

# Nowoczesne metody lutowania w aspekcie jakości i właściwości połączeń

## Modern methods of weldbrazing in the aspect of quality and properties of joints

### Streszczenie

Przedstawiono zasadę procesu lutowania i omówiono podstawowe metody stosowane na skalę przemysłową. Zwrócono szczególną uwagę na metody lutowania łukowego elektrodą topliwą, zapewniające uzyskanie wymaganej wysokiej jakości (CMT, ColdArc, AC-Pulse), a także lutowanie laserowe. Rozważono zasady i obszary zastosowania oraz właściwości połączeń lutowanych, uzyskane w wyniku badań prowadzonych w Instytucie Spawalnictwa.

**Słowa kluczowe:** lutowanie; metody niskoenergetyczne; lutowanie laserowe; właściwości połączeń lutowanych

### Abstract

It has been presented the fundamentals of weldbrazing process and methods used on an industrial scale has been discussed. Special attention is paid to modern methods of GMA braze welding, assuring high quality (CMT, ColdArc, AC-Pulse), as well as laser brazing. The principles, areas of application and the properties of the braze welded joints, resulting from research conducted at the Institute of Welding have been discussed.

**Keywords:** weldbrazing; low energy methods; laser beam weldbrazing; weldbraze properties

### Wstęp

Coraz wyższe wymagania użytkowe stawiane wyrobom i konkurencja na globalnym rynku spowodowały wzrost zainteresowania elementami konstrukcyjnymi (blachy, kształtowniki itp.) z powłokami ochronnymi (cynkowe, aluminiowe, organiczne) i ze stali odpornych na korozję, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym (koncerny oraz firmy kooperujące), elektromaszynowym (instalacje wentylacyjne, urządzenia klimatyzacyjne i chłodnicze), okrętowym i spożywczym (zbiorniki, kontenery), w produkcji sprzętu AGD, w przemyśle meblarskim i w budownictwie (pokrycia dachów i elewacji, instalacje wodne). Zainteresowaniem cieszą się metody i sposoby, umożliwiające uzyskanie wysokiej jakości połączeń z blach stalowych w zakresie grubości od 0,7 do 3 mm, zwłaszcza z powłokami ochronnymi. Coraz częściej, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym jest więc stosowane lutowanie. Wykorzystywane do niedawna lutowanie elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego łukiem standardowym nie dawało zadowalających efektów. Składały się na to problemy ze wprowadzeniem do złącza zbyt dużej ilości ciepła, czego rezultatem były odkształcenia, uszkodzenia powłoki cynkowej, a także towarzyszące procesowi odpryski, które dodatkowo uszkadzają powłokę ochronną i znacznie pogarszają estetykę połączeń, a ich usunięcie jest operacją czasochłonną i nie zawsze skuteczną.

Zrobotyzowane procesy łączenia elementów, dominujące w przemyśle motoryzacyjnym, wymagają wysokiej stabilności procesu, czego nie zapewniało lutowanie tradycyjną metodą MAG.

Odpowiedzią na to zapotrzebowanie przemysłu samochodowego było opracowanie i wdrożenie do powszechnego stosowania tzw. odmian niskoenergetycznych, wśród których najczęściej stosowane są techniki CMT i ColdArc. Badania technologiczne prowadzone uprzednio w Instytucie Spawalnictwa oraz doświadczenia przemysłowe i analiza literatury technicznej wskazują, że zastosowanie niskoenergetycznych wariantów lutowania elektrodą topliwą pozwala na znaczne zmniejszenie odkształceń spawanych detali, ograniczenie rozprysku, a co się z tym wiąże znaczne polepszenie estetyki. Wyniki badań wykazały ponadto, że zastosowanie tych metod w przypadku blach z powłokami ochronnymi pozwala zmniejszyć uszkodzenie powłoki [1÷3]. Najnowszym rozwiązaniem w zakresie niskoenergetycznych odmian lutowania elektrodą topliwą jest zastosowanie prądu pulsującego o zmiennej biegunowości (AC Pulse, Cold Process, CMT Advanced) [4÷5].

