

Wykorzystanie niskoenergetycznego procesu CBT do łączenia stali wysokostopowej z miedzią

Using of low heat input CBT process in joining of high-alloy steel with cooper

Streszczenie

W artykule przedstawiono zastosowanie technologii lutowania łukowego z wykorzystaniem niskoenergetycznego procesu CBT (*Controlled Bridge Transfer*) na przykładzie łączenia stalowych blach wysokostopowych z blachami miedzianymi. Przedstawiono wyniki badań metalograficznych makro- i mikroskopowych oraz właściwości wytrzymałościowych otrzymanych połączeń. Wskazano na problemy występujące podczas lutowania materiałów znacznie różniących się właściwościami oraz przedstawiono korzyści związane z wykorzystaniem niskoenergetycznych technologii lutowania. Otrzymane wnioski pozwalają na stwierdzenie, że lutowanie łukowe metodą CBT jest jedną z lepszych metod łączenia stali wysokostopowych z miedzią.

Słowa kluczowe: niskoenergetyczne metody spawania, lutowanie łukowe, metoda CBT, złącza różnoimienne, materiały trudno spawalne

Abstract

Low heat input CBT (Controlled Bridge Transfer) braze welding technology of joining high alloy stainless steel with cooper plates were described in this paper. Results of macro-, microscopic and mechanical properties tests were shown. Indicated the main problems during braze welding of material with significant different properties and shown a lot of benefits of using this technology. Achieved results can indicates that one of the better technologies of joining steels with cooper is braze welding.

Keywords: Low heat input welding methods, arc braze welding, CBT method, dissimilar joints, difficult to weld materials.

Wstęp

W przemyśle motoryzacyjnym, technologii budowy maszyn, w urządzeniach przemysłowych, a także w podzespołach elektronicznych i kompozytach coraz częściej zachodzi konieczność łączenia ze sobą materiałów konstrukcyjnych o odmiennych właściwościach. Spawanie płomieniowe czy powszechnie stosowane metody spawania łukowego w przypadku łączenia stali z aluminium, stali z miedzią czy stali z żeliwem nierzadko wykonawcom dużo problemów i często nie pozwala na wykonanie połączeń o wymaganych wysokich właściwościach użytkowych. Główne trudności przy spawaniu tych materiałów wynikają z ich odmiennego składu chemicznego i struktury, innej temperatury topnienia, przewodności cieplnej i elektrycznej, rozszerzalności cieplnej, wytrzymałości oraz potencjału elektrochemicznego i podatności do utleniania. W trakcie spawania prowadzi to do pojawienia się w złączu spawanym porów i pustek gazowych, pęknięć, braków przetopu i przyklejeń, niestabilnego jarzenia się łuku, utraty swoich pierwotnych właściwości wytrzymałościowych i antykorozyjnych oraz niekorzystnego stanu naprężeń i odkształceń w złączu w czasie procesu

wytwarzania i eksploatacji. Łączenie tradycyjnymi metodami spawania łukowego materiałów różnoimienych lub trudno spawalnych, stosowanych powszechnie w technice, wiąże się z przeprowadzeniem szeregu kosztownych i czasochłonnych zabiegów cieplnych, takich jak: podgrzewanie wstępne przed spawaniem i obróbką cieplną po spawaniu a czasami jest wręcz niemożliwe. Korzystanie z tych materiałów przy zachowaniu wysokich wymagań jakościowych gotowych wyrobów, a także dążenie do zwiększenia wydajności i obniżenia kosztów produkcyjnych procesów spawalniczych, stwarzają konieczność stosowania sposobów, wiążących w sobie cechy odrębnych metod łączenia. W ostatnich latach opracowano kilka odmian tzw. niskoenergetycznych metod łączenia materiałów, do których należy zaliczyć m.in.:

- proces CMT (Cold Metal Transfer), opracowana przez firmę Fronius,
- proces ColdArc, opracowany w niemieckiej firmie EWM Hightec Welding,
- proces ForceArc, opracowany w niemieckiej firmie EWM Hightec Welding,
- proces STT (Surface Tension Transfer, firmy Lincoln Electric),

Dr inż. Artur Czupryński, dr inż. Tomasz Kik, dr hab. inż. Jacek Górka – Politechnika Śląska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: artur.czuprynski@polsl.pl

- proces CBT (Controlled Bridge Transfer), rozwiązanie japońskiej firmy DAIHEN,
- proces MAG - SpeedRoot, opracowane przez firmę LORCH.

Nowe technologie łączenia, zapewniły wyeliminowanie lub zminimalizowanie dotychczas występujących trudności. Większość z wymienionych powyżej metod wykorzystywane są w technice lutowania - połączenia dobrze znanych procesów spawania i lutowania [1-14].

Przebieg i wyniki badań

Celem badań było określenie możliwości łączenia materiałów istotnie różniących się własnościami fizykochemicznymi wykorzystując proces lutowania niskoenerygetycznego CBT (*Control Bridge Transfer*). Na podstawie badań nieniszczących i niszczących ocenione zostały kształt i jakość, oraz własności wytrzymałościowe i plastyczne złączy doczołowych typu miedz - stal nierdzewna austenityczna.

Próby lutowania łukowego CBT wykonano na stanowisku zmechanizowanym wyposażonym w inwertorowe urządzenie spawalnicze DW-300 AC MIG Pulse japońskiej firmy OTC Daihen, przeznaczone do jakościowego, niskoenerygetycznego spawania prądem stałym, przemiennym i pulsacyjnym.

Do wykonania złączy doczołowych użyto blach o wymiarach 3,5x150x100 mm wykonanych z miedzi Cu-ETP (zgodne z PN-EN 1652:1999) oraz stali nierdzewnej austenityczna 1H18N9 (zgodne z PN-EN 10088-2:2007). Skład chemiczny oraz własności wytrzymałościowe materiałów lutowanych przedstawiono w tablicach I i II.

Do prób lutowania użyto drutu elektrodowego litego CastoMag 45706 firmy Castolin, o średnicy 1,0 mm oraz rurko-

wego bezszwowego drutu proszkowego firmy Drahtzug Stein oznaczonego symbolem Mecufil 903 Al, o średnicy 1,2 mm. Drut lity CastoMag 45706 przeznaczony jest do łączenia elementów miedzianych, ze stopów miedzi: Cu-Zn, Cu-Si, blach galwanizowanych cynkiem i aluminium oraz do nakładania powłok na stopy miedzi i metale nieżelazne. Skład chemiczny oraz własności mechaniczne stopiwa CuSi3Mn1 (zgodnie z PN-EN 13347:2004) zostały przedstawione w tablicy III.

Rurkowy bezszwowy drut proszkowy do lutowania Mecufil 903Al to lut reakcyjny na bazie miedzi przeznaczony do lutowania metodami MIG/MAG, TIG oraz PTA. Spoivo odznacza się dobrą przydatnością do lutowania konstrukcji z cienkościennych blach ocynkowanych o R_m do 600 MPa, wysoką odpornością na porowatość przy łączeniu blach z warstwą cynku do 20 μm . Drut można wykorzystać przy zwarciowym i natryskowym przenoszeniu metalu w łuku podczas lutowania łukowego. Mecufil 903 Al znajduje zastosowanie w sektorze blach cienkościennych, przemysle samochodowym, w produkcji karoserii, obudów itp. Skład chemiczny lutu oraz własności mechaniczne zostały przedstawione w tablicy IV.

Każda blacha została przygotowana poprzez ukosowanie krawędzi łączonych na „V”, powierzchnie blach zostały wyczyszczone papierem ściernym oraz odtłuszczone alkoholem etanolowym. Każdorazowo łączone elementy pozycjonowano względem siebie na stole wyposażonym w oprzyrządowanie mocujące, składające się z klamer usztywniających blachy. Dodatkowo, oprzyrządowanie zawierało także podkładkę stalową z wyźłobionym rowkiem, co ograniczało zbytne odprowadzanie ciepła i pozwalało na poprawne formowanie grani lutowanej [3]. Przed przystąpieniem do wykonania złączy, na podstawie wstępnych prób spawalniczych dobrano parametry procesu lutowania, które zostały ujęte w tablicy V.

