

Zastosowanie niskoenergetycznego procesu CMT do lutowania złączy miedź – stal kwasoodporna w różnych osłonach gazowych

The application of low heat input CMT process in braze welding copper – high-alloy steel joints in various shielding gases

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę związaną z wykonaniem połączeń lutowanych miedzi ze stalą kwasoodporną o strukturze austenitycznej. Złącza wykonane zostały niskoenergetyczną metodą CMT oraz MIG łukiem pulsującym na zrobotyzowanym stanowisku przy zastosowaniu osłony gazowej argonu oraz helu. Przedstawiono wyniki badań wizualnych, metalograficznych oraz wytrzymałościowych. Na ich podstawie stwierdzono, iż proces CMT pozwala na wytworzenie złączy o wysokiej jakości, przy dostarczeniu niższej energii cieplnej niż metody klasyczne.

Słowa kluczowe: lutowanie; złącza różnoimienne; niskoenergetyczne metody spawania; metoda CMT

Abstract

Within the scope of this article, the issue of creating braze-weld joints of copper and high alloy steel is discussed in detail. The joints were made by using a low-energy CMT welding method and MIG with pulsing arc on a robotized set-up in argon and helium shielding. The results of visual, metallographic and strength test are presented. Based on them, it has been concluded that the CMT process allows for creating high quality joints, while requiring a lower heat input.

Keywords: braze welding; dissimilar joints; low heat input welding methods; CMT method

Wstęp

Rozwiązania stosowane w nowoczesnym przemyśle motoryzacyjnym czy elektrycznym, wymagają często łączenia ze sobą technologiami spawalniczymi różnoimiennych, najczęściej cienkościennych materiałów konstrukcyjnych. Dążenie do redukcji masy, która przekłada się na większą ekonomiczność czy ekologiczność konstrukcji, wymaga łączenia ze sobą materiałów o znacznych różnicach właściwości fizykochemicznych jak np. temperatura topnienia, rozszerzalność czy przewodność cieplna. Znacznie utrudnia to opracowanie procesu spajania umożliwiającego wykonanie złączy o wymaganej jakości.

Z tego właśnie powodu przedmiotem ciągłych badań są technologie spawalnicze takie jak lutowanie, które pozwala na łączenie znacznie szerszej gamy materiałów, niż klasyczne spawanie łukowe. Dodatkowo zauważalny jest znaczny rozwój niskoenergetycznych metod łączenia materiałów, które umożliwiają dokładniejszą kontrolę nad ciepłem wprowadzonym do złącza. Do metod tych zaliczyć można: STT firmy Lincoln Electric, CBT firmy Daihen czy przedstawiona w niniejszym artykule metoda CMT – firmy Fronius [1÷4].

Metoda spawania CMT (z ang. *Cold Metal Transfer*) jest odmianą procesu GMAW (z ang. *Gas Metal Arc Welding*), polegającą na spawaniu łukiem zwarciovym z technologią mechanicznego oddzielenia kropli metalu od końca drutu elektrodowego. W klasycznej metodzie spawania GMAW łukiem zwarciovym, kropla przechodzi do jeziora wskutek wzrostu natężenia prądu zwarcia, który rozrywa przewężenie ciekłego metalu, powodując wprowadzenie dodatkowego ciepła do złącza. W przypadku metody CMT, w momencie wystąpienia zwarcia układ sterujący podawaniem drutu doprowadza do jego cofnięcia, co skutkuje mechanicznym zerwaniem przewężenia. Umożliwia to zmniejszenie energii liniowej spawania, znaczne zmniejszenie ilości występującego rozprysku oraz poprawę estetyki złącza w porównaniu do spawania łukiem zwarciovym [1,3].

Połączenia miedź – stal austenityczna znalazły zastosowanie w budowie urządzeń chłodniczych oraz uzwojeń stojanów generatorów dużej mocy. Możliwe jest ich łączenie metodami lutowania twardego z użyciem topników lub w próżni, metodami zgrzewania tarciovego i metodami o dużej

dr inż. Tomasz Wojdat, dr inż. Paweł Kustroń, inż. Filip Skuratowicz, Piotr Michalak, Patrycja Piotrowska – Politechnika Wroclawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: tomasz.wojdat@pwr.edu.pl

koncentracji energii (spawanie laserowe lub wiązką elektro-
nów). Dobre rezultaty można uzyskać przy zastosowaniu
metody TIG [5] lub niskoenergetycznych metod jak CBT [3].
Znaczącymi problemami w łączeniu stali austenitycznej
z miedzą jest ich duża różnica w temperaturze topnienia
oraz przewodności cieplnej.

