (aluminium u góry, stal u dołu): a) makrostruktura złącza, b) mikrostruktura obszaru materiału rodzimego aluminium 1050A, c) mikrostruktura obszaru przejścia z lutospoiny do materiału rodzimego aluminium 1050A, d) mikrostruktura obszaru styku lutospoiny z materiałem rodzimym ocynkowaną stalą niestopową DC04, e) mikrostruktura obszaru materiału rodzimego ocynkowanej stali niestopowej DC04

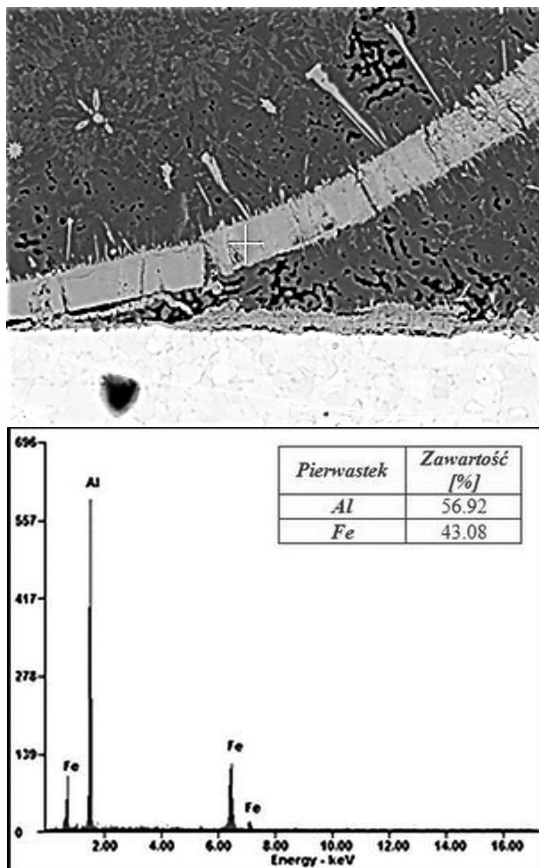
Fig. 4. Macro- and microstructure of sample cut from dissimilar lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 CMT MIG-brazed with additional material in form of grade S Al 4047 solid wire (aluminium in the top, steel in the bottom): a) joint macrostructure, b) Al 1050A parent metal microstructure, c) braze metal – Al 1050A parent metal transition area microstructure, d) braze metal – galvanized carbon steel plate contact area microstructure e) galvanized steel DC04 parent material microstructure

Na podstawie zdjęć zglądów metalograficznych pobranych z wykonanych złączy stwierdzono, że strukturę materiałów rodzimych tj. aluminium gatunku 1050A i stali niestopowej gatunku DC04 stanowiły odpowiednio roztwór stały aluminium α z pewną ilością perytektyk oraz drobnoziarnisty ferryt ze śladowymi ilościami perlitu. W zależności od metody lutowania, zaobserwowano zasadnicze różnice w strukturze uzyskanych lutospoin. W złączy wykonanym w technologii lutowania laserowego proszkowego, stwierdzono prawidłowy kształt przekroju poprzecznego lutospoiny, z pewną ilością podłużnych pęcherzy gazowych (rys. 3a). Ponadto, w stopiwi lutowniczym zidentyfikowano wtrącenia iglaste wnikające w lutospoinę i ukierunkowane prostopadle do powierzchni blachy stalowej (rys. 3d) oraz pasmowe wtrącenia biegnące równoległe do linii przejścia lutospoiny w stal niestopową (rys. 3b i 3c). Poza tym, w lutospoinie odnotowano pęknięcie umiejscowione tuż nad powierzchnią blachy stalowej (rys. 3e). W materiale rodzimym, poniżej powłoki cynku, zaobserwowano wąską SWC. W złączy wykonanym techniką niskoenergetycznego lutowania łukowego metodą CMT zaobserwowano regularny kształt przekroju poprzecznego lutospoiny pozbawiony pęknięć, jednakże zawierający pojedyncze pęcherze gazowe o kształcie w przybliżeniu kulistym (rys. 4a). Struktura lutospoiny odznaczała się dendrytycznymi wydzieleniami roztworu stałego aluminium α na tle drobnoziarnistej eutektyki. Linia przejścia między lutospoiną i blachą aluminiową charakteryzowała się dużą regularnością z minimalnym nadtopieniem materiału rodzimego

(rys. 4c). Zauważono również, że przy granicy międzyfazowej stal ocynkowana - materiał lutospoiny, powłoka cynku w pewnym stopniu rozpuszcza się w ciekłym stopiwi prawie bez nadtopienia stalowego podłoża (rys. 4d).

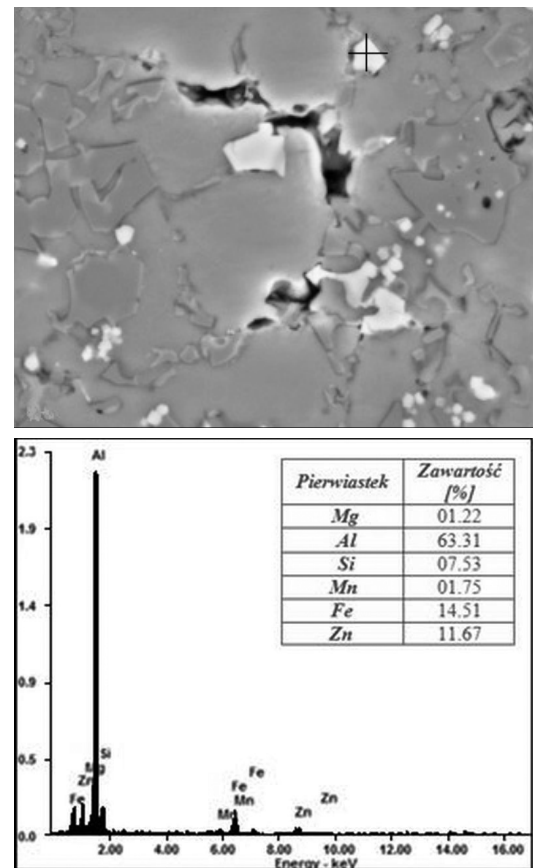
Do uzyskania wysokiej jakości obrazów struktury wykonanych lutospoin użyto elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM). Obserwacji zglądów metalograficznych dokonano przy powiększeniu od 500 do 1000 razy. Wyniki badań na mikroskopie skaningowym pozwoliły na określenie zawartości składu chemicznego w mikroobszarach lutospoiny w których doszło do pęknięć, sprawdzenie składu chemicznego niezidentyfikowanych wtrąceń w stopiwi lutownicy oraz identyfikację innych niezgodności, takich jak: pustki gazowe, pęknięcia itp. Przykładowe wyniki obserwacji wtrąceń oraz wyniki mikroanalizy ich składu chemicznego przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