Bardzo dobrą jakość połączeń elementów wykonanych z blach ocynkowanych zapewnia lutowanie plazmowe proszkowe [6]. Możliwe jest uzyskanie złączy doczołowych

Dr inż. Tomasz Pfeifer, Dr inż. Sebastian Stano – Instytut Spawalnictwa.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: Tomasz.Pfeifer@is.gliwice.pl

i zakładkowych charakteryzujących się bardzo wysoką estetyką i własnościami wytrzymałościowymi. Odpowiedni dobór parametrów zapewnia zachowanie warstwy cynku bez uszkodzeń – proces lutowania jest bardzo szybki, a cynk nie zdąży odparować. Proces stosowany jest głównie na stanowiskach zrobotyzowanych, jednakże w przypadku napraw wykorzystywane jest lutowanie ręczne.

Na szczególną uwagę zasługuje technologia lutowania laserowego, polegająca na uzyskaniu połączenia w wyniku stopienia materiału dodatkowego ciepłem wiązki promieniowania laserowego, oddziałującego na spoiwo i materiał podstawowy. Ciepło to powoduje topienie spoiwa oraz podgrzanie łączonych elementów w celu aktywowania procesów kapilarnych i dyfuzji pomiędzy ciekłym lutem a materiałem podstawowym. Lutowanie zapewnia zachowanie powłoki cynkowej w stanie nienaruszonym oraz bardzo dobrą jakość i estetykę, a także własności mechaniczne połączeń [7,8].

W niniejszym artykule scharakteryzowano krótko poszczególne metody lutowania i omówiono wyniki przeprowadzonych w Instytucie Spawalnictwa badań technologicznych z zastosowaniem lutowania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego i aktywnego (wraz z odmianami niskoenergetycznymi), a także lutowania laserowego blach ocynkowanych o grubości do 1,5 mm. Przedstawiono i omówiono wyniki badań strukturalnych i mechanicznych połączeń lutowanych.

## Przegląd metod lutowania

Lutowanie można określić jako „lutowanie twarde niekapilarne realizowane metodą spawania” [9]. Proces ten polega na wykorzystaniu w metodach spawania spoiw o temperaturze topnienia znacznie niższej od temperatury topnienia materiału podstawowego, co powoduje, że mechanizm powstawania połączeń jest taki sam jak przy lutowaniu. Ze względu na stosowane źródła ciepła lutowanie dzieli się na: płomieniowe, łukowe i laserowe. Wśród metod łukowych najczęściej stosowane jest lutowanie w osłonie gazów oraz lutowanie plazmowe proszkowe.

### Lutowanie gazowe

Jest to podstawowa metoda łączenia rur ocynkowanych (grubość warstwy cynku od 100 do 130  $\mu\text{m}$ ), stosowanych powszechnie w instalacjach grzewczych, wody pitnej, wody chłodzącej i ściekowej, w instalacjach przeciwpożarowych i sprężonego powietrza [11]. Krawędzie rur przygotowuje się jak do spawania, a proces łączenia odbywa się wg zasad lutowania twardego lub wysokotemperaturowego (temperatura likwidacji lutu powyżej 900 °C). Do lutowania stosuje się płomień utleniający. Proces prowadzi się techniką w „lewo”, tak aby lut (najczęściej mosiężny) znajdował się przed płomieniem palnika, poruszającego się od strony prawej do lewej. Złącza rur o grubości ścianki do 4 mm można uzyskać jednym ścięciem. Podczas lutowania należy dodatkowo uzupełniać ilość topnika, przez wprowadzenie go za pośrednictwem lutu. Uzupełniania nie wymagają luty otulone cienką i elastyczną warstwą topnika. Metoda ta zapewnia uzyskanie poprawnych połączeń pod warunkiem przestrzegania ściśle określonych wytycznych technologicznych (przygotowanie i oczyszczenie krawędzi, odstęp pomiędzy elementami, właściwie wyregulowany płomień, odpowiednia technika lutowania). Niestosowanie się do wytycznych technologicznych może doprowadzić do uzyskania połączeń z niezgodnościami, przede wszystkim z brakiem szczelności.