Tablica I. Skład chemiczny oraz własności mechaniczne miedzi Cu-ETP w stanie R220 (zgodne z PN-EN 1652:1999)

Table I. Chemical composition and mechanical properties of Cu-ETP cooper in R220 condition (according to PN-EN 1652:1999 standards)

Nr wytopu	Skład chemiczny [%]				Własności mechaniczne	
	Cu	Bi	O ₂	Pb	R _m , MPa	A ₅ , %
61	99,98	0,0005	0,008	0,001	239	51,2

Tablica II. Skład chemiczny oraz własności mechaniczne stali austenitycznej 1H18N9 (zgodne z PN-EN 10088-2:2007)

Table II. Chemical composition and mechanical properties of 1H18N9 austenitic stainless steel (according to PN-EN 10088-2:2007 standards)

Skład chemiczny [%]						
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0,12	1,4	1,0	0,045	0,030	17,0÷19,0	8,0÷10,0
Własności mechaniczne						
R _e MPa	R _m min., MPa	A ₅ min. %	Twardość maks., HB		KV min., J	
250	600÷950	40	215		27	

Tablica III. Skład chemiczny oraz własności wytrzymałościowe spoiwa CuSi3Mn1 - CastoMag 45706 (zgodne z PN-EN 13347:2004)

Table III. Chemical composition and mechanical properties of CuSi3Mn1 filler material - CastoMag 45706 (according to PN-EN 13347:2004 standards)

Zawartość składników stopowych [%]					
Cu	Si	Mn	inne		
95,7	2,9	0,9	maks. 0,5		
Własności wytrzymałościowe w temperaturze 20 °C					
Umowna granica plastyczności R _{p0,2} , MPa]	Granica wytrzymałości R _m , MPa	Wydłużenie A ₅ , %	Udarność, J	Twardość, HB	
150	350	40	50	80	

Tablica IV. Skład chemiczny oraz własności wytrzymałościowe spoiwa CuSiMnAl - Mecufil 903 Al (zgodne z normą DIN 1733)
Table IV. Chemical composition and mechanical properties of CuSiMnAl filler material - Mecufil 903 Al (according to DIN 1733 standards)

Zawartość składników stopowych [%]				
Cu	Si	Mn	Al	
baza	2,5	1,0	1,5	
Własności wytrzymałościowe w temperaturze 20 °C				
Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa	Granica wytrzymałości R_m , MPa	Wydłużenie A_5 , %	Udarność, J	Twardość, HB
>360	500	>40	–	–

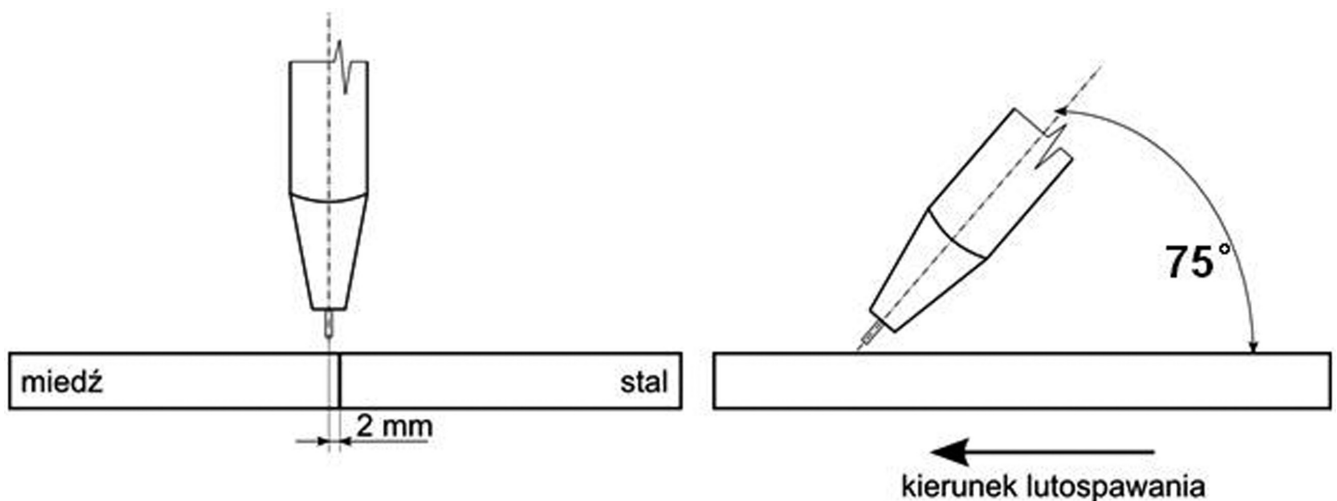
Tablica V. Warunki technologiczne procesu lutowania łukowego metodą CBT
Table V. Technological conditions of CBT arc braze welding process

Parametry procesu lutowania łukowego metodą CBT	
Rodzaj gazu osłonowego	100%Ar
Rodzaj drutu proszkowego	MECUFIL 903 Al, średnica: 1,2 mm
Rodzaj drutu litego	CastoMag 45706, średnica: 1,0 mm
Rodzaj prądu	DC Puls
Prędkość przepływu gazu ochronnego	15 dm ³ /min
Kąt pochylenia palnika	75°
Wolny wylot elektrody	15 mm

Łuk elektryczny przy lutowaniu skierowany był na miedź z przesunięciem ok. 1÷2 mm od krawędzi blachy (rys. 1). Takie ustawienie uchwytu spawalniczego pozwoliło na wprowadzenie większej ilości ciepła do blachy miedzianej i lepsze zwilżenie powierzchni przez lut. Pochylenie uchwytu spawalniczego w stosunku do materiału podstawowego pod kątem 75° ograniczało ilość rozprysków,

zapewniało stabilniejsze przechodzenie kropli metalu do jeziorka oraz pozwalało na uzyskanie płaskiego i gładkiego lica.

Szczegółowe parametry przy których wykonano płyty próbne przedstawiono w tablicy VI, natomiast w tablicy VII ocenę wizualną złączy wraz ze średnimi wymiarami kształtu lica i grani.



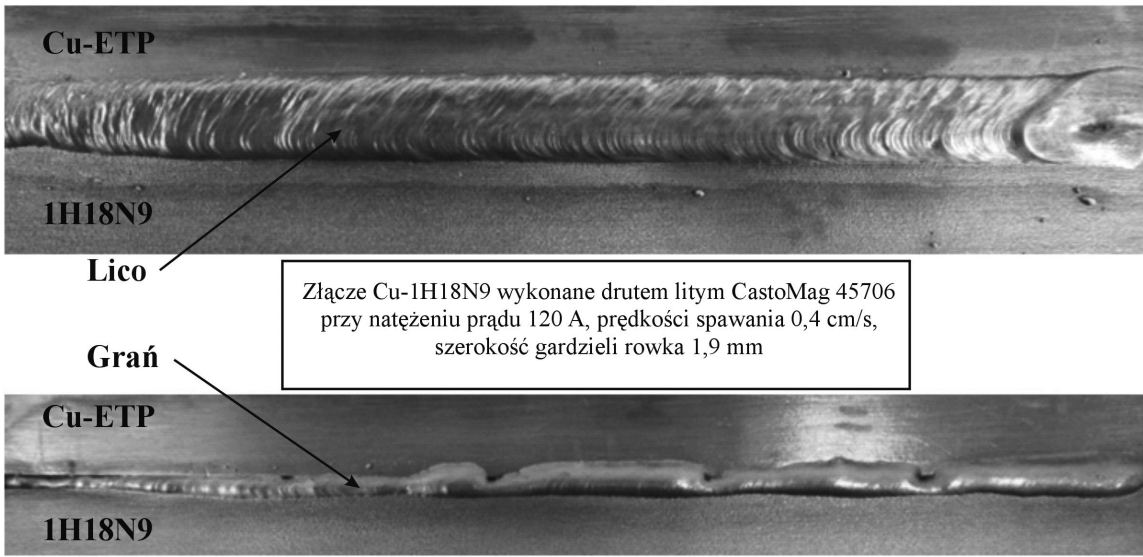
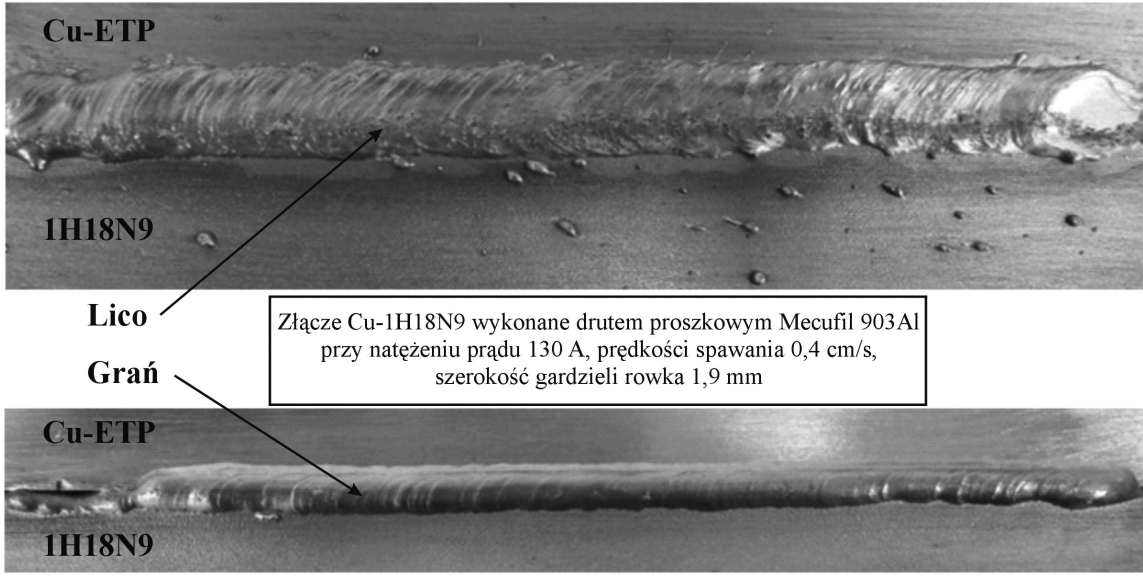
Rys. 1. Pochylenie uchwytu spawalniczego w stosunku do materiału lutowanego w czasie procesu lutowania łukowego metodą CBT
Fig. 1. Angle between welding gun and braze welded material during CBT arc braze welding process