W pasmowych wtrąceniach zlokalizowanych w lutospoinie nad powierzchnią blachy stalowej (rys. 5) stwierdzono obecność żelaza dochodzącą do 43%. Powodem obecności metali w aluminiowej osnowie lutospoiny było stopienie powłoki cynkowej i częściowe nadtopienie blachy stalowej. Mikroanaliza składu chemicznego lutospoiny wykonanej metodą CMT w analogicznym obszarze pomiaru jak w przypadku lutospoiny wykonanej laserem diodowym dużej mocy, nie wykazała w nim obecności żelaza. W strukturze tej lutospoiny, tuż nad powierzchnią blachy stalowej zidentyfikowano bardzo drobne wtrącenia o złożonym składzie chemicznym (rys. 6).



Rys. 5. Obraz SEM wtrąceń w lutospoinie złącza zakładkowego aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04 wykonanego laserem diodowym dużej mocy z użyciem spoiwa w postaci proszku aluminium gatunku 1070A (pow. 1000x) oraz mikroanaliza składu chemicznego w punkcie pomiaru położonym na wtrąceniu znajdującym się w lutospoinie

Fig. 5. SEM view of inclusions in braze metal of lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 braze-welded by high power diode laser with additional material in form of grade 1070A aluminium powder (magn. 1000x) and micro-analysis of chemical composition in test point located on inclusion in braze metal

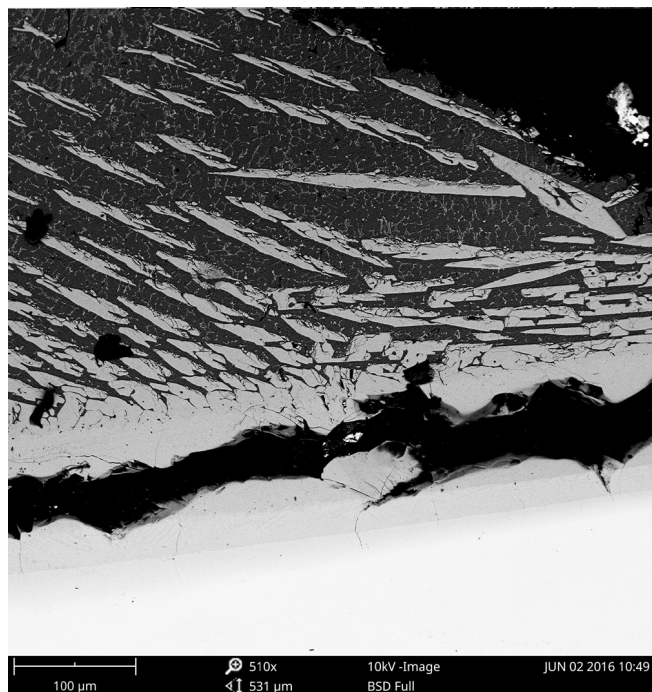


Rys. 6. Obraz SEM wtrąceń w lutospoinie złącza zakładkowego aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04 wykonanego łukowo metodą CMT z użyciem spoiwa w postaci drutu elektrodowego litego gatunku S Al 4047 (pow. 5000x) oraz mikroanaliza składu chemicznego w punkcie pomiaru położonym na wtrąceniu znajdującym się w lutospoinie

Fig. 6. SEM view of inclusions in braze metal of lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 CMT MIG-brazed with additional material in form of grade S Al 4047 solid wire (magn. 5000x) and micro-analysis of chemical composition in test point located on inclusion in braze metal

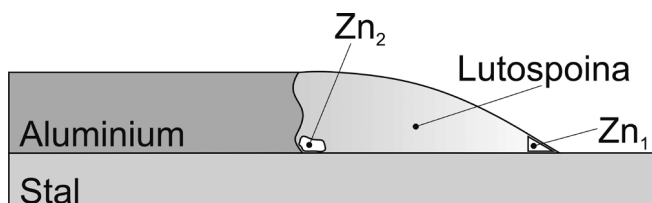
Na obrazie SEM próbki pobranej ze złącza zakładkowego wykonanego w technologii lutowania laserowego proszkowego (rys. 7) przedstawiono obszar zewnętrznego naroża lutowiny (Zn_1) znajdujący się przy powierzchni blachy stalowej (rys. 8). W obszarze tym nie stwierdzono występowania podwyższonej zawartości cynku, a obserwowana mikrostruktura składała się z faz Al-Fe i aluminium z niewielką ilością żelaza znajdującym się pomiędzy fazami Al-Fe. W złączu tym natomiast strefa bogata w cynk znajdowała się w lutownicy przy granicy faz blisko linii wtopienia lutowiny w blachę aluminiową (Zn_2) (rys. 8). W miejscu tym, cynk rozpuszczał się w aluminiowej lutownicy na głębokości ok. 0,3 mm na nieregularnym obszarze oddzielonym pęknięciem od blachy aluminiowej, w którym widoczne były pojedyncze pęcherze gazowe (rys. 9). W obszarze tym ilość cynku wynosiła 12.7%.