Przebieg i wyniki badań

Celem badań było określenie przydatności zastosowania
metody CMT do lutowania materiałów różnoimiennych.
Otrzymane złącza zostały poddane badaniom nieniszczą-
cym oraz niszczącym, w wyniku których oceniona została
ich jakość oraz właściwości wytrzymałościowe. Wyniki ba-
dań zostały porównane z wynikami uzyskanymi dla złącza
wykonanych klasyczną metodą MIG Puls. Lutowanie zo-
stało przeprowadzone w osłonie argonu lub helu.

Próby lutowania przeprowadzono na zrobotyzowanym
stanowisku spawalniczym przedstawionym na rysunku 1,
składającym się z: inwerterowego źródła prądu TransPuls
Synergic 3200 CMT firmy Fronius, podajnika drutu VR 7000-
CMT 4R/G/W/F++ oraz robota Kawasaki serii BA z zamonto-
wanym uchwytem spawalniczym Robacta Drive CMT PAP W.

Do wykonania złączy próbnych użyto blach miedzianych
gat. Cu-ETP w stanie miękkim R220 (wg PN-EN 1625:1999)
o wymiarach 2,0 x 250 x 100 oraz blach ze stali kwasoodpor-
nej austenitycznej X5CrNi18-10 (wg PN-EN 10088-2:2014)
o wymiarach 2,0 x 250 x 100 i 1,0 x 250 x 100. Skład che-
miczny oraz właściwości wybranych materiałów przedsta-
wiono w tablicy I oraz tablicy II.

Jako materiał dodatkowy do lutowania zastosowa-
no spoiwo na bazie miedzi CuSi3Mn1 o średnicy 1,0 mm.
Jego skład chemiczny wraz z własnościami mechanicznymi
przedstawiono w tablicy III.

W ramach badań założone zostało wykonanie złączy do-
czołowych oraz zakładkowych. Złącza doczołowe wykonane
zostały z blach o grubości 2 mm, złącza zakładkowe z blach
miedzianych o grubości 2 mm oraz blach ze stali kwasood-
pornej o grubości 1 mm. Z racji grubości blach wynoszącej
2 mm, krawędzie blach przeznaczone na złącza doczołowe
nie zostały ukosowane. Powierzchnia blach została wy-
czyszczona włókniną stalową i odtłuszczona. Blachy zostały



Rys. 1. Stanowisko badawcze do spawania metodą CMT
Fig. 1. The test set-up for CMT welding

zamocowane na stole, za pomocą ścisków spawalniczych.
Przed właściwym procesem wykonania złączy, wykonane
zostały wstępne próby lutowania. Na ich podstawie
dobrane zostały parametry procesu lutowania użyte
do wykonania złączy do dalszych badań. Drut spawalniczy
przesunięty został 2 mm w kierunku miedzi, w celu wpro-
wadzania większej ilości ciepła do materiału o znacznie
większej przewodności cieplnej niż stal austenityczna.
Uchwyty spawalnicze pochylono pod kątem 15° w kierunku
przeciwnym do kierunku lutowania, długość wolnego
wylotu drutu wynosiła 12 mm. Wykonano 4 doczołowe
złącza próbne: metodą CMT w osłonie argonu oznaczone
jako CMT Ar, metodą CMT w osłonie helu oznaczone jako
CMT He oraz metodą MIG łukiem pulsującym w osłonie
tych samych gazów oznaczone jako Puls Ar oraz Puls He.
Wykonane zostały również 2 zakładkowe złącza próbne,
lutowane metodą CMT w osłonie argonu i helu ozna-
czone kolejno jako CMT Ar Z oraz CMT He Z. Parametry
wykonania złączy próbnych przedstawiono w tablicy IV.

Tablica I. Skład chemiczny i właściwości miedzi Cu-ETP w stanie R220 [6]

Table I. Chemical composition and properties of Cu-ETP in R220 condition [6]

Oznaczenie	Skład chemiczny [% wag.]					Temperatura topnienia [°C]	Wytrzymałość na rozciąganie R _m [MPa]	Wydłużenie względne A ₅₀ [%]
	Cu	Bi	O	Pb	Inne			
Cu-ETP	reszta	0,0005	0,04	0,005	0,03	1085	min. 220÷260	min. 33

Tablica II. Skład chemiczny i właściwości stali austenitycznej X5CrNi18-10 [7]

Table II. Chemical composition and properties of austenitic steel X5CrNi18-10 [7]

Oznaczenie	Skład chemiczny [% wag.]						Temperatura topnienia [°C]	Wytrzymałość na rozciąganie R _m [MPa]	Wydłużenie względne A ₅₀ [%]
	Fe	C	Cr	Ni	Si	Mn			
X5CrNi18-10	reszta	0,07	17,5÷19,5	8,0÷10,5	1,0	2,0	1455	540÷750	min. 45