Tablica VI. Parametry procesu lutowania łukowego CBT złączy różnoimiennych
Table VI. Parameters of dissimilar joints CBT arc braze welding process

Rodzaj połączenia Oznaczenie próbki	Rodzaj spoiwa	Natężenie prądu I , [A]	Napięcie łuku U , [V]	Prędkość spawania v [cm/s]	Energia liniowa E [kJ/cm]
Cu-1H18N9 C1	CastoMag 45706	120	20,8	0,4	6,24
Cu-1H18N9 M1	Mecufil 903 Al	130	21,2	0,4	6,89

Uwaga: szerokość gardzieli rowka $b = 1,9$ mm; ustawienie palnika - łuk elektryczny przesunięty o 2 mm w stronę blachy Cu

Tablica VII. Wymiary geometryczne i ocena wizualna złączy różniamiennych wykonanych w procesie lutowania łukowego metodą CBT
Table VII. Geometrical dimensions and visual assessment of CBT arc braze welded dissimilar joints

Oznaczenie próbki	Długość lutowoiny, l [mm]	Lico		Grań	
		Średnia szerokość lica, h_{sr} [mm]	Średnia wysokość nadlewu, b_{sr} [mm]	Średnia szerokość grani, h_{sr} [mm]	Średnia wysokość grani, b_{sr} [mm]
C1					
	122,0	9,1	2,0	3,3	0,5
	Lico: równomierna szerokość i wysokość nadlewu, niewielkie wklęsnięcie w kraterze, niewłaściwe zakończenie krawędzi spoiny. Grań: brak ciągłego wypełnienia rowka spawalniczego spoiwem, niejednorodna wysokość grani.				
M1					
	105,0	11,0	1,3	4,9	0,9
	Lico: równomierna szerokość lutowoiny (poszarpane krawędzie od strony stali), obecność porów powierzchniowych na całej długości, rozpryski po stronie stali. Grań: równomierna grań, łagodne przejście lutowoiny w materiał rodzimy.				

Podczas procesu lutowania nie zaobserwowano odkształceń spawalniczych łączonych blach. W każdym przypadku, na początkowym odcinku złącza, występowało niepełne wypełnienie rowka spawalniczego z uwagi na zbyt szybkie odprowadzanie ciepła przez miedź, a słaba zwilżalność przez spoiwo powodowała jego zbyt wolne wnikanie w głąb szczeliny. Jednak w dalszej części złącza lutowoina wypełniała rowek spawalniczy, grań była równomierna i łagodnie przechodziła do materiału podstawowego. Złącze oznaczone jako próbka C1 charakteryzowało się najbardziej regularnym kształtem lica i grani lutowoiny, bez rozprysków i porowatości powierzchniowej, jednak odznaczało się

nierównomierną szerokością i wysokością grani. W próbce M1 pobranej ze złącza wykonanego drutem proszkowym Mecufil 903 Al, występował znaczny rozprysk, szczególnie po stronie stali nierdzewnej. Niesymetryczny rozprysk był związany ze znaczną różnicą w przewodności cieplnej materiałów: miedzi i stali. Stal nierdzewna wolniej odprowadzała ciepło, dlatego krople ciekłego metalu przyklejały się do powierzchni blach, co nie miało miejsca po stronie blachy miedzianej. Ponadto, w złączach wykonanych drutem proszkowym od strony lica widoczne były pory na całej długości lutowoiny. Mimo zaobserwowanych niezgodności, w złączach nie występowały niezgodności typu pęknięcia,

podtopienia lub głębokie i ciągle niewypełnienie rowka spawalniczego, które zaliczane są do wad niedopuszczalnych, dyskwalifikujących złącza w ich eksploatacji.

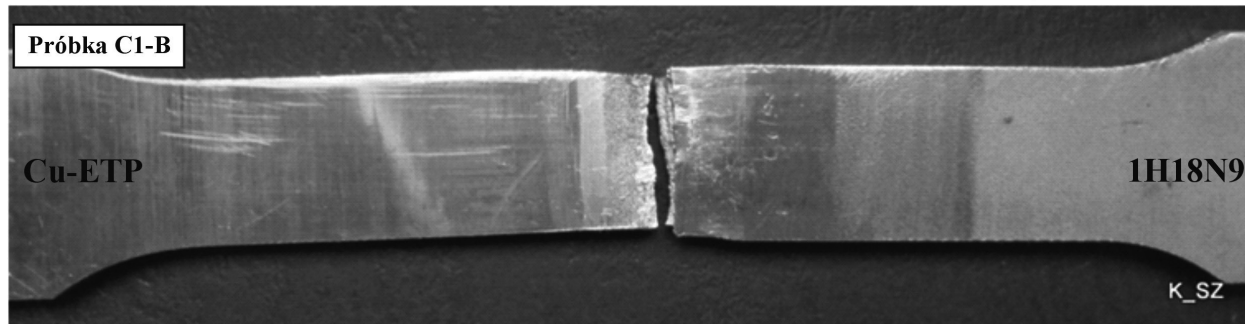
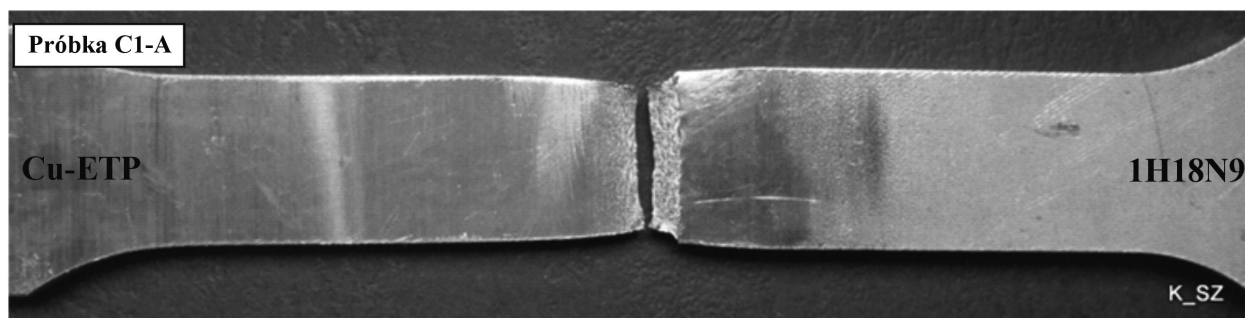
Badania niszczące i mikroskopowe pozwoliły na ocenę właściwości wykonanych połączeń. Zastosowano próbę statycznego rozciągania złączy przeprowadzoną zgodnie z PN-EN ISO 6892-1:2010, próbę zginania poprzecznego złączy z rozciąganiem od strony lica i grani lutospoiny zgodnie

z zaleceniami zawartymi w PN-EN ISO 5173 oraz badania makro i mikroskopowe. Próby statycznego rozciągania złączy doczołowych, w których poprzez obróbkę mechaniczną usunięto nadlew i lico lutospoin, przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej z wykorzystaniem głowicy pomiaru o maksymalnej sile badawczej wynoszącej 100 kN. Wyniki prób rozciągania złączy doczołowych zamieszczono w tablicy VIII.