W przypadku złącza lutowanego metodą CMT stwierdzono natomiast wysoką zawartość cynku przekraczającą 27% (rys. 10) w obszarze na brzegu lutowiny. Zwiększone stężenie cynku w przekroju poprzecznym lutowiny wykryto wyłącznie w obszarze znajdującym się przy brzegu lutowiny (Zn_1) (rys. 8), którego kształt zbliżony był do trójkąta o wysokości ok. 0,25 mm i podstawie wynoszącej 1 mm.



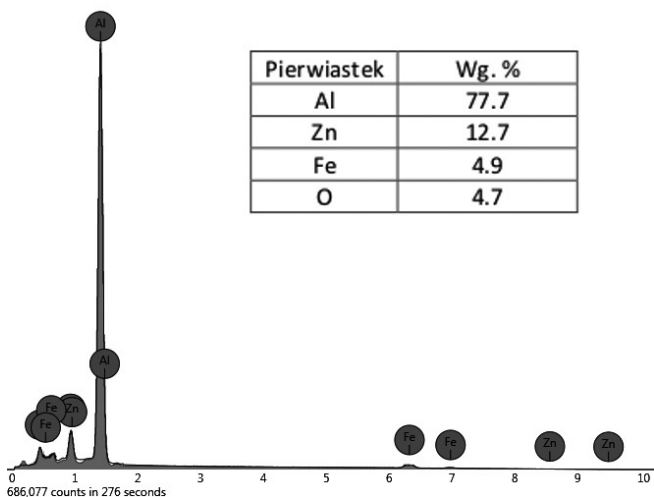
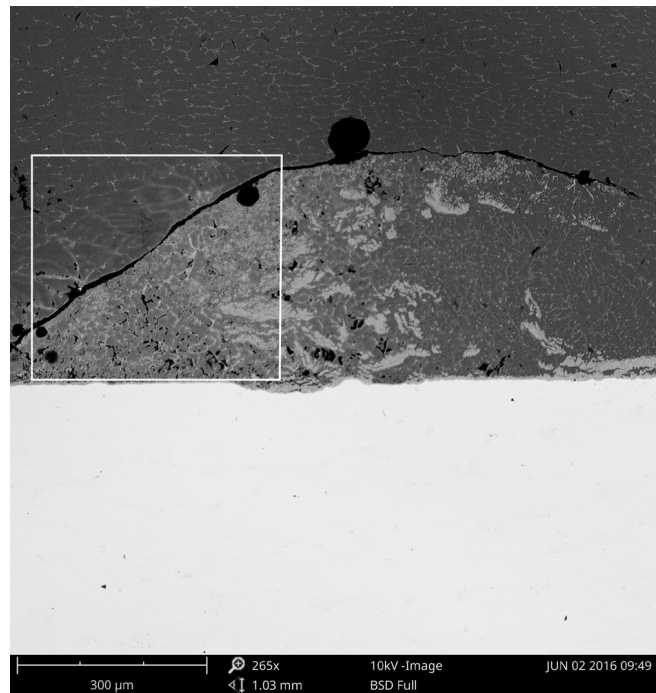
Rys. 7. Obraz BSE obszaru brzegu lutowiny złącza zakładkowego aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04 wykonanego laserem diodowym dużej mocy z użyciem spoiwa w postaci proszku aluminium gatunku 1070A

Fig. 7. BSE view of side area in braze metal of lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 braze-welded by high power diode laser with additional material in form of grade 1070A



Rys. 8. Obszary o zwiększonej zawartości cynku w lutownicy na osnowie aluminium

Fig. 8. Areas of increased zinc content in aluminium matrix braze-welded joint

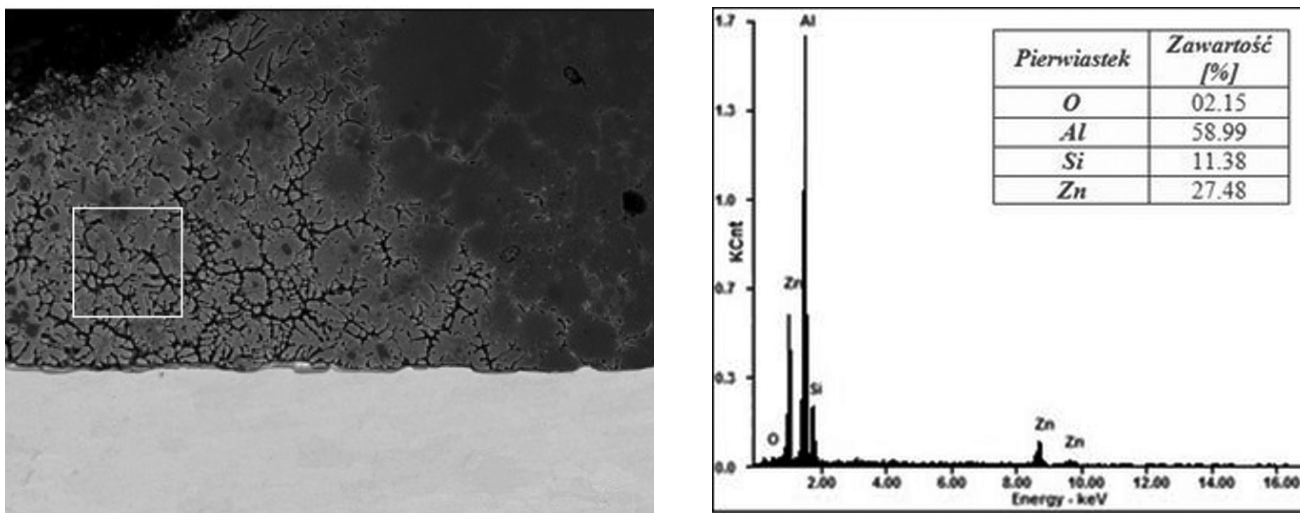


Rys. 9. Obraz BSE obszaru bogatego w cynk w lutownicy złącza zakładkowego aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04 wykonanego laserem diodowym dużej mocy z użyciem spoiwa w postaci proszku aluminium gatunku 1070A mikroanaliza składu chemicznego w obszarze pomiaru znajdującym się w lutownicy przy powierzchni blachy stalowej