Tablica III. Skład chemiczny oraz własności wytrzymałościowe spoiwa CuSi3Mn1 [8]

Table III. Chemical composition and mechanical properties of CuSi3Mn1 filler material [8]

Spoiwo	Skład chemiczny				Temperatura topnienia [°C]	Umowna granica plastyczności R _{p0,2} [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R _m [MPa]	Wydłużenie względne A ₅ [%]
	Cu	Si	Mn	Inne				
CuSi3Mn1	reszta	2,9	0,9	maks. 0,5	970	150	350	40

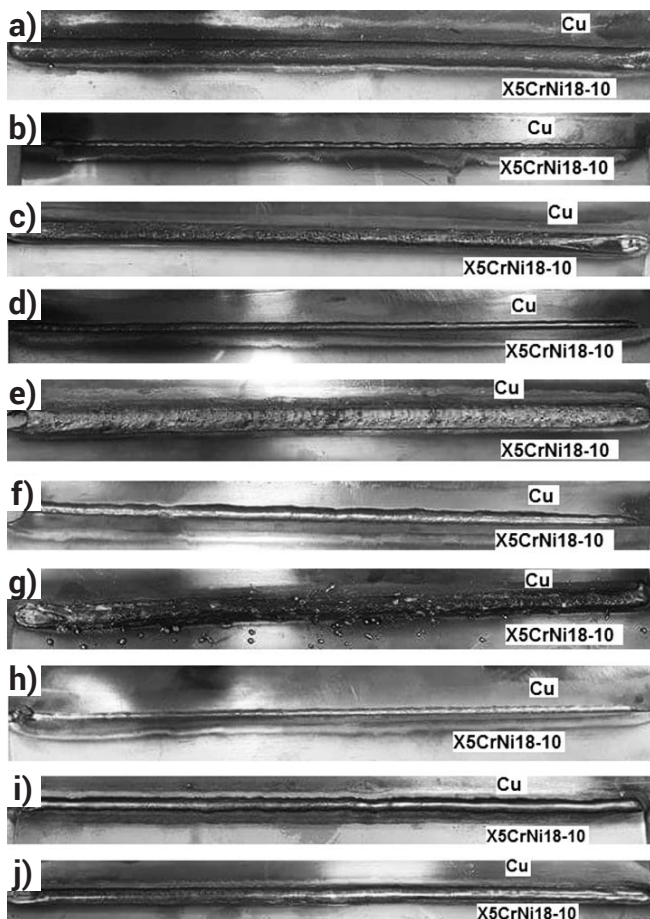
Na rysunku 2 przedstawiono widok lica oraz grani poszczególnych złączy lutospawanych.

W przypadku CMT Ar, CMT He, Puls Ar, CMT Ar Z oraz CMT He Z uzyskane zostały złącza o zadowalającym wyglądzie zewnętrznym i bez widocznych niezgodności zewnętrznych. Złącze Puls He charakteryzowało się nierównym licem oraz znacznym rozpryskiem, a w obszarze grani zauważony został brak zwilżenia stali austenitycznej o długości $l = 35$ mm w połowie długości złącza. Nie zostały zauważone nadtopienia materiału stali austenitycznej.

Tablica IV. Parametry procesu lutospawania

Table IV. Parameters of arc braze welding process

Oznaczenie próbki	Natężenie prądu I [A]	Napięcie łuku U [V]	Prędkość spawania [cm/min]	Energia liniowa [kJ/cm]
CMT Ar	170	12	55	1,78
CMT He	143	16	60	1,83
Puls Ar	179	20	55	3,12
Puls He	146	22	60	2,57
CMT Ar Z	140	12	60	1,34
CMT He Z	128	16	80	1,23



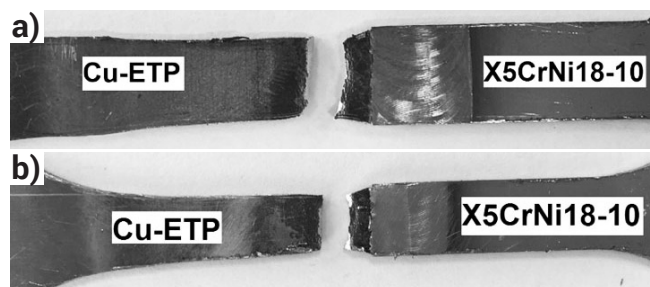
Rys. 2. Lutospawane złącza próbne: a) lico lutospoiny CMT Ar; b) grań lutospoiny CMT Ar; c) lico lutospoiny CMT He; d) grań lutospoiny CMT He; e) lico lutospoiny Puls Ar; f) grań lutospoiny Puls Ar; g) lico lutospoiny Pulse He; h) grań lutospoiny Pulse He; i) lico lutospoiny CMT Ar Z; j) lico lutospoiny CMT He Z