### Lutowanie łukowe

Jest stosowane najczęściej do łączenia elementów o niewielkich grubościach, wykonanych z blach ze stali niestopowych, niskostopowych i stopowych (grubość 0,2-3 mm) oraz stali z powłokami cynkowymi (grubość powłoki od 5 do 100  $\mu\text{m}$ ) oraz aluminiowymi [9-10]. Lutowanie łukowe może być również stosowane do łączenia ze sobą materiałów o skrajnie odmiennych właściwościach fizyko-chemicznych, np.: blach stalowych z elementami miedzianymi [13], blach stalowych z aluminium [14], stali z żeliwem, czy do napawania elementów ze stali o ograniczonej spawalności lub stali niespawalnych (zapewnienie odpowiednio niskiego współczynnika tarcia ślizgowego). Ponadto lutowanie stosuje się do regeneracji elementów odlewanych z materiałów uznawanych za trudno spawalne lub niespawalne [9-10]. Lutowanie łukowe jest najczęściej realizowane przy zastosowaniu spoiw na bazie miedzi elektrodą topliwą w osłonie gazu (oraz odmianami metody MIG/MAG), rzadziej metodą TIG i plazmową.

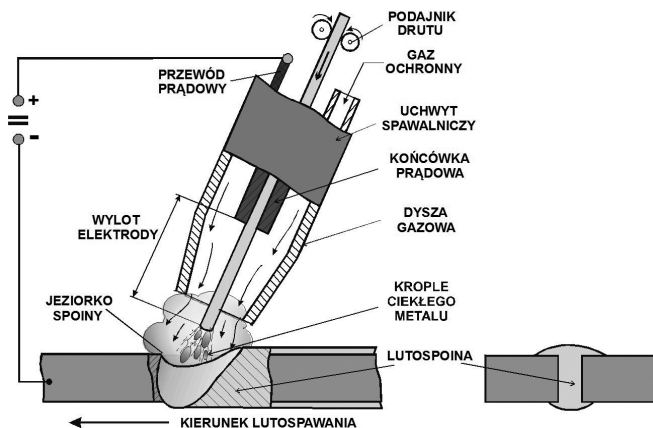
### Lutowanie elektrodą topliwą w osłonie gazu

Jest alternatywną metodą dla spawania łukowego cienkich blach stalowych ze stali niestopowych i niskostopowych, a także cienkich blach zabezpieczonych różnorodnymi powłokami. Jego cechy charakterystyczne w porównaniu do spawania to [9,10]:

- niewielka ilość dostarczonego ciepła, co ma szczególne znaczenie przy łączeniu cienkich blach (znaczne zmniejszenie odkształceń);
- minimalne uszkodzenie powłoki antykorozyjnej na materiale podstawowym w przypadku lutowania blach stalowych z powłokami;
- stabilne jarzenie łuku i minimalna ilość odprysków;
- możliwość uniknięcia stopienia krawędzi łączonych elementów;
- wysoka wydajność procesu i dostateczna wytrzymałość wykonanych złączy;
- estetyczny wygląd lutowoju i łatwa ich obróbka mechaniczna;
- możliwość łączenia materiałów różnoimiennych i materiałów trudno spawalnych;
- znacznie mniejsza, niż przy spawaniu, ilość wydzieleni dymów i pyłów, zwłaszcza podczas łączenia blach ocynkowanych.

Lutowanie łukowe MIG/MAG polega na stapianiu drutu elektrodowego (lutu) na materiał łączony ciepłem łuku spawalniczego, jarzącego się pomiędzy drutem a materiałem, w osłonie gazu ochronnego (rys. 1). Lutowoju powstaje więc w wyniku zwilżenia przez stopione spoiwo powierzchni materiału łączącego podgrzanego ciepłem łuku oraz procesu wzajemnej dyfuzji składników tych materiałów. Najczęściej stosowanymi materiałami dodatkowymi są spoiwa na bazie miedzi o temperaturze topnienia nie przekraczającej 1050 °C. Wśród nich najliczniejszą i najczęściej stosowaną grupę stanowią spoiwa z brązu krzemowego typu CuSi3, CuSi3Mn1, CuSi3Mn1Al1.5, CuSi3Mn7. Znalazły one bardzo szerokie zastosowanie przede wszystkim w przemyśle motoryzacyjnym do łączenia cienkościennych elementów karoserii samochodowych z blach ocynkowanych galwanicznie i ogniowo. Są również zalecane do lutowania cienkich blach ze stali nierdzewnych [9,10].