Fig. 9. BSE view of zinc-rich area in braze metal of lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 braze-welded by high power diode laser with additional material in form of grade 1070A aluminium powder and micro-analysis of chemical composition in test area located near steel plate surface

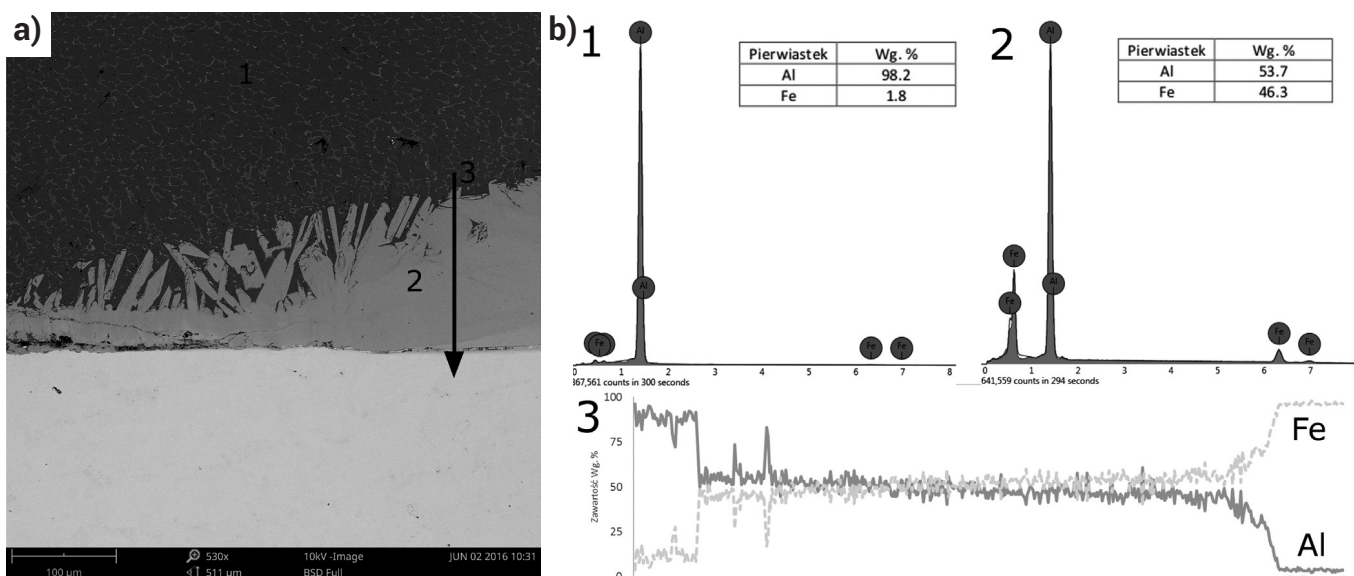
Różne umiejscowienie obszarów o zwiększonym stężeniu cynku w lutownicach na osnowie aluminium wykonywanych techniką laserową lub łukową może być spowodowane odmiennym oddziaływaniem pojedynczego lub wielu z czynników, takich jak: kierunek i szybkość konwekcji ciepłego metalu, stopień koncentracji źródła ciepła, cykl cieplny procesu, warunki krystalizacji lutowiny, itp.

Mikroanaliza EDS pozwoliła na określenie grubości oraz identyfikację powierzchniową i objętościową pierwiastków chemicznych wchodzących w skład warstwy reaktywnej znajdującej się pomiędzy blachą stalową a lutowiną, jak również materiału samej lutowiny. Wyniki badań analizy EDS przedstawiono na rysunkach 11÷14.



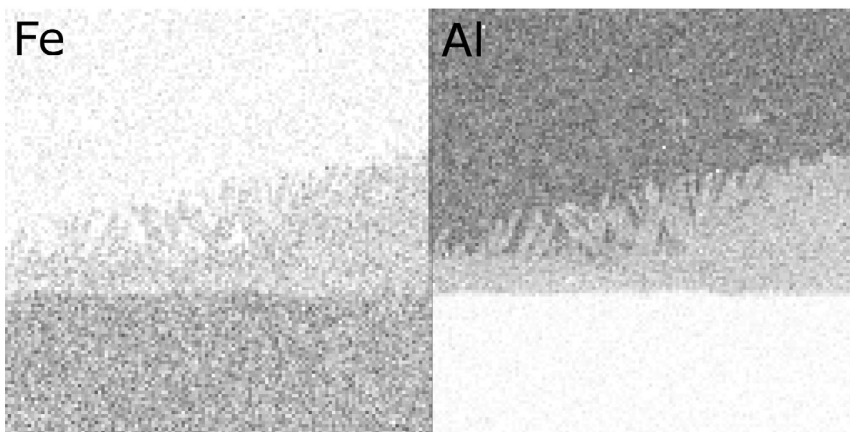
Rys. 10. Obraz BSE lutospoiny złącza zakładkowego aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04 wykonanego łukowo metodą CMT z użyciem spoiwa w postaci drutu elektrodowego litego gatunku S Al 4047 (pow. 500x) oraz mikroanaliza składu chemicznego w obszarze pomiaru znajdującym się w lutospoinie przy powierzchni blachy stalowej

Fig. 10. BSE view of braze metal of lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 CMT MIG-brazed with additional material in form of grade S Al 4047 solid wire (magn. 500x) and micro-analysis of chemical composition in test area located near steel plate surface



Rys. 11. Obraz BSE warstwy reaktywnej w lutospoinie złącza zakładkowego aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04 wykonanego laserem diodowym dużej mocy z użyciem spoiwa w postaci proszku aluminium gatunku 1070A wraz z oznaczeniem miejsc wykonania analiz EDS i ich wynikami