Fig. 2. The view of test braze-welded joints: a) face of braze weld CMT Ar; b) root of braze weld CMT Ar; c) face of braze weld CMT He; d) root of braze weld CMT He; e) face of braze weld Puls Ar; f) root of braze weld Puls Ar; g) face of braze weld Puls He; h) root of braze weld Puls He; i) face of braze weld CMT Ar Z; j) face of braze weld CMT He Z

Statyczna próba rozciągania

Statyczną próbę rozciągania lutospawanych złączy doczołowych wykonano na maszynie wytrzymałościowej Louis Schopper. Prędkość posuwu belki poprzecznej wynosiła 0,2 cm/min, zakres pomiarowy do 10 kN. Próbkę do badań wytrzymałościowych wykonane zostały zgodnie z PN-EN ISO 4136:2013 [9]. Z każdego złącza pobranych zostało 5 próbek.

Średnia wytrzymałość złączy wykonanych metodami CMT i MIG Puls w osłonie Ar i He przy użyciu spoiwa CuSi3Mn1 wyniosła w zakresie 217÷223 MPa, w zależności od złącza. Niezależnie od zastosowanej metody czy gazu osłonowego wyniki cechowała niewielka zmienność, różnice między skrajnymi wynikami nie przekraczały 10 MPa. Do przełomów dochodziło w obszarze SWC miedzi (rys. 3). Wytrzymałość otrzymanych złączy jest zbliżona do wytrzymałości użytej miedzi (tabl. I).

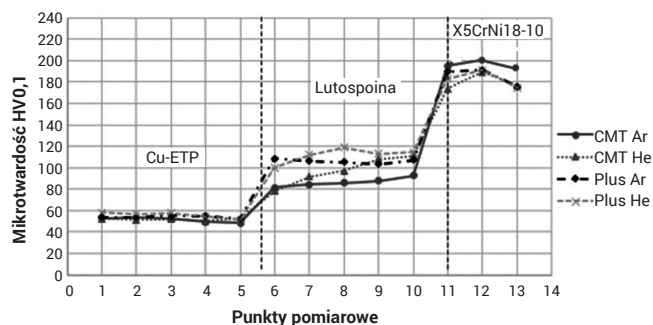


Rys. 3. Przykładowe przełomy złączy lutospawanych po próbie rozciągania: a) przełom w SWC miedzi, CMT He oraz b) przełom w SWC miedzi, CMT Ar

Fig. 3. Exemplary fractures of braze welded joints after tensile test: a) fracture in copper's HAZ, CMT He and b) fracture in copper's HAZ, CMT Ar

Pomiary mikrotwardości

Pomiary mikrotwardości wykonane zostały na przygotowanych zgładach metalograficznych metodą Vickersa przy obciążeniu 0,1 kG. Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano twardościomierz HVS-1000 firmy Sinowon. Pomiary mikrotwardości przeprowadzono w dwóch liniach: pierwszej w odległości podwójnej przekątnej próbnego odcisku od górnej krawędzi blachy oraz drugiej w tej samej odległości od dolnej krawędzi blachy. Wykonano 13 pomiarów mikrotwardości w każdej linii, pomiary 1÷5 wykonane zostały w miedzi, pomiary 6÷10 w obszarze lutospoiny a pomiary 11÷13 w obszarze stali austenitycznej. Wyniki pomiarów zostały uśrednione, celem uzyskania miarodajniejszego rozkładu mikrotwardości na długości próbki. Na rysunku 4 zestawiono wyniki pomiarów mikrotwardości dla każdej z próbek.



Rys. 4. Zestawienie pomiarów mikrotwardości złączy Cu-ETP - X5CrNi18-10 dla poszczególnych metod lutospawania i gazów osłonowych