Kolejną popularną grupę spoiw do lutowania MIG/MAG stanowią brązy aluminiowe z domieszkami m.in.: manganu, żelaza lub niklu. Najczęściej stosowanymi spoiwami są brązy typu: CuAl8, CuAl8Ni2, CuAl5Mn1Ni1, CuAl9Ni5Fe, CuAl9Fe. Są one zalecane do lutowania blach stalowych aluminiowanych i ocynkowanych, a ich wytrzymałość do-

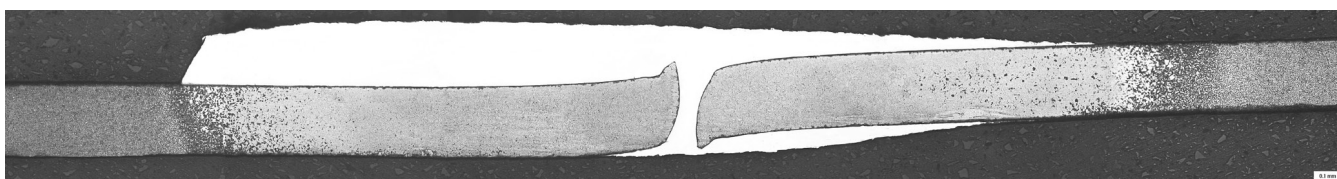


**Rys. 1.** Przebieg procesu lutowania łukowego w osłonie gazu ochronnego metodą MIG/MAG wraz z przekrojem złącza doczołowego [4]

**Fig. 1.** Scheme of gas metal arc wel brazing (GMA) process and the cross section of the joint

chodzi nawet do 700 MPa [9]. W procesach lutowania MIG/MAG jako gaz osłonowy najczęściej jest stosowany argon, a także następujące mieszanki: Ar + (1÷3)% CO<sub>2</sub> i Ar + (1÷2)% O<sub>2</sub>.

Obecnie lutowanie prowadzone jest najczęściej prądem pulsującym, nieco rzadziej prądem stałym (łukiem zwarciovym), z biegunowością dodatnią lub ujemną na elektrodzie. Nowoczesne źródła do spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów wyposażone są w specjalne programy dedykowane procesowi lutowania. Programy te, a właściwie specjalistyczne linie synergiczne, stanowią cechę charakterystyczną danego producenta urządzenia. Coraz częściej zamiast o linii synergicznej mówi się o metodzie spawania / lutowania. Najpopularniejsze są tzw. „procesy niskoenergetyczne MIG/MAG”, w których dzięki zastosowaniu zaawansowanego sterowania parametrami napięcia łuku i natężenia prądu ilość ciepła wprowadzonego do złącza jest ograniczana do minimum. Dzięki tak precyzyjnemu sterowaniu przebiegiem parametrów prądowo-napięciowych uzyskano bardzo dobrą jakość elementów ocynkowanych galwanicznie i ogniowo oraz możliwe stało się łączenie aluminium ze stalą [1÷3]. Spośród „metod niskoenergetycznych” najlepsze wyniki lutowania uzyskano za pomocą odmian CMT (z ang. *Cold Metal Transfer*) i ColdArc. Umożliwiają one osiągnięcie bardzo dobrej estetyki połączenia, zmniejszenie odkształceń termicznych oraz zapewnia minimalne uszkodzenie warstwy materiału powłoki (cynk, aluminium, powłoki wielofazowe cynk-żelazo) [1÷3]. Przy tych procesach mała ilość wprowadzonego ciepła jest korzystna – nawet nie stykające się ze sobą brzegi elementów o bardzo małej grubości nie ulegają nadtopieniu, natomiast ilość ciepła jest wystarczająca do stopienia dość znacznej objętości łąki, co umożliwia tzw. „mostkowanie” czyli polutowanie elementów oddzielonych szczeliną nawet do 2 mm.