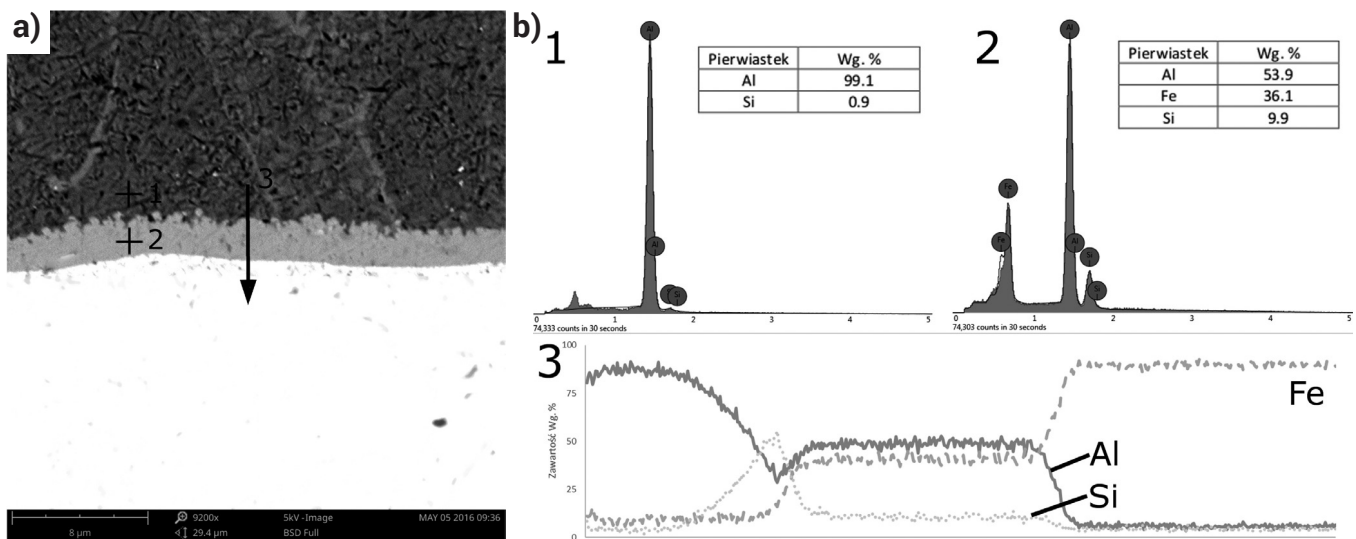
Fig. 11. BSE view of reactive layer in braze metal of lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 braze-welded by high power diode laser with additional material in form of grade 1070A aluminium powder including EDS analyses placement and their results



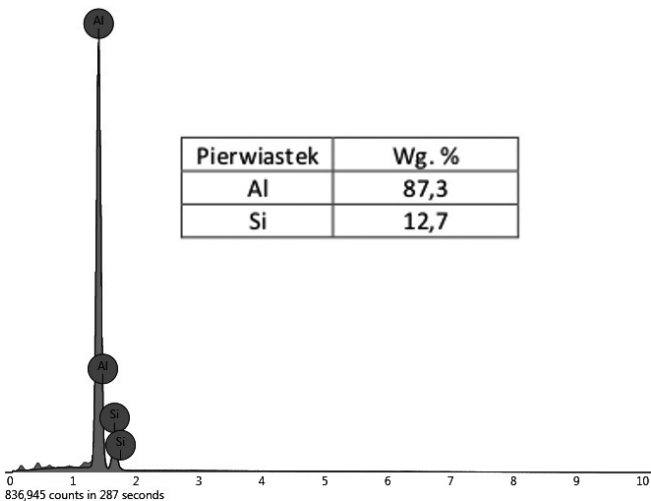
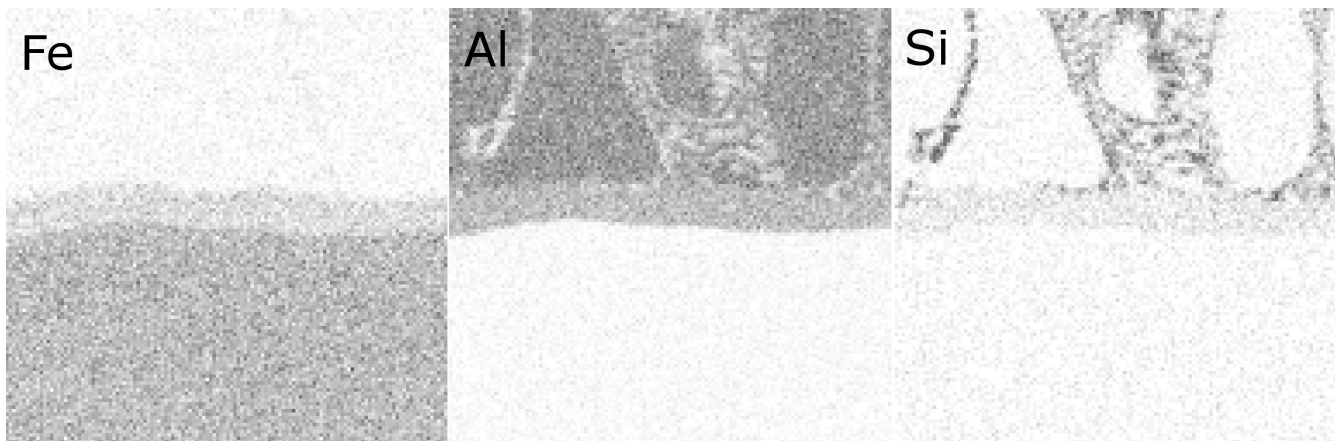
Rys. 12. Mapy pierwiastkowe warstwy widoku z rys. 11 a) dla żelaza i aluminium

Fig. 12. Elemental maps of view from fig. 11 a) for iron and aluminium

W złączu wykonanym techniką lutospawania laserowego proszkowego grubość warstwy reaktywnej zawierała się w przedziale od 20 do 300 μm i rosła wraz z oddalaniem się od linii wtopienia lutospoiny w blachę aluminiową (rys. 11a). Struktura warstwy reaktywnej posiadała wiele pęknięć i nieciągłości propagujących wzdłuż granicy z blachą stalową oraz składała się przede wszystkim z mieszaniny faz między-metalicznych typu Al-Fe. Potwierdziła to analiza EDS przeprowadzona w mikroobszarze 2 (rys. 11), która wskazała na obecność w warstwie reaktywnej niespełna 54% aluminium oraz powyżej 46% żelaza. Analiza liniowa EDS