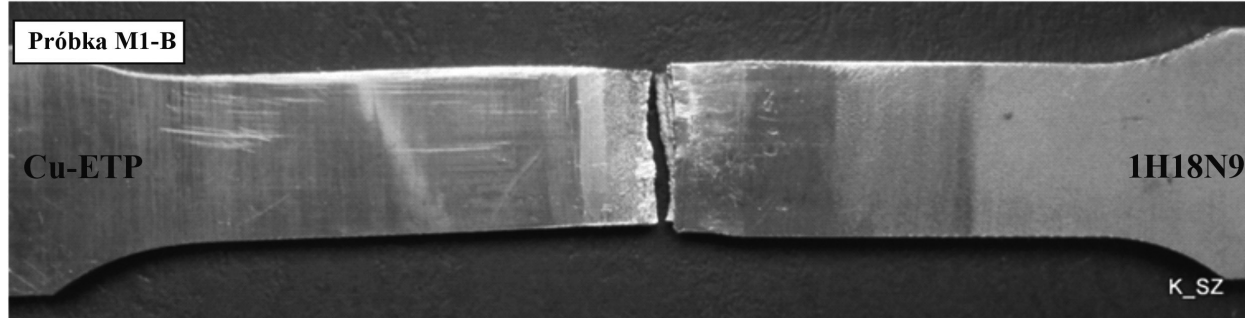
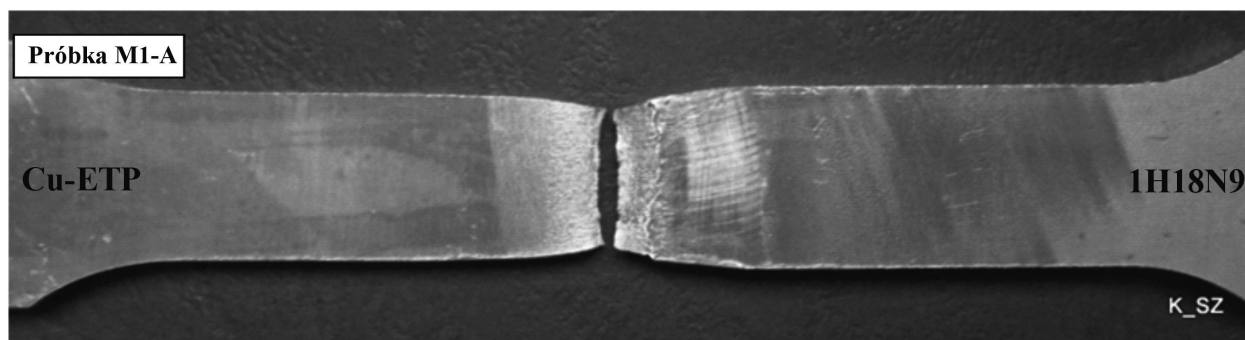
Tablica VIII. Wynik prób statycznego rozciągania próbek pobranych ze złączy doczołowych, różnoimiennych wykonanych w procesie lutowania łukowego metodą CBT

Table VIII. Results of tensile strength tests of CBT arc braze welded dissimilar butt welds

Oznaczenie próbki	Powierzchnia przekroju początkowego próbki, S_0 [mm ²]	Wartość siły max obciążenia, F [kN]	Wytrzymałość na rozciąganie, R_m [N/mm ²]	Miejsce zerwania próbki
C1-A	69,4	15,6	224,8	miedz - zerwanie w SWC
C1-B	78,9	15,2	192,7	miedz - zerwanie wzdłuż lutospoiny



M1-A	68,1	15,7	230,5	miedz - zerwanie w SWC
M1-B	68,5	15,4	224,8	miedz - zerwanie w SWC



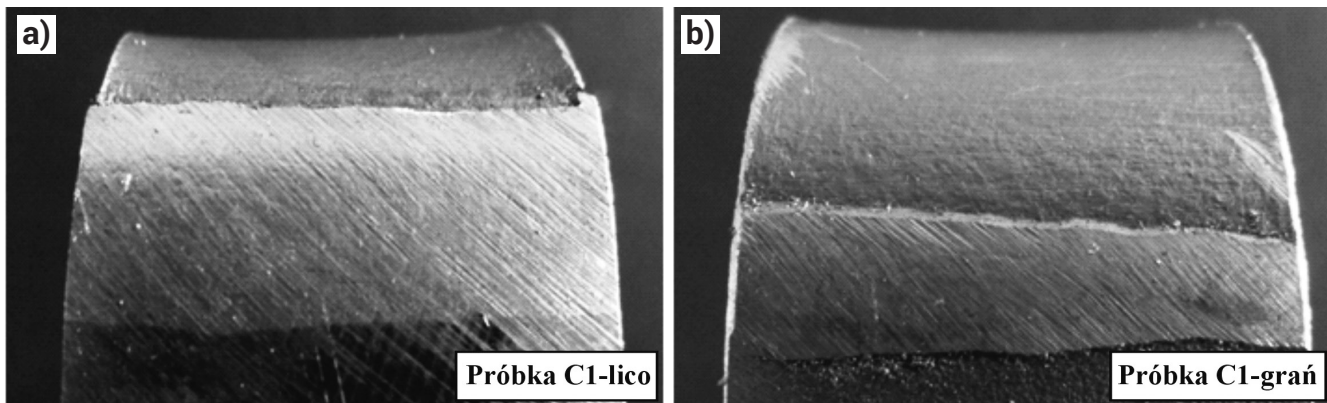
Statyczna próba rozciągania lutowanych łukowo złączy doczołowych różnoimiennych wykazała niższą wytrzymałość mechaniczną połączeń niż wytrzymałość spoiwa (tabl. III i IV). Jednak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie otrzymane wyniki bliskie były wytrzymałości miedzi. W trzech na cztery wykonanych próbach wytrzymałościowych zerwanie nastąpiło po stronie miedzi, w obszarze SWC, a raz w miedzi blisko lutospoiny, gdzie mogło dojść do zmiękczenia miedzi i pogorszenia jej własności wytrzymałościowych. Złącza wykonane drutem litym CastoMag 45706 charakteryzowały się zbliżonymi własnościami do połączeń wykonanych drutem proszkowym Mecufil 903 Al.

Próby zginania poprzecznego z rozciąganiem od strony lica i grani złączy doczołowych różnoimiennych umożliwiły sprawdzenie plastyczności złączy oraz wykrycie możliwych niezgodności powstałych podczas procesu lutowania. Próby zginania przeprowadzono z wykorzystaniem głowicy pomiaru siły 20 kN, używając stołu do zginania z dwoma podporami w postaci równoległych trzpieni o średnicy 20 mm i oddalonych od siebie o 85 mm. Odkształcenia plastycznego próbek dokonała głowica gnąca uzbrojona w element gnący (trzcina gnąca o średnicy $D = 30$ mm). Podczas pracy maszyny próbki, w których wcześniej poprzez obróbkę mechaniczną usunięto nadlew i lico lutospoin, ulegały odkształceniu plastycznemu przez jednokierunkowe zginanie na całej szerokości lutospoiny w sposób powodujący rozciąganie jednej z powierzchni do momentu osiągnięcia pełnego kąta zgięcia (150°) lub pęknięcia próbki. Gięcie każdorazowo występowało po stronie miedzi, zaraz za lutospoiną. Miejsce gięcia było spowodowane dużą plastycznością miedzi, zdecydowanie większą niż plastyczność stali austenitycznej. Nie zaobserwowano pęknięć lub naderwań. Widok próbki po próbie zginania przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Badania metalograficzne przeprowadzono w celu oceny poprawności wykonania złączy w skali makro i mikroskopowej. Stal nierdzewna austenityczna 1H18N9 wytrawiono odczynnikiem Adlera. Miedź i lutospoina zostały wytrawione w odczynniku: $K_2Cu_2O_7 + 100 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O} + 4 \text{ cm}^3 \text{ NaCl} + 8 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{SO}_4$. Zdjęcia makrostruktury złączy wraz z obrazami mikrostruktury przedstawiają obszary materiału rodzimego, SWC, linii przejścia lutospoiny i materiału łączonego, a także obszary, w których pojawiły się pęknięcia i znaczny rozrost ziarna w strukturze (rys. 4 i 5).

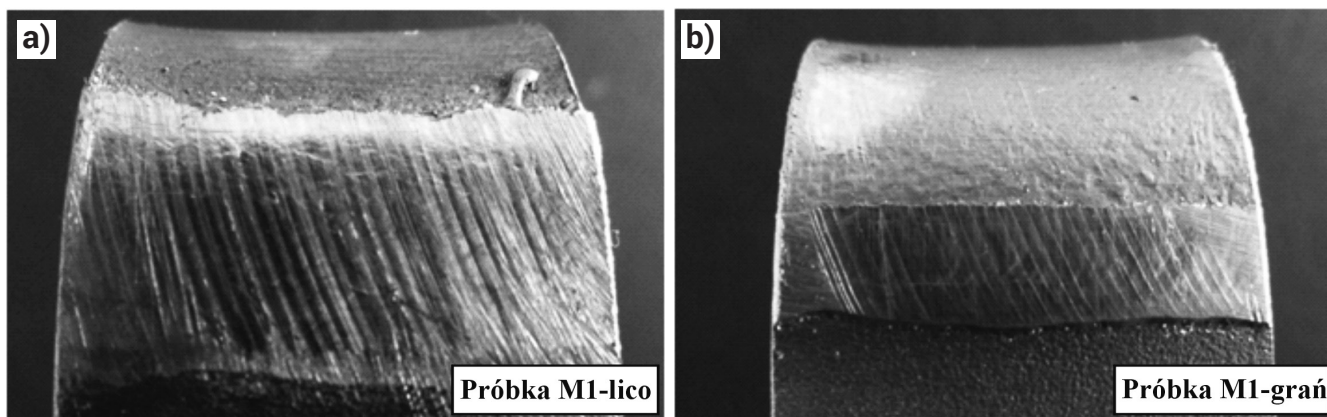
Na podstawie makrostruktury wykonanych złączy stwierdzono niesymetryczną krystalizację lutospoiny spowodowaną różnicą w przewodności cieplnej miedzi i nierdzewnej stali austenitycznej. Po stronie miedzi w każdej lutospoinie widoczne są długie kolumnowe kryształy ułożone równolegle do kierunku odpływu ciepła. Po stronie miedzi występuje krystalizacja epitaksjalna - zarodkami krystalizacji są częściowo roztopione kryształy miedzi w materiale podstawowym. Narastające kryształy w lutospoinie cechują się zachowaną orientacją krystalograficzną. Obrazy makroskopowe wskazują na znaczny rozrost ziaren w blachach miedzianych.