**Rys. 2.** Mikrostruktura złącza doczołowego blach ze stali NC10 o grubości 0,25 lutowanego plazmowo z dodatkiem drutu, traw. Nital, pow. 100x

**Fig. 2.** Microstructure of 0,25 mm thick NC10 steel butt joint weld brazed using plasma method, etched with Nital, magnification 100x

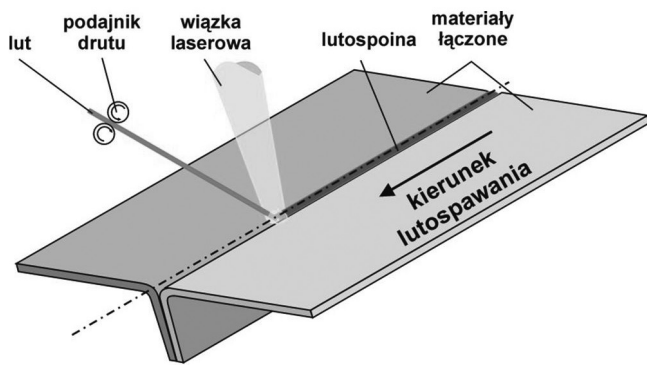
Najnowszym rozwiązaniem w zakresie niskoenergetycznych odmian lutowania elektrodą topliwą jest zastosowanie prądu pulsującego o zmiennej biegunowości (AC Pulse, Cold Process, CMT Advanced – nazwy linii synergicznych). Zastosowane do tego celu musi być urządzenie, zapewniające uzyskanie prądu przemiennego, o zmiennym udziale biegunowości ujemnej [4,5]. Ten sposób kształtowania przebiegu prądu i napięcia zapewnia mniejszą ilość wprowadzonego ciepła, co pozwala na minimalizację uszkodzenia powłoki ochronnej i uzyskanie znacznie mniejszych odkształceń termicznych.

### Lutowanie plazmowe

Polega na wykorzystaniu ciepła skoncentrowanego łuku elektrycznego do podgrzania łączonych elementów i stopienia materiału dodatkowego w postaci proszku lub drutu o temperaturze topnienia niższej od materiału podstawowego [6]. Ciepło łuku plazmowego aktywuje procesy kapilarne (zwilżanie, rozpląwność spoiwa) oraz zjawiska dyfuzji pomiędzy lutem twardym a materiałem podstawowym, tak jak ma to miejsce w procesach lutowania twardego. Do lutowania, podobnie jak w przypadku metody MIG/MAG, stosowane są urządzenia uniwersalne, przeznaczone przede wszystkim do spawania lub napawania. Proces lutowania plazmowego, zarówno proszkiem jak i drutem, prowadzony jest w sposób zmechanizowany lub zrobotyzowany. Przeprowadzone badania lutowania blach stalowych ocynkowanych o grubości 0,9 mm wykazały, że istnieje wąski zakres parametrów technologicznych, zapewniający wykonanie prawidłowego połączenia i dobrą jakość [6]. Zastosowanie odpowiedniej technologii nie powoduje uszkodzenia powłoki cynkowej i odkształceń elementów. W niektórych przypadkach stosowane jest lutowanie ręczne (materiał w postaci drutu). W Instytucie Spawalnictwa opracowano technologię lutowania plazmowego z dodatkiem drutu bezkońcowej taśmy tnącej do styropianu, wykonanej z taśmy ze stali NC 10, o grubości 0,25 mm. Ledeburytyczna stal chromowa NC10 stosowana jest na narzędzia do cięcia o wysokiej wydajności, noże do cięcia blach, narzędzia do gwintowania, ciągnadła do drutu, rolki formujące. Jej spawanie jest bardzo trudne ze względu na niebezpieczeństwo powstawania pęknięć. Zastosowanie lutowania plazmowego, ze względu na bardzo małą ilość wprowadzonego ciepła umożliwiło uzyskanie połączenia spełniającego wymagania producenta taśmy (trwałość).