Rys. 13. Obraz BSE warstwy reaktywnej w lutospoinie złącza zakładkowego aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04 wykonanego łukowo metodą CMT z użyciem spoiwa w postaci drutu elektrodowego lekkiego gatunku S Al 4047 wraz z oznaczeniem miejsc wykonania analiz EDS i ich wynikami
Fig. 13. BSE view of reactive layer in braze metal of lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 CMT MIG-brazed with additional material in form of grade S Al 4047 solid wire including EDS analyses placement and their results

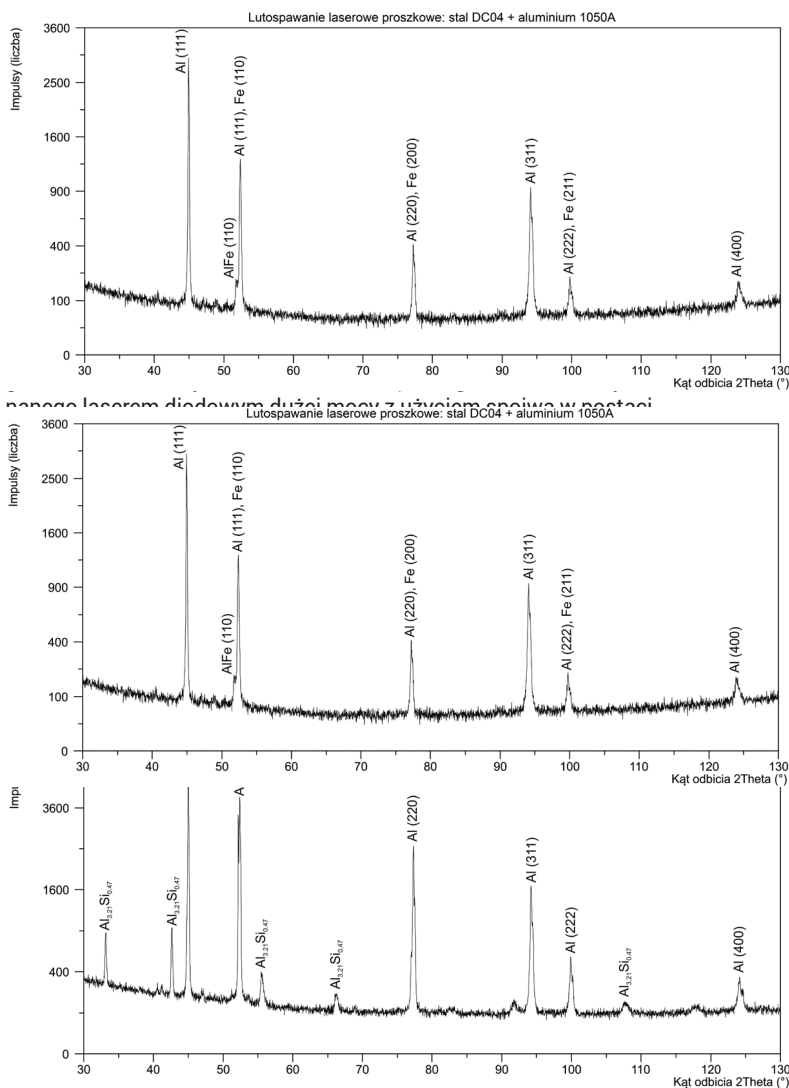


Rys. 14. Mapy pierwiastkowe widoku z rysunku 13a dla żelaza, aluminium i krzemu oraz wyniki analizy składu chemicznego w mikroobszarze lutospoiny przyległym do strefy przejściowej
Fig. 14. Elemental maps of view from figure 13a for iron, aluminium and silicon and results of chemical composition analysis in micro-area of braze metal adjacent to transition zone

przeprowadzona wzdłuż linii 3 (rys. 11), wykazała jednorodność składu chemicznego warstwy Fe-Al, poza dwoma miejscami w których na niewielkiej długości odnotowano skokowy wzrost zawartości aluminium.

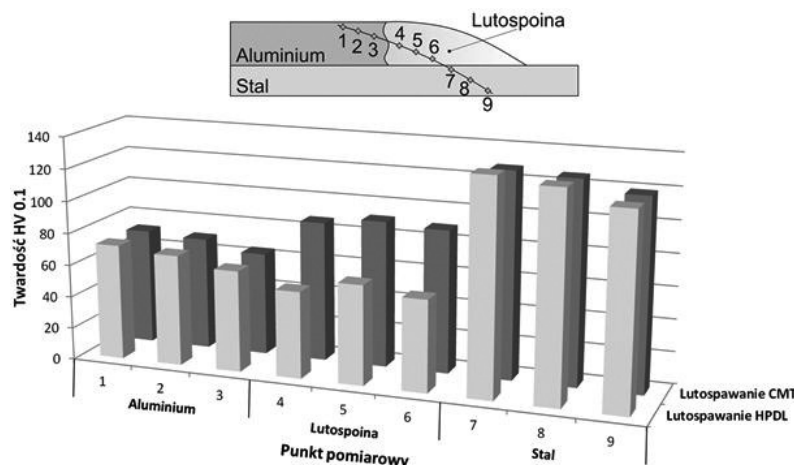
W miejscach tych na obrazie BSE widoczne są drobne nieciągłości warstwy reaktywnej wypełnione materiałem lutospoiny. W mikroobszarze 1 znajdującym się po za warstwą reaktywną analiza składu chemicznego, wskazała na obecność w objętości lutospoiny żelaza w stężeniu wynoszącym ok. 2%, co zgodne jest z rozpuszczalnością żelaza w ciekłym aluminium w temperaturze bliskiej temperaturze topnienia czystego aluminium.