W wyniku badań mikrostrukturalnych złączy różnoimiennych zbadano wpływ wprowadzonego ciepła na strukturę materiałów podstawowych. W przypadku stali nierdzewnej austenitycznej 1H18N9 w obydwu złączach (próbki C1 i M1) nie zaobserwowano znacznego rozrostu ziarna, jednak w blachach na styku powierzchnia górna blachy - lutospoina wystąpiły pęknięcia po granicach ziaren w głąb materiału (rys. 4c i 5f). Mniejszą ilość pęknięć zaobserwowano w próbce M1, złącze Cu-1H18N9, wykonane drutem proszkowym Mecufil 903 Al. W żadnej lutospoinie nie stwierdzono pęknięć, pęcherzy gazowych lub innych wad wewnętrznych.



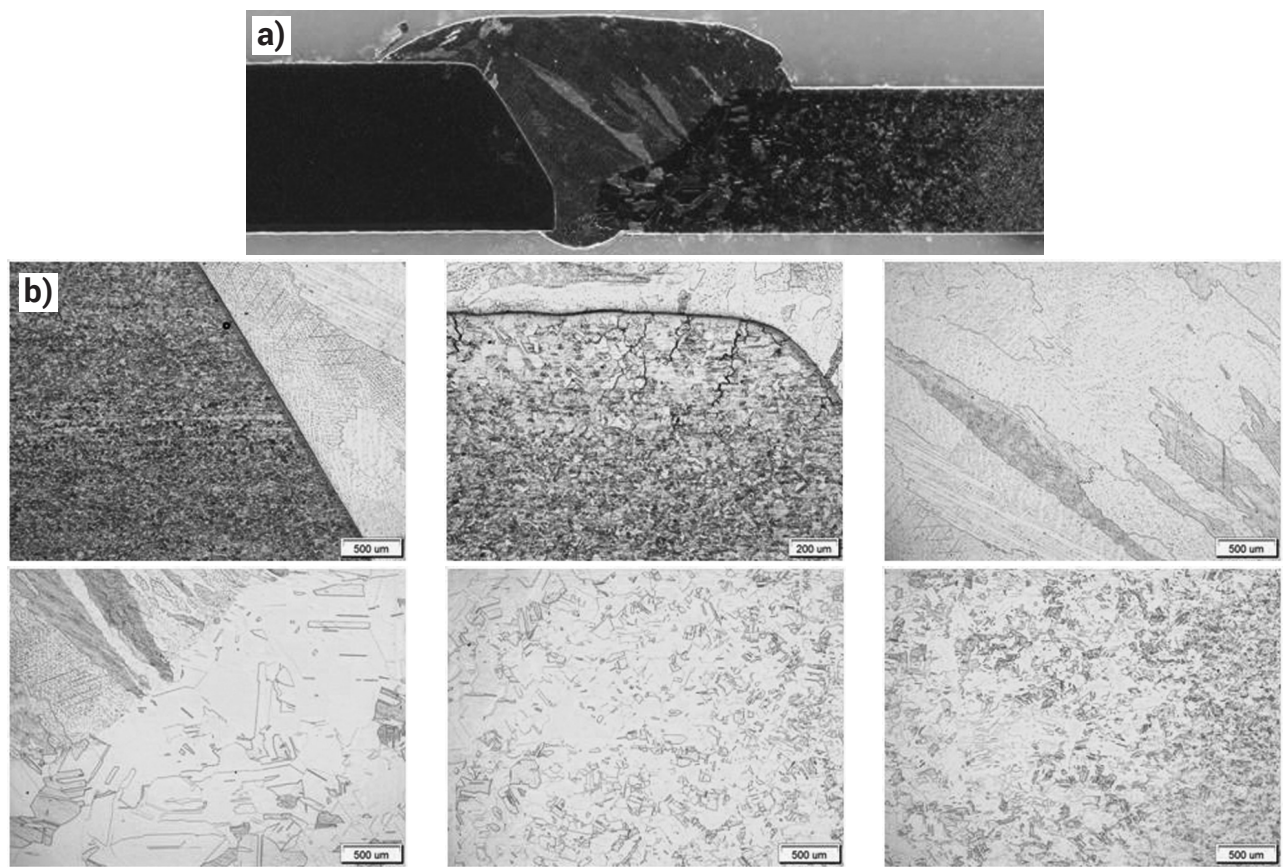
Rys. 2. Próbkę C1 pobrą z lutowanego łukowo metodą CBT złącza doczołowego Cu-1H18N9 po próbie zginania z rozciąganiem poprzecznym: a) lico i b) grań

Fig. 2. A view of C1 specimen from CBT arc braze welded Cu-1H18N9 butt joint after bending test with transverse tensile: a) weld face, b) weld root



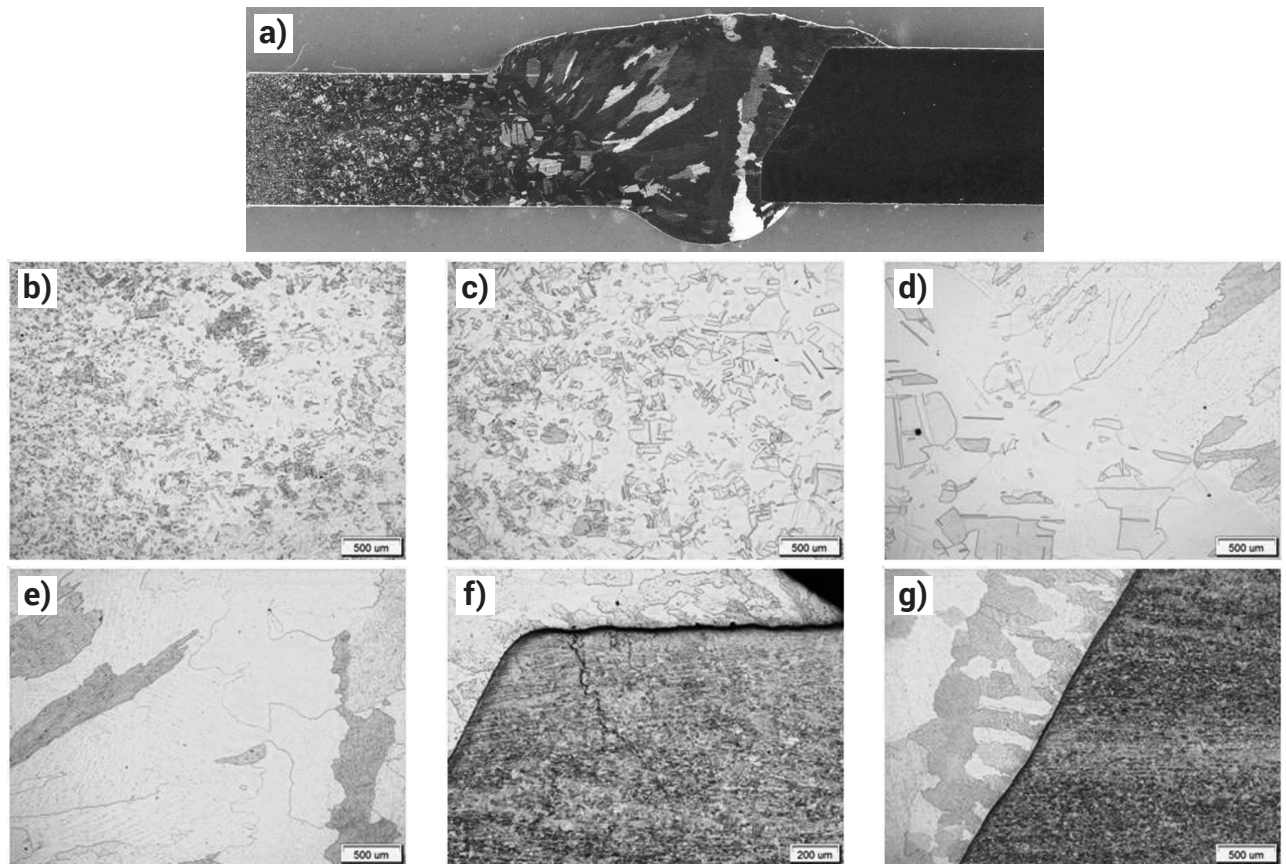
Rys. 3. Próbkę M1 pobrą z lutowanego łukowo metodą CBT złącza doczołowego Cu-1H18N9 po próbie zginania z rozciąganiem poprzecznym: a) lico i b) grań