### Lutowanie laserowe

W procesie lutowania laserowego, rozogniskowana wiązka laserowa topi podawany w sposób ciągły materiał dodatkowy w postaci drutu, podgrzewając równocześnie materiał łączony umożliwiając aktywację procesów kapilarnych (rys.3). Ochronna powłoka cynkowa pozostaje praktycznie nienaruszona, a lico lutospoiny jest gładkie i równomierne. Pozwala to, w większości przypadków, na przeprowadzenie bezpośredniego po procesie lutowania laserowego operacji nakładania powłoki lakierniczej, bez zastosowania specjalnych, dodatkowych operacji.

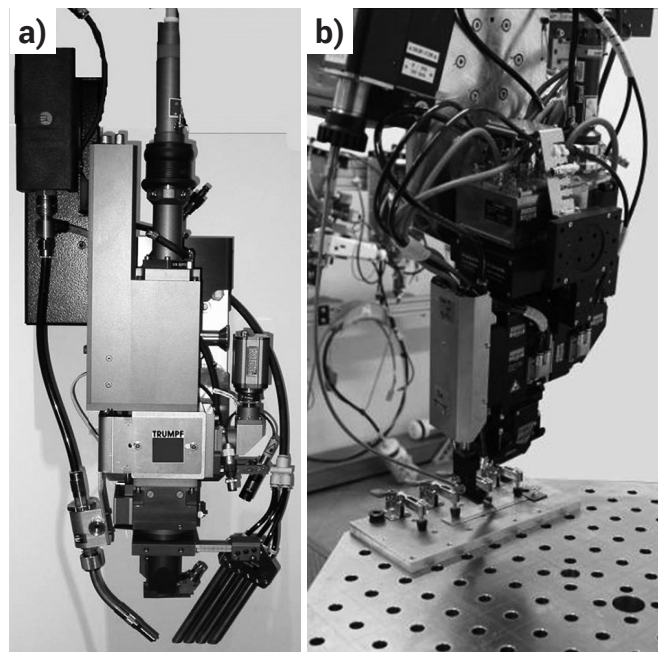


Rys. 3. Przebieg procesu lutospawania laserowego [7]  
Fig. 3. Scheme of laser weldbrazing process [7]

Jako źródła promieniowania laserowego mogą być wykorzystywane praktycznie wszystkie lasery przemysłowe stosowane w spawalnictwie. Jednakże ze względu na długość fali promieniowania laserowego i związane z tym absorpcje promieniowania laserowego przez miedź i jej stopy oraz możliwości transportu promieniowania laserowego światłowodem do głowicy roboczej i miejsca obróbki, do procesów lutowania laserowego stosuje się lasery na ciele stałym (lasery dyskowe, lasery włóknowe) oraz lasery diodowe. W kompletach oferowane są stanowiska zrobotyzowane, w których lasery współpracują z systemem sterowania robota przemysłowego, umożliwiając poprawną pracę systemu i stosunkowo łatwe programowanie. Dodatkowo, lasery te mogą być wyposażone w dodatkowe wyjścia optyczne i światłowody, do których mogą być podłączone kolejne, różne głowice technologiczne znajdujące się na tym samym lub innym stanowisku zrobotyzowanym. Pozwala to na zoptymalizowanie czasu pracy rezonatora i jego maksymalne wykorzystanie, nawet w trakcie przestojów związanych ze zmianą detalu czy programu.