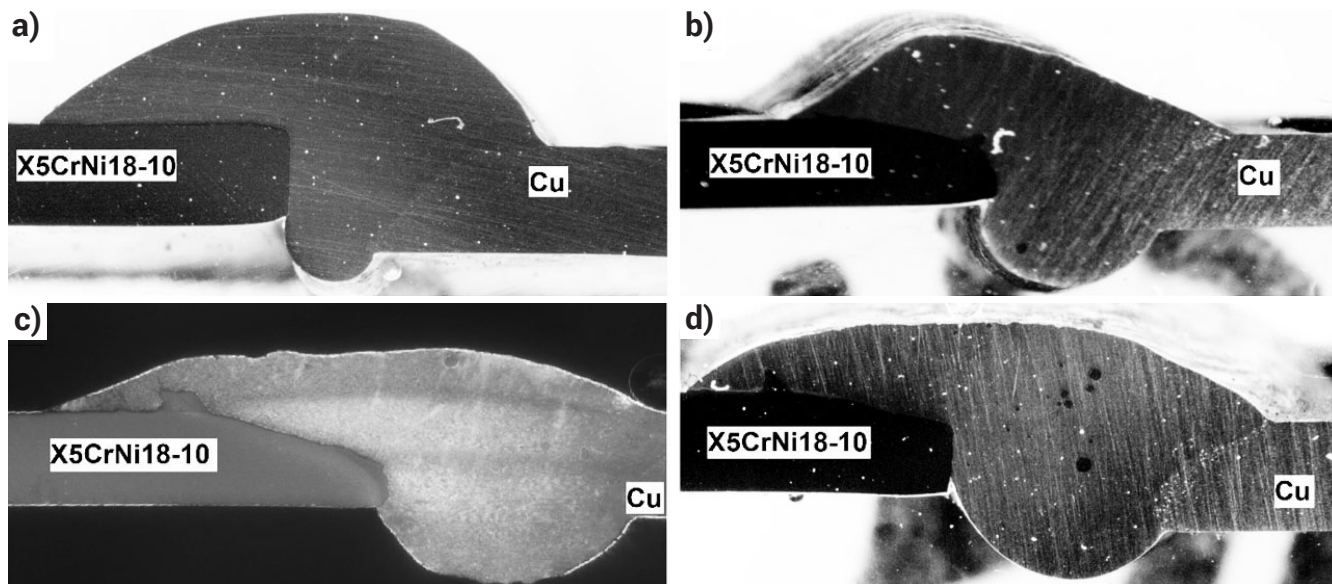
W obszarze lutospoiny zaobserwowane zostały różnice w mikrotwardości między poszczególnymi złączami, dochodzące do 40 HV0,1. Ich przyczyną może być niejednorodna struktura lutospoiny, spowodowana wtrąceniami pochodzącymi z nadtopionej stali kwasoodpornej, co skutkuje zwiększeniem mikrotwardości.

Badania metalograficzne

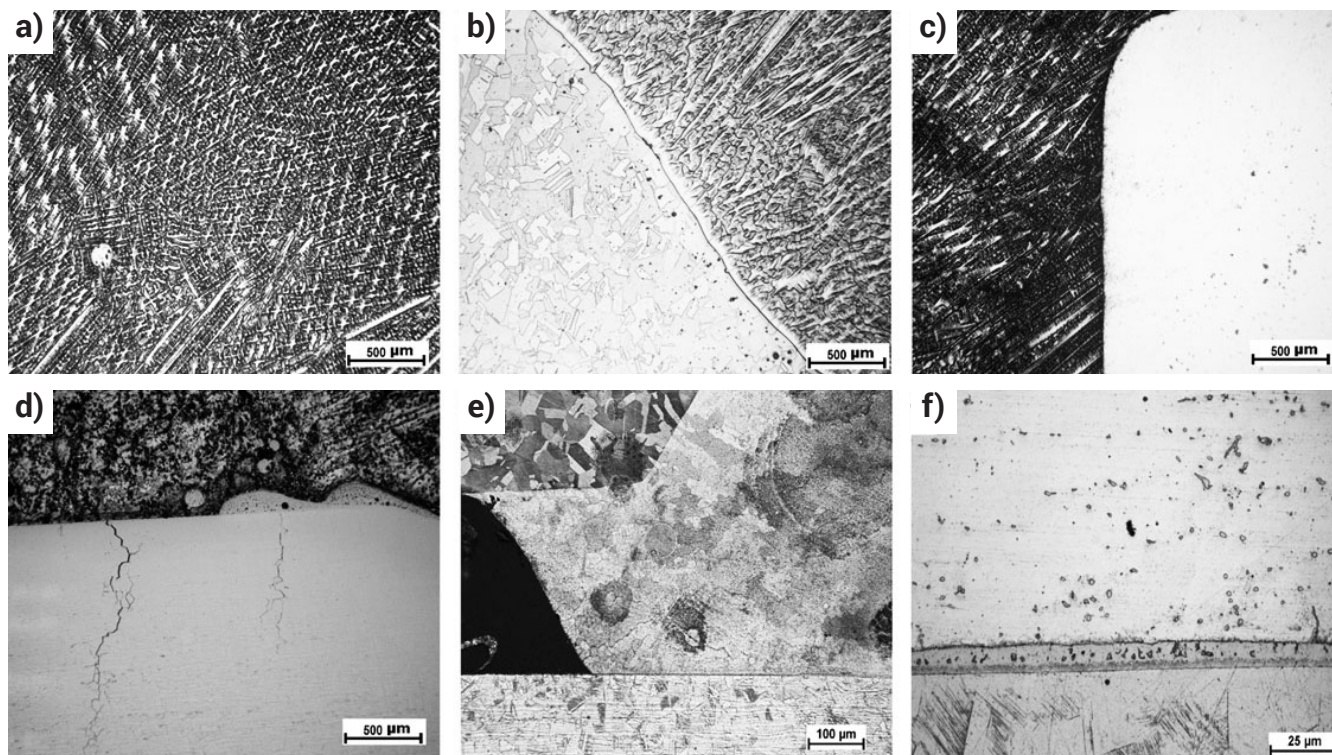
Z wykonanych złączy wycięte zostały próbki, które zostały zainkludowane w żywicy epoksydowej. Celem wykonania złączy metalograficznych, próbki zostały zszlifowane