Fig. 3. A view of M1 specimen from CBT arc braze welded Cu-1H18N9 butt joint after bending test with transverse tensile: a) weld face, b) weld root



Rys. 4. Makrostruktura i mikrostruktura próbki C1 pobranej ze złącza Cu-1H18N9 wykonanego drutem litym CastoMag 45706 (stal po lewej, miedź po prawej stronie): a) makrostruktura złącza; b) mikrostruktura obszaru na styku stal nierdzewna austenityczna - lutospoina; c) mikrostruktura obszaru na styku: stal nierdzewna - lutospoina; d) mikrostruktura lutospoiny; e) mikrostruktura obszaru na styku: lutospoina - miedź; f) mikrostruktura obszaru SWC miedzi; g) mikrostruktura przejścia z SWC do materiału rodzimego miedzi

Fig. 4. A view of macro and microstructure of C1 specimen from Cu-1H18N9 joint brazed with CastoMag 45706 solid wire (steel is on the left, cooper is on the right): a) welded joint macrostructure; b) microstructure of austenitic stainless steel and braze weld contact area; c) microstructure of austenitic steel and braze weld contact area; d) microstructure of braze weld; e) microstructure of contact area between braze weld and cooper; f) microstructure of cooper HAZ; g) microstructure of transition zone from HAZ to base material



Rys. 5. Makrostruktura i mikrostruktura próbki M1 pobranej ze złącza Cu-1H18N9 wykonanego drutem proszkowym Mecufil 903 Al (miedź po lewej, stal po prawej stronie): a) makrostruktura złącza; b) mikrostruktura obszaru materiału rodzimego miedzi; c) mikrostruktura przejścia z materiału rodzimego do SWC miedzi; d) mikrostruktura obszaru na styku: miedź - lutospoina; e) mikrostruktura lutospoiny; f) mikrostruktura obszaru na styku: stal nierdzewna austenityczna - lutospoina; g) mikrostruktura obszaru na styku: lutospoina - stal nierdzewna austenityczna

Fig. 5. A view of macro and microstructure of M1 specimen from Cu-1H18N9 joint brazed with Mecufil 903 Al solid wire (cooper is on the left, steel is on the right): a) welded joint macrostructure; b) microstructure of cooper base material; c) microstructure of transition zone between base material and cooper HAZ; d) microstructure of contact area: cooper - braze weld; e) microstructure of braze weld; f) microstructure of contact area: austenitic stainless steel - braze weld; g) microstructure of contact zone: weld braze - austenitic stainless steel

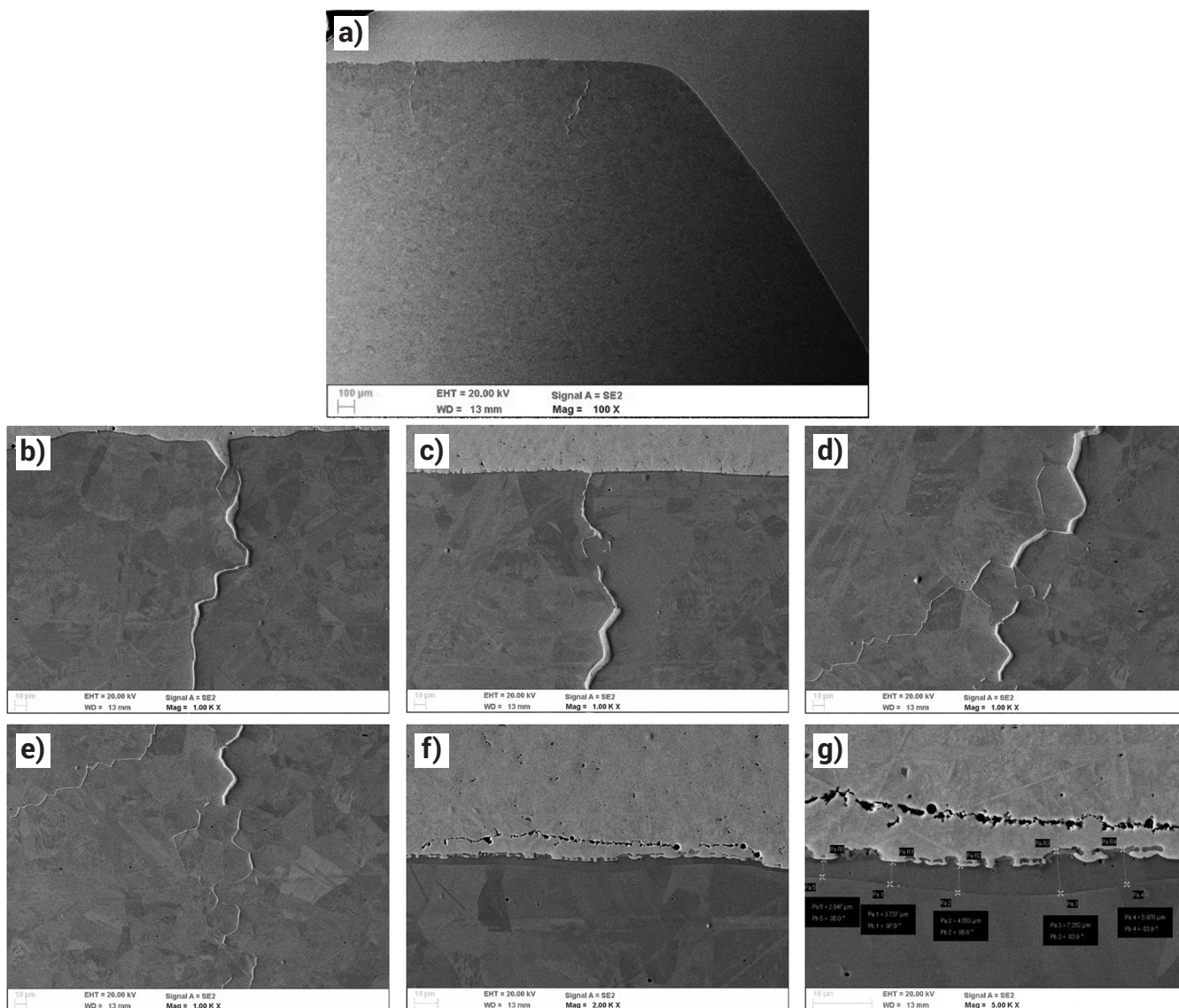
Dokładniejsze badania przeprowadzone na skaningowym mikroskopie elektronowym umożliwiły sprawdzenie charakteru pęknięć w blachach nierdzewnych austenitycznych 1H18N9 złączy różnoimiennych, zmierzenie grubości i ocenę równomierności strefy dyfuzyjnej w badanych złączach. Na obrazie SEM próbki C1 - złącze Cu-1H18N9 wykonane drutem litym CastoMag 45706 - widoczne są pęknięcia o charakterze międzykrystalicznym, usytuowane w SWC, propagujące od powierzchni blachy nierdzewnej do wewnątrz materiału (rys. 6b i 6c).

Zdjęcia przedstawione na rysunkach. 6b oraz 6c wskazują na wnikanie lutospoiny miedzianej w głąb stali austenitycznej. Podczas obserwacji przy większych powiększeniach: x2000 i x5000 stwierdzono obecność nieciągłości w lutospoinie, równoległych do powierzchni blachy stalowej austenitycznej, określonych jako wtrącenia niemetaliczne (rys. 6f i 6g). Podobne pęknięcia w stali austenitycznej zaobserwowano na obrazach SEM próbki M1 pobranej ze złącza Cu-1H18N9 wykonanego drutem

proszkowym Mecufil 903Al (rys. 7b-7e). Lokalizacja pęknięć w próbce M1, miejsce ich rozpoczęcia, a także dalsze rozprzestrzenianie po granicach ziaren są zbieżne z pęknięciami występującymi w próbce C1. W lutospoinie próbki M1 zaobserwowano także nieciągłości równoległe do powierzchni blachy nierdzewnej, jednak zdecydowanie mniejsze niż w próbce C1.

Rysunki 6f i 6g oraz 7f i 7g przedstawiają warstwę dyfuzyjną w stali nierdzewnej austenitycznej, złączy Cu-1H18N9 wykonanych odpowiednio drutem litym CastoMag 45706 (próbka C1) oraz drutem proszkowym Mecufil 903Al (próbka M1), powstałą na skutek zjawiska wzajemnej dyfuzji materiału podstawowego i stopiwa. Grubość warstwy dyfuzyjnej w obu przypadkach była równomierna w całym obszarze styku lutospoiny z nierdzewną stalą austenityczną i wynosiła średnio 4,8918 μm dla próbki C1 oraz 1,6233 μm dla próbki M1. Nie zaobserwowano warstwy dyfuzyjnej po stronie miedzi.