W złączu lutowanym łukowo metodą CMT warstwa reaktywna była ciągła, równomierna i dobrze przylegająca do powierzchni blachy stalowej. Jej grubość na przekroju złącza zmieniała się nieznacznie i wynosiła od 4 do 8 µm. Punktowa analiza EDS lutospoiny w niewielkiej odległości od strefy przejściowej (punkt 1, rys. 13a), w porównaniu ze składem chemicznym materiału dodatkowego, wykazała wysoką zawartość aluminium (99,1%) i niską zawartość krzemu (0,9%). Analiza punktowa EDS w środkowej części warstwy reaktywnej na jej przekroju potwierdzono analizą liniową EDS przeprowadzoną wzdłuż linii 3, (rys. 13a). W celu wyjaśnienia niskiego stężenia krzemu w lutospoinie oraz skokowego wzrostu jego zawartości w warstwie reaktywnej wykonano mapy pierwiastkowe oraz analizę składu chemicznego w kwadratowym mikroobszarze lutospoiny (30x30 µm), który przylegał do strefy przejściowej (rys. 14).



Rys. 16. Dyfraktogram lutospoiny złącza zakładkowego aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04 wykonanego łukowo metodą CMT z użyciem spoiwa w postaci drutu elektrodowego litego gatunku S Al 4047

Fig. 16. Diffractogram from braze metal of lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 CMT MIG-brazed with additional material in form of grade S Al 4047 solid wire



Rys. 17. Rozkład punktów pomiarowych oraz wyniki pomiarów twardości w złączach zakładkowych aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04 wykonanych w technologii lutowania laserem diodowym dużej mocy z zastosowaniem spoiwa w postaci proszku aluminium gatunku 1070A oraz techniką łukowego lutowania metodą CMT z użyciem spoiwa w postaci drutu elektrodowego litego gatunku S Al 4047

Fig. 17. Hardness tests pattern and their results in lap joint aluminium grade 1050A – galvanized carbon steel DC04 braze-welded by high power diode laser with additional material in form of grade 1070A aluminium powder and CMT MIG-brazed with additional material in form of grade S Al 4047 solid wire

Mapy pierwiastkowe przedstawione na rysunku 14 pokazały, że zarówno niska zawartość krzemu w punkcie 1 jak i wzrost jego zawartości w warstwie reaktywnej spowodowane są niejednorodnością morfologiczną struktury lutospoiny. Na granicy lutospoina - warstwa reaktywna występują obszary zarówno bogatsze jak i uboższe w krzem. Wyniki analizy EDS z większego obszaru wskazują na obecność około 12% krzemu w lutospoinie, co odpowiada zawartości krzemu w spoiwie.

Badania wykonane na dyfraktometrze rentgenowskim miały na celu określenie składu fazowego stopiwa lutospoin złączki zakładkowych aluminium - ocynkowana stal niestopowa, wykonanych w technologii lutowania laserowego oraz łukowego metodą CMT. Wyniki rentgenowskiej analizy jakościowej przedstawiono na dyfraktogramach, rys. 15÷16.

Badania dyfraktometryczne jednoznacznie nie potwierdziły obecności faz typu Al-Fe w lutospoinach złączki zakładkowych aluminium gatunku 1050A - ocynkowana stal niestopowa gatunku DC04. W strukturze lutospoiny złącza wykonanego laserem diodowym dużej mocy z użyciem spoiwa w postaci proszku aluminium gatunku 1070A poza obecnością aluminium i żelaza stwierdzono występowanie pojedynczej linii dyfrakcyjnej o niewielkiej intensywności pochodzącej od płaszczyzny (110) fazy Al-Fe. Natomiast w strukturze lutospoiny złącza wykonanego łukowo metodą CMT z zastosowaniem spoiwa w postaci drutu elektrodowego litego gatunku S Al 4047 zaobserwowano występowanie pięciu linii dyfrakcyjnych pochodzących od fazy Al_{3.21}Si_{0.47}.

Badania twardości przeprowadzono metodą Vickersa w próbie mikrotwardości przy obciążeniu 100 g (HV 0.1). Pomiarów dokonano wzdłuż jednej linii pomiarowej w obszarze materiału rodzimego - aluminium, lutospoiny oraz materiału rodzimego - stali niestopowej. Rozkład punktów pomiarowych oraz wyniki pomiarów twardości w złączach wykonanych w technologii lutowania laserem diodowym dużej mocy oraz techniką łukowego lutowania metodą CMT przedstawiono na rysunku 17.

Materiał rodzimy aluminium gatunku 1050A charakteryzował się twardością wynoszącą od 63 HV 0.1 do 72 HV 0.1, przy czym, zarówno w złączu wykonanym w technologii lutowania laserowego proszkowego, jak również w złączu przygotowanym poprzez lutowanie łukowe metodą CMT w skutek wyżarzania materiału rodzimego można było zaobserwować tendencję do spadku twardości aluminium w strefie przyległej do lutospoiny (SWC). Badane mikroobszary lutospoiny wykonanej laserem diodowym dużej mocy z zastosowaniem spoiwa w postaci proszku aluminium gatunku 1070A charakteryzowały się twardością wynoszącą od 54 HV 0.1 do 62 HV 0.1, niższą niż twardość stopu aluminium gatunku 1050A oraz twardość lutospoiny wykonanej metodą CMT z użyciem spoiwa w postaci drutu elektrodowego gatunku

S Al 4047 (87÷91 HV 0.1). W materiale rodzimym stali niestopowej gatunku DC04, twardość w strefie graniczącej z lutospoiną wynosiła 133 HV 0.1 i 128 HV 0.1 odpowiednio w złączu wykonanym laserem diodowym i metodą CMT,

co potwierdza występowanie wąskiej SWC. W odległości ok. 500 µm od powierzchni blachy, twardość stali wynosiła ok. 120 HV 0.1 i była charakterystyczna dla struktury ferrytycznej z niewielką ilością perlitu i cementytu.