na papierach ściernych o gradacji od 400 do 2500, a następnie zostały wypolerowane przy użyciu zawiesiny diamentowej o wielkości ziarna 1 μm . Obserwacje makroskopowe zostały przeprowadzone przy użyciu mikroskopu Olympus SZX7, do przeprowadzenia obserwacji mikroskopowych użyto mikroskopu świetlnego Olympus CK40M oraz skaningowego mikroskopu elektronowego Phenom G2 Pro wyposażonego w detektor BSE.

Na podstawie badań makrostruktury złączy lutowanych (rys. 5) stwierdzono, iż najkorzystniejsza makrostruktura występuje w przypadku zastosowania procesu CMT w osłonie Ar (rys. 5a). Nie doszło do znacznych nadtopień stali austenicznej, które występują w pozostałych



Rys. 5. Makrostruktury złączy lutowanych: a) CMT Ar; b) CMT He; c) Puls Ar i d) Puls He
Fig. 5. Macrostructure of braze welded joints: a) CMT Ar; b) CMT He; c) Puls Ar and d) Puls He



Rys. 6. Mikrostruktury złączy lutowanych: a) mikrostruktura lutospoiny, CMT Ar; b) strefa wtopienia w materiał miedzi, CMT Ar; c) strefa zwilżenia stali austenicznej spoiwem, CMT Ar; d) obszary miejscowego stopienia stali austenicznej z pęknięciami, Puls He; e) widok złączy lutowanego, CMT He Z; f) obszar zwilżenia stali austenicznej, CMT Ar Z