Na podstawie przedstawionych obrazów wykonanych przy dużym powiększeniu wyraźnie widać, że pęknięcia



Rys. 6. Obraz SEM próbki C1 pobranej ze złącza Cu-1H18N9. Widok stali nierdzewnej austenitycznej wraz z lutospoiną wykonaną drutem litym CastoMag 45706: a) obraz ogólny (pow. x100); b) obraz SEM pęknięcia międzykrystalicznego w stali (pow. x1000); c) obraz SEM pęknięcia międzykrystalicznego w stali (pow. x1000); d) propagacja pęknięcia po granicach ziaren austenitu (pow. x1000); e) ciąg dalszy rozprzestrzeniania się pęknięcia po granicach ziaren austenitu (pow. x1000); f) wtrącenia niemetaliczne w lutospoinie po stronie stali, równoległe do powierzchni blachy stalowej (pow. x2000); g) wtrącenia niemetaliczne w lutospoinie, równoległe do powierzchni blachy stalowej oraz widok warstwy dyfuzyjnej w stali (pow. x5000)

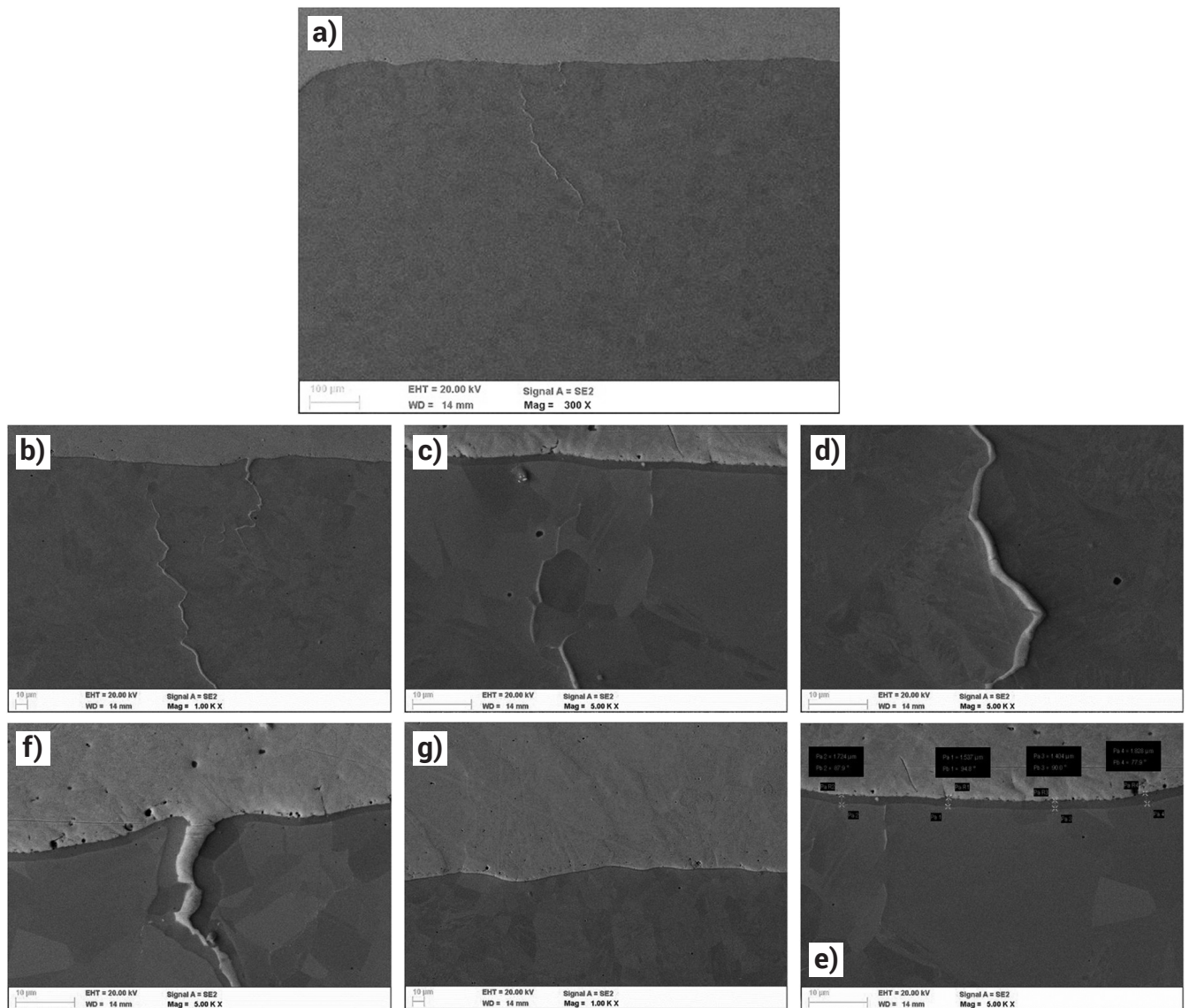
Fig. 6. SEM picture of C1 specimen from Cu-1H18N9 braze welded joint. A view of austenitic stainless steel with braze weld – filler material: CastoMag 45706: a) general picture; b) SEM picture of intercrystalline crack in steel area (magnification x1000); c) SEM picture of intercrystalline crack in steel area (magnification x1000); d) cracks propagation on the austenite grain boundaries (magnification x1000); e) continuation of cracks propagation on the austenite grain boundaries (magnification x1000); f) non-metallic inclusions in braze weld on the steel side, parallel to steel plate surface (magnification x2000); g) non-metallic inclusions in braze weld, parallel to steel plate surface and view of diffusion layer in steel (magnification x5000)

w złączach różniamiennych Cu-1H18N9 wykonanych drutem litym CastoMag 45706 (próbka C1) oraz drutem proszkowym Mecufil 903 Al (próbka M1) mają taki sam charakter. Powstałe pęknięcia zlokalizowane są w obszarze SWC, a ich propagacja powstała po granicach ziaren.

Mechanizm powstawania pęknięć w SWC stali austenitycznej jest wynikiem wspólnego działania ciekłej fazy miedzi na granicach ziaren i odkształceń związanych z procesem skurczu w stali. Podczas lutowania łuk elektryczny skierowany był na blachę miedzianą, jednak ilość wprowadzonego ciepła do stali była stosunkowo duża. W procesie krystalizacji lutospoiny, w stali wystąpiły naprężenia rozciągające (prostopadłe do granic ziaren) intensyfikowane szybszym odprowadzaniem ciepła przez miedź. Powstałe naprężenia ułatwiły zwilżanie granic ziaren ciekłą warstwą cieczy (miedzi i pozostałych składników lutospoiny). Płynne warstewki cieczy osłabiły granice ziaren, ponieważ nie przenoszą odkształceń plastycznych powstałych na skutek chłodzenia. W wyniku chłodzenia, w SWC

powstały nieciągłości o charakterze międzykrystalicznym, które rozprzestrzeniły się w głąb stali (rys. 6 i 7).

Nieciągłości obecne w lutospoinie po stronie stali austenitycznej, usytuowane równoległe do powierzchni blachy, widoczne przy powiększeniach x1000, x2000 i x5000, widoczne na rysunkach 6f i 7f, mają charakter małych wtrąceń niemetalicznych - tlenkowych. Prawdopodobnie przed lutowaniem na powierzchni stali austenitycznej utworzyła się wysokotopliwa warstwa tlenków chromu Cr_2O_3 o $T_t = 2437$ °C. Niedokładne usunięcie warstwy tlenkowej, przyczyniło się do pozostania warstwy pasywnej na powierzchni blachy nierdzewnej. Z uwagi na niskoenergetyczny proces łączenia blach nie doszło do redukcji tlenków, dlatego pozostały w lutospoinie, blisko powierzchni stali austenitycznej. Należy zauważyć, iż po stronie stali zachodzi proces lutowania, przez co wymagana jest dobra zwilżalność i rozplwność lutu na powierzchni blachy, dlatego tak istotne jest odpowiednie i staranne przygotowanie blach.