Podsumowanie

Technologie lutowania materiałów różnomiennych w postaci cienkich blach wykonanych z aluminium gatunku 1050A i ocynkowanej stali niestopowej gatunku DC04 ułożonych na zakładkę, prowadzone przy wykorzystaniu lasera diodowego dużej mocy i spoiwa w postaci proszku aluminium gatunku 1070A, jak również metody CMT z użyciem materiału dodatkowo w postaci drutu elektrodowego gatunku S Al 4047, charakteryzują się dużą stabilnością przebiegu procesu łączenia i pozwalają na formowanie lutospoin poprawnych pod względem geometrycznym oraz pozbawionych niezgodności spawalniczych możliwych do zidentyfikowania metodami badań wizualnych. W zakresie optymalnych parametrów lutowania, oddziaływanie wiązki promieniowania laserowego jak i ciepła niskoenergetycznego łuku elektrycznego na ocynkowaną stal niestopową, nie powoduje uszkodzenia powłoki ochronnej po spodniej stronie blachy, w stopniu wpływającym na pogorszenie zabezpieczenia antykorozyjnego. Jednakże, w przypadku złącza wykonanego w technologii lutowania laserowego proszkowego, w przeciwieństwie do tego samego rodzaju złącza wytworzonego techniką lutowania łukowego metodą CMT, lutospoina nie jest wolna od niezgodności wewnętrznych w postaci pęknięć i wtrąceń. Pęknięcia w lutospoinach na osnowie aluminium mają charakter pęknięć kruchych spowodowanych występowaniem w obszarze przejściowym, warstwy reaktywnej złożonej z kruchych faz międzymetalicznych. Żelazo, będące produktem nadtopienia blachy stalowej, w znikomych ilościach rozpuszcza się w aluminium, dlatego w obszarze przyległym do powierzchni blachy stalowej tworzy, występujące w postaci wolnej, kruche fazy międzymetaliczne typu Al-Fe, które wpływają na pogorszenie własności plastycznych złącza.

Silniejsze nadtopienie blachy stalowej oraz odmienne warunki krystalizacji lutospoin złącza wykonywanego laserem diodowym dużej mocy w porównaniu do złącza wytworzonego łukowo metodą CMT, wpływają niekorzystnie na budowę strukturalną, grubość, stan naprężeń wewnętrznych i siłę wiązania warstwy reaktywnej z podłożem. Duża grubość warstwy reaktywnej, jej skład chemiczny, duża szybkość chłodzenia i intensywna konwekcja ciekłego metalu lutospoiny w przypadku złącza wykonanego laserowo proszkowo, sprzyjały wzrostowi naprężeń własnych w warstwie, skutkiem czego dochodzi do oddzielania się jej od podłoża i propagacji pęknięć równoległych do powierzchni blachy stalowej.

W czasie lutowania laserowego i łukowego cynk stanowiący pokrycie ochronne blachy niestopowej ulega stopieniu i częściowemu odparowaniu. Ze względu na niewielką rozpuszczalność cynku w roztworze stałym aluminium α , należy przypuszczać, że jego niewielka część może przechodzić do lutospoiny również w postaci wtrąceń tlenkowych np. ZnO, Al₂O₄Zn czy Fe₂O₄Zn. W dużej ilości stopiony cynk zostawał wypychany przez ciekły metal lutospoiny i przemieszczany w kierunku jej brzegu. Stężenie cynku w tym obszarze było znacznie podwyższone, a ciągłość zabezpieczenia antykorozyjnego złącza zachowana. W procesie lutowania laserem diodowym dużej mocy, w porównaniu z lutowaniem łukowym metodą CMT, znacznie intensywniejsze parowanie cynku i szybsza krystalizacja ciekłego metalu, sprzyjały powstawaniu podłużnych pęcherzy gazowych często stanowiących początek pęknięć w lutospoinie. Wykonanie lutowanego złącza zakładkowego z aluminium i ocynkowanej stali niestopowej o akceptowalnym poziomie jakości wymaga dostarczenia do obszaru lutowania ściśle określonej ilości ciepła, niezbędnego do stopienia spoiwa oraz nagrzania obszaru łączonych elementów do temperatury aktywującej procesy kapilarne i nie powodującej nadtopienia blachy stalowej.

Literatura

- [1] Gawrysiuk W.: Technologia lutowania łukowego. Zalecenia technologiczne i przemysłowe przykłady zastosowania, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 3 (2005) 35-40.
- [2] Różański M., Gawrysiuk W.: Lutowanie MIG/MAG blach ocynkowanych i przykłady trudno spawalnych układów materiałowych, Przegląd Spawalnictwa 9 (2007) 7-12.
- [3] Gawrysiuk W., Pfeifer T., Winiowski A.: Charakterystyka Technologii lutowania łukowego MIG/MAG, Przegląd Spawalnictwa 2-3 (2005) 17-20.
- [4] Białucki P., Ambroziak A., Derlukiewicz W., Lange A., Bednarek T.: Wpływ lutowania łukowego na właściwości złączy stali ocynkowanej ognio-, Przegląd Spawalnictwa 9 (2013) 20-28.
- [5] Matusiak J., Czworonóg B., Pfeifer T.: Spawanie i lutowanie niskoenergetycznymi metodami MIG/MAG przeznaczonymi do łączenia materiałów i elementów wrażliwych na ciepło, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 6 (2007) 41-46.
- [6] De Dompablo M.: Nowe rozwiązania w technologii spawania ColdArc i forceArc, Przegląd Spawalnictwa 7-8 (2009) 12-17.
- [7] Różański M.: Nowoczesne metody lutowania, Przegląd Spawalnictwa 9 (2010) 24-28.
- [8] Ogura T., Saito Y., Ueda K., Hirose A.: Evaluation of interfacial microstructures in dissimilar joints of aluminum alloys to steel using nanoindentation technique, Journal of Physics: Conference Series 165 (2009) 012016, doi:10.1088/1742-6596/165/1/012016