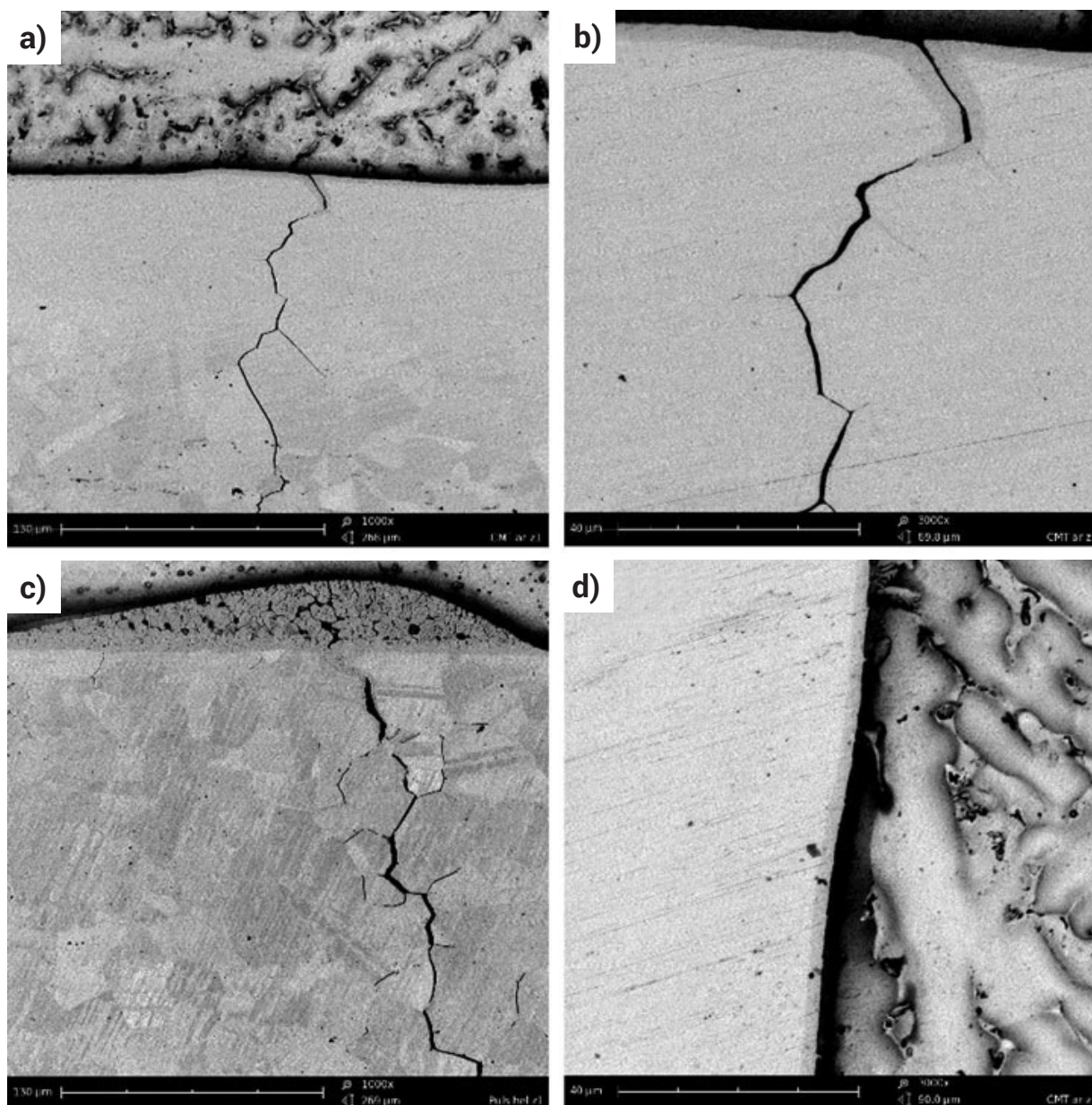
Fig. 6. Microstructure of braze welded joints: a) braze weld microstructure, CMT Ar; b) fusion area between copper and braze weld, CMT Ar; c) contact area between austenitic steel and braze weld, CMT Ar; d) areas of local melting of austenitic steel with fractures, Puls He; e) view of braze welded joint, CMT He Z; f) contact area between austenitic steel and braze weld, CMT Ar Z

próbkach (rys. 5b, 5c i 5d). Ponadto próbka CMT Ar cechuje się najmniejszą szerokością grani i pełnym zwilżeniem powierzchni stali w jej obrębie. W obszarze grani próbki Puls He (rys. 5d) występuje brak zwilżenia stali spoiwem.

W wyniku badań mikroskopowych zbadana została mikrostruktura złączy lutowanych (rys. 6). W obszarze mikrostruktury próbki CMT Ar (rys. 6c) nie zaobserwowano rozległych stref miejscowego stopienia stali austenicznej, które zostały zaobserwowane w mikrostrukturach pozostałych złączy doczołowych (rys. 6d). W każdym złączy doczołowym obecne są pęknięcia pod obszarem lutowania w głąb stali austenicznej. W samych lutowaniach nie stwierdzono pęknięć, jedynymi niezgodnościami zaobserwowanymi w ich obszarze są globularne wydzielenia stali austenicznej, powstałe w wyniku jej nadtopienia (rys. 6d). W mikrostrukturze złączy zakładkowych (rys. 6e, 6f) nie stwierdzono obecności pęknięć w obszarze stali austenicznej. Jest to najpewniej spowodowane odmienną konstrukcją złączy zakładkowych. W trakcie krzepnięcia lutospoin stal austeniczna odkształcana jest w kierunku normalnym do powierzchni blachy,

w przeciwieństwie do złączy doczołowych, gdzie kierunek odkształceń jest styczny do powierzchni blachy.

Obserwacje za pomocą mikroskopu elektronowego SEM wskazały na międzykrystaliczny charakter pęknięć w stali austenicznej (rys. 7a, 7b, 7c). Pęknięcia te występowały wyłącznie pod obszarem lutowania, nie zostały zaobserwowane w materiale niezwilżonym spoiwem. Charakter tych pęknięć został opisany w [3]. Znaczne naprężenia rozciągające, powstałe wskutek wielokrotnie szybszego odprowadzania ciepła przez blachę miedzianą, umożliwiły wniknięcie lutu do granic ziaren, co doprowadziło do powstania pęknięć na gorąco. Ich brak w obszarze stali niezwilżonej spoiwem, wskazuje na poprawność opisanego powyżej mechanizmu ich powstania. Na rysunkach 7b oraz 7d przedstawiających próbkę CMT Ar widoczna jest warstwa dyfuzyjna na powierzchni stali oraz w obszarze pęknięcia. Jej grubość wynosi w granicach $2\div 3\ \mu\text{m}$ zależnie od miejsca pomiaru. W obszarze pozostałych próbek CMT He, Puls Ar i Puls He z racji wystąpienia lokalnych nadtopień (rys. 7c) grubość warstwy dyfuzyjnej cechuje się znaczną zmiennością i nie jest przedmiotem pomiarów.