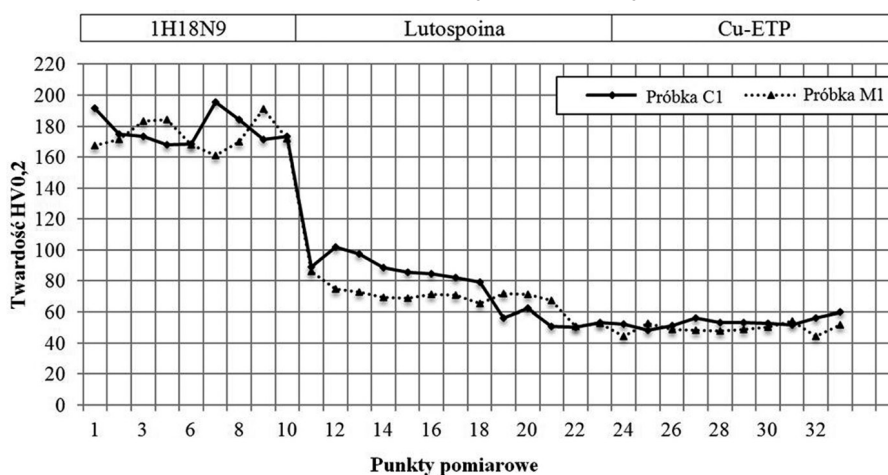


Rys. 7. Obraz SEM próbki M1 pobranej ze złącza Cu-1H18N9. Widok stali nierdzewnej austenitycznej wraz z lutospoiną wykonaną drutem proszkowym Mecufil 903 Al: a) obraz ogólny (pow. x300); b) obraz SEM pęknięć międzykrystalicznych w stali (pow. x1000); c) obraz SEM miejsca rozpoczęcia pęknięcia po granicach ziaren austenitu (pow. x5000); d) propagacja pęknięcia po granicach ziaren austenitu (pow. x5000); e) obraz SEM miejsca rozpoczęcia pęknięcia po granicy ziaren z obecną warstwą dyfuzyjną (pow. x5000); f) wtrącenia niemetaliczne w lutospoinie, równoległe do powierzchni blachy stalowej (pow. x1000); g) wtrącenia niemetaliczne w lutospoinie, równoległe do powierzchni blachy stalowej oraz widok warstwy dyfuzyjnej w stali (pow. x5000)

Fig. 7. SEM picture of M1 specimen from Cu-1H18N9 braze welded joint. A view of austenitic stainless steel with braze weld – filler material: cored wire Mecufil 903 Al: a) general picture (magnification x300); b) SEM picture of intercrystalline crack in steel area (magnification x1000); c) SEM picture of intercrystalline crack initiation area on austenite grains boundaries (magnification x5000); d) cracks propagation on the austenite grains boundaries (magnification x5000); e) SEM picture of cracks initiation area on the austenite grains boundaries with diffusion layer (magnification x5000); f) non-metallic inclusions in braze weld on the steel side, parallel to steel plate surface (magnification x1000); g) non-metallic inclusions in braze weld, parallel to steel plate surface and view of diffusion layer in steel (magnification x5000)

Próbie twardości wykonanych złączy przeprowadzono sposobem Vickersa zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1 na zglądach metalograficznych, które wcześniej posłużyły do badań makro- i mikrostrukturalnych. Pomiar twardości na przekroju poprzecznym wykonano w jednej linii pomiarowej dokonując pomiarów w materiale rodzimym, strefie wpływu ciepła oraz lutospoinie, przy zadanym obciążeniu $HV_{0,2}$. Pomimo, iż w procesie lutospawania zastosowano niskie wartości natężenia prądu, tabl. 6, można zaobserwować zmianę twardości w materiałach podstawowych, jakimi były miedź oraz stal nierdzewna austenityczna. Różnice wynikały z obecności strefy wpływu ciepła w tychże materiałach. W miedzi w SWC zaznaczył się nieznaczny spadek twardości i tym samym gorsze własności wytrzymałościowe. Uzyskana twardość stali nierdzewnej austenitycznej 1H18N9 w strefie niezmiętej wynosiła ok. 170 $HV_{0,2}$. W miarę zbliżania się do lutospoiny twardość początkowo nieznacznie spadała do wartości ok.

160 $HV_{0,2}$ jednak na styku blachy i lutospoiny twardość ponownie uzyskiwała wartości na poziomie materiału rodzimego. Zaobserwowano znaczne różnice w twardości na styku obszarów lutospoiny i stali nierdzewnej, wynoszące ok. 90 $HV_{0,2}$. W każdym złączy lutospoina charakteryzowała się prawie niezmienną twardością, mimo asymetrycznej budowy krystalograficznej. Na rys. 8 zestawiono wyniki pomiarów twardości złączy typu Cu-H18N9 (próbki C1 i M1), wykonanych odpowiednio drutem litym CastoMag 45706 i proszkowym drutem Mecufil 903Al. Na podstawie wyników badania twardości porównano średnią twardość lutospoiny wykonanej drutem litym CastoMag 45706 (próbki C1 i M1) oraz twardość lutospoiny wykonanej z użyciem drutu proszkowego Mecufil 903Al. Średnia twardość stopiwa CastoMag 45706 wynosiła 83,1 $HV_{0,2}$, natomiast stopiwa Mecufil 903Al wynosiła 88,6 $HV_{0,2}$, co świadczy o zbliżonych własnościach wytrzymałościowych stosowanych materiałów dodatkowych.



Rys. 8. Zestawienie twardości złączy różnoimiennych Cu-1H18N9, wykonanych drutem litym CastoMag 45706 (próbka C1) oraz drutem proszkowym Mecufil 903Al (próbka M1)

Fig. 8. Hardness overview of dissimilar joints Cu-1H18N9 with CastoMag 45706 filler material (C1 specimen) and Mecufil 903Al cored wire (M1 specimen)

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań lutospawanych łukowo metodą CBT złączy różnoimiennych oraz analizy otrzymanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Niskoenergetyczny proces lutospawania łukowego metodą CBT umożliwia uzyskanie dobrej jakości połączenia różnoimiennego typu miedź - stal 1H18N9 w zakresie optymalnych parametrów technologicznych.
2. Podczas lutospawania miedzi ze stalą austenityczną wystąpiły jednocześnie zjawisko zwilżenia i wzajemnej dyfuzji składników blachy stalowej i lutospoiny oraz nieznacznego stapiania bez zjawisk dyfuzyjnych po stronie blachy miedzianej.
3. W celu zapewnienia odpowiedniej jakości złączy różnoimiennych typu miedź - stal austenityczna istotne jest odpowiednie przygotowanie blach do procesu łączenia polegające na oczyszczeniu mechanicznym i odtłuszczeniu brzegów, dzięki czemu uniknie się warstw tlenkowych w lutospoinie.
4. Złącza lutospawane z zastosowaniem drutu litego CastoMag 45706 z uwagi na znacznie mniejszą ilość rozprysków oraz brak porów powierzchniowych na licu lutospoiny spełniają wyższe kryteria jakościowe niż złącza wykonane drutem proszkowym Mecufil 903Al.
5. Miarą wytrzymałości statycznej złączy różnoimiennych miedź - stal austenityczna jest granica wytrzymałości miedzi w SWC, przez co pęknięcia międzykrystaliczne w stali 1H18N9 nie odgrywają istotnej roli w późniejszej eksploatacji złączy.

Literatura

- [1] Gawrysiuk W.: Technologia lutowania łukowego. Zalecenia technologiczne i przemysłowe przykłady zastosowania, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 3 (2005), s. 35-40.
- [2] Różański M.: Nowoczesne metody lutowania, Przegląd Spawalnictwa 9 (2010), s. 24-28.
- [3] Kudła K., Wojsyk K.: Czy sposób doprowadzania ciepła ma istotny wpływ na geometrię spoin?, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 5 (2012), s. 140-144.
- [4] Gawrysiuk W., Pfeifer T., Winiowski A.: Charakterystyka Technologii lutowania łukowego MIG/MAG, Przegląd Spawalnictwa 2-3 (2005), s. 17-20.
- [5] Białucki P., Ambroziak A., Derlukiewicz W., Lange A., Bednarek T.: Wpływ lutowania łukowego na właściwości złączy stali ocynkowanej ogniowo, Przegląd Spawalnictwa 9 (2013), s. 20-28.
- [6] Matusiak J., Czworonóg B., Pfeifer T.: Nowe procesy spawania MIG/MAG o małej energii łuku w aspekcie ograniczenia emisji zanieczyszczeń, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 5 (2007), s. 49-55.
- [7] 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), s. 41-46.
- [8] Bruckner J.: Metoda CMT – Rewolucja w technologii spawania, Przegląd Spawalnictwa 7-8 (2009), s. 24-28.
- [9] Matusiak J., Czworonóg B.: Niskoenergetyczne procesy spawania łukowego w osłonie gazów do łączenia cienkich blach stalowych, Hutnik - Wiadomości Hutnicze 1 (2008), s. 10-16.
- [10] De Dompablo M.: Nowe rozwiązania w technologii spawania ColdArc i forceArc, Przegląd Spawalnictwa 7-8 (2009), s. 12-17.
- [11] Różański M., Gawrysiuk W.: Lutowanie MIG/MAG blach ocynkowanych i przykłady trudno spawalnych układów materiałowych, Przegląd Spawalnictwa 9 (2007), s. 7-12.
- [12] Mirski Z., Granat K., Winiowski A., Bulica A.: Porównanie metod spajania miedzi ze stalą austenityczną, Inżynieria Materiałowa 3 (2006), s. 205-208.
- [13] Klimpel A., Czupryński A., Górka J., Kik T., Dratwa D.: Badania technologii automatycznego lutowania PTA złączy absorbera kolektorów słonecznych, Przegląd Spawalnictwa 4 (2008), s. 11-16.
- [14] Klimpel A., Górka J., Czupryński A., Kik T., Dadak R.: Badania technologii automatycznego lutowania miękkiego GTA elementów kolektora słonecznego, Przegląd Spawalnictwa 12 (2008), s. 3-8.