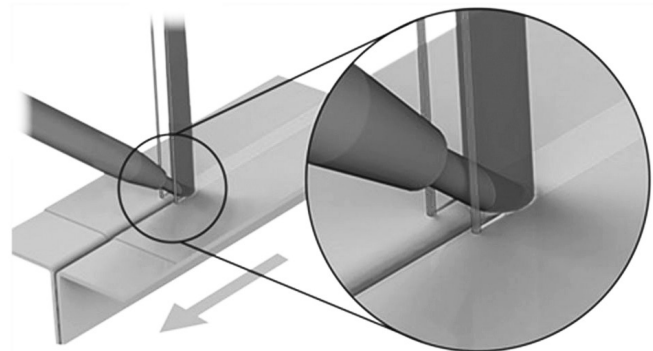
Do prowadzenia procesu lutowania laserowego niezbędna jest odpowiednia głowica technologiczna umożliwiająca uzyskanie odpowiedniej średnicy plamki wiązki laserowej w obszarze lutowania oraz podajnik materiału dodatkowego – drutu do obszaru oddziaływania wiązki laserowej. Podajnik drutu ma za zadanie stabilnie podawać materiał dodatkowy umożliwiając jego równomierne stapianie. Zapewniają to wysokiej jakości podajniki typu push-pull, które posiadają dodatkowe rolki ciągnące, zlokalizowane w bliskiej odległości od obszaru spawania tak, aby zminimalizować opory i niestabilność podawania drutu. Wymagania te spełniają laserowe głowice technologiczne przeznaczone do spawania z materiałem dodatkowym w postaci drutu, gdzie rolki podajnika umieszczone są bezpośrednio przy głowicy spawalniczej a drut podawany jest do ogniska wiązki laserowej pod kątem ok. 45 stopni. Niezwykle użytecznym rozwiązaniem jest zastosowanie głowicy z elektryczną zmianą położenia soczewki kolimatora, umożliwiającej regulację średnicy plamki wiązki laserowej (stopnia jej rozogniskowania) oddziałującej na końcówkę drutu (rys. 4a). W przypadku braku takiego systemu, zmianę średnicy plamki wiązki laserowej uzyskuje się poprzez podniesienie lub obniżenie całej głowicy, co związane jest każdorazowo z koniecznością zmiany położenia końcówki podajnika drutu. Bardziej zaawansowane systemy mogą być wyposażone w głowice laserowe z układem podawania drutu, w którym końcówka drutu jest wykorzystywana jak dotykowy czujnik śledzenia złącza (rys. 4b).

Proces lutowania laserowego jest ciągle doskonalony z wykorzystaniem nowych typów laserów, nowych głowic spawalniczych i systemów zrobotyzowanych. Obecnie rozwijany jest system lutowania wielowięzkowego. W roz-



Rys. 4. Głowica laserowa z systemem podawania drutu oraz elektrycznym systemem ustawiania stopnia rozogniskowania wiązki laserowej (a) i głowica do spawania i lutowania z materiałem dodatkowym w postaci drutu z taktycznym układem śledzenia złącza (b)  
Fig. 4. Laser head with wire feeding and electrical defocusing system (a) and the laser head for welding and weldbrazing using wire tactile sensing system (b)

wiązaniu tym wykorzystano możliwości konstrukcyjne laserów włóknowych oraz specjalnej konstrukcji światłowody, które umożliwiają transport trzech wiązek laserowych wytwarzanych niezależnie w rezonatorze lasera do głowicy roboczej (rys. 5). Na powierzchni elementu obrabianego optyka procesowa tworzy przypisany każdej z wiązek obszar oddziaływania o określonych parametrach, tworząc dwa małe obszary oddziaływania wiązki laserowej, w których następuje wstępne czyszczenie powierzchni oraz jej podgrzanie i szerszy obszar oddziaływania wiązki głównej, w którym następuje dalsze podgrzewanie elementów lutowanych oraz bezpośrednie topienie materiału dodatkowego [12].



Rys. 5. Schemat procesu lutowania za pomocą wielokrotnej wiązki laserowej [12]  
Fig. 5. The scheme of weldbrazing process with the use of multiple laser beam [12]

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań materiałowo – technologicznych, prowadzonych w Instytucie Spawalnictwa w zakresie lutowania elektrodą topliwą w osłonie gazu z zastosowaniem niskoenergetycznych odmian procesu, a także w zakresie lutowania laserowego.