Rys. 7. Mikrostruktura złączy lutowanych w mikroskopii SEM: a) pęknięcie międzykrystaliczne w obszarze stali austenicznej, CMT Ar, pow. x1000; b) pęknięcie międzykrystaliczne, CMT Ar, pow. x3000; c) pęknięcie międzykrystaliczne pod strefą nadtopienia, Puls He, pow. x1000; d) obszar warstwy dyfuzyjnej na powierzchni stali austenicznej, Puls Ar, pow. x3000

Fig. 7. Microstructure of braze welded joints viewed in SEM microscopy: intercrystalline fracture in austenitic steel, CMT Ar, mag. x1000; b) intercrystalline fracture, CMT Ar, mag. x3000; c) intercrystalline fracture under local partial melting of steel; Puls He, mag. x1000 d) view of diffusion layer in steel, Puls Ar, mag. x3000

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowane zostały następujące wnioski:

1. Metoda lutowania CMT umożliwiła wytworzenie poprawnych złączy doczołowych oraz zakładkowych miedź – stal kwasoodporna przy wprowadzeniu znacznie mniejszej energii cieplnej w stosunku do klasycznej metody MIG łukiem pulsującym oraz przy znacznie mniejszym rozprysku obniżającym walory estetyczne złącza;
2. Złącze doczołowe wykonane metodą CMT w osłonie argonu cechowało się nieznacznym nadtopieniem powierzchni stali austenitycznej, w odróżnieniu od złączy wykonanych metodami MIG łukiem pulsującym w osłonie argonu i helu oraz CMT w osłonie helu, które odznaczały się widocznymi nadtopieniami stali austenitycznej;
3. Obecność pęknięć w obszarze stali austenitycznej złączy doczołowych nie ma wpływu na wytrzymałość statyczną złącza, gdyż każda statyczna próba rozciągania kończyła się przełomem w obszarze miedzi. Jednakże wpływ tych pęknięć na wytrzymałość zmęczeniową badanych złączy jest najpewniej znaczny i zależny od warunków eksploatacyjnych złączy;
4. W obszarze mikrostruktury złączy zakładkowych nie zaobserwowano występowania pęknięć, które obecne są w każdym złączu doczołowym. Jest to spowodowane prawdopodobnie odmiennym rozkładem naprężeń w złączu zakładkowym, które działają normalnie do powierzchni blachy ze stali austenitycznej, co nie powoduje dyfundowania miedzi po granicy ziaren, doprowadzając do pęknięć gorących.

Literatura

- [1] Mirski Z., Pękala P.: Spawanie metodą CMT (Cold Metal Transfer) w porównaniu z klasyczną metodą MAG w przemyśle motoryzacyjnym, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 88 (2), s.15-20, 2016.
 - [2] Wojdat T., Kustron P., Lange A., Łącka I.: Badania właściwości złączy lutowanych aluminium ze stalą wykonanych przy użyciu spoiw na bazie Al i Zn, *Przegląd Spawalnictwa*, vol.89 (7), s. 22-25, 2017.
 - [3] Czupryński A., Kik T., Górka J.: Wykorzystanie niskoenergetycznego procesu CBT do łączenia stali wysokostopowej z miedzią, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 87 (5), s. 21- 30, 2015.
 - [4] Białucki P., Ambroziak A., Derlukiewicz W., Lange A., Glezman M.: Właściwości złącz lutowanych aluminium ze stalą, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 85 (9), s. 40-44, 2015.
 - [5] Mirski Z., Granat K., Prasalek A.: Spawanie metodą TIG miedzi ze stalą austenityczną, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 79 (8), s. 58-63, 2007.
 - [6] PN-EN ISO 1652:1999 Miedź i stopy miedzi – Płyty, blachy, taśmy i krążki ogólnego przeznaczenia.
 - [7] PN-EN ISO 10088-2:2014-12 Stale odporne na korozję - Część 2: Warunki techniczne dostawy blach cienkich/grubych i taśm ze stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia.
 - [8] PN-EN 13347:2004 Miedź i stopy miedzi – Pręty i druty do spawania i lutowania.
 - [9] PN-EN ISO 4136:2013 Badania niszczące złączy spawanych metali – Próba rozciągania próbek poprzecznych.
-