## Badania materiałowo technologiczne procesów lutowania w Instytucie Spawalnictwa

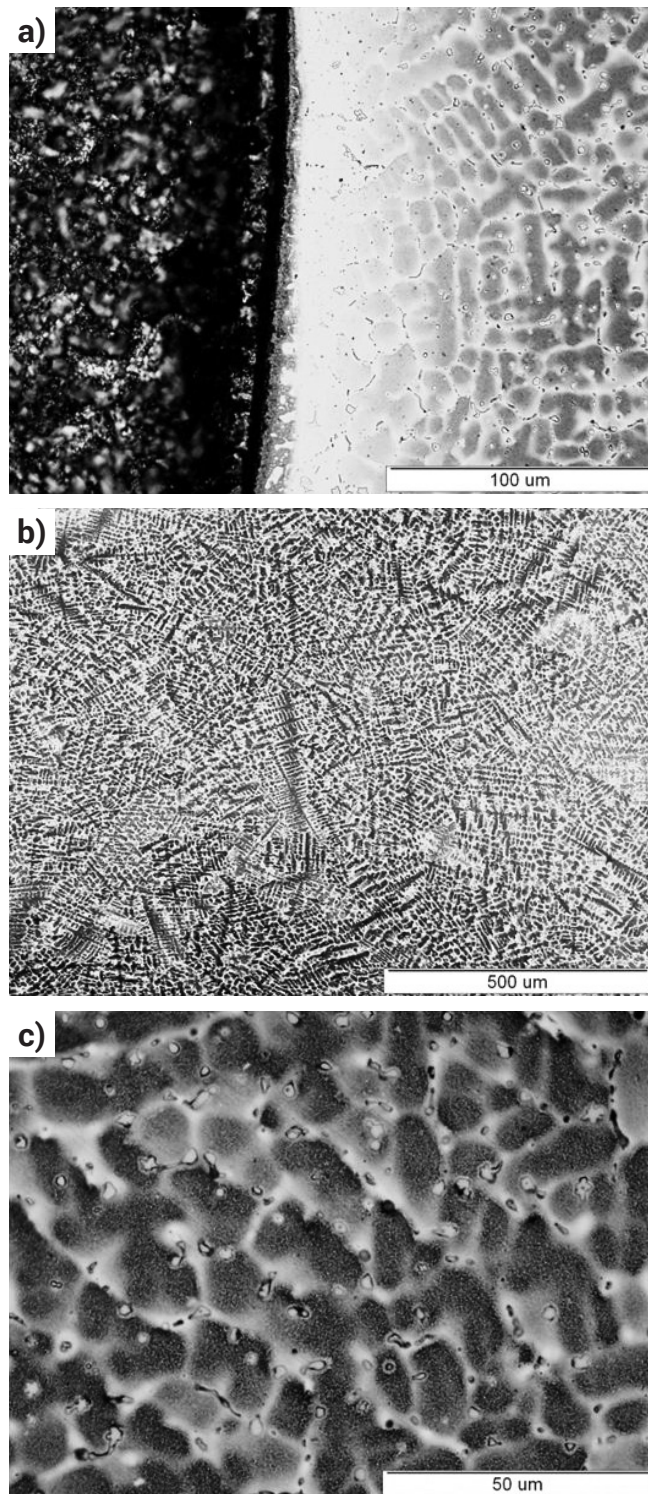
W Instytucie Spawalnictwa badania w zakresie lutowania rozpoczęto od badań technologicznych zrobotyzowanego lutowania łukowego metodą MIG prądem pulsującym złączy doczołowych i zakładkowych blach stalowych o grubości 1,5 mm z powłoką cynkową.

Uzyskane wyniki wykazały, że proces lutowania przebiegał stabilnie – złącza wykazały dobrą jakość i wysoką estetykę. Proces ten wymaga jednakże precyzyjnego doboru parametrów technologicznych w bardzo wąskim zakresie. Z uwagi na wysoką rzadkość spoiw na bazie miedzi (CuSi3Mn1) każde odstępstwo od parametrów uznawanych za najkorzystniejsze (wyznaczone w trakcie badań) powodowało powstawanie niezgodności spawalniczych takich jak: nadmierny nadlew lica i wyciek od strony grani, nadtopienie brzegów materiału podstawowego, przepalenia blach, brak zwilżalności łączonych brzegów blach, rozpryski itp. Przeprowadzone badania mechaniczne połączeń wykazały, że wytrzymałość statyczna na rozciąganie złączy doczołowych wynosi od 350÷450 MPa, a złączy ze stali nierdzewnej od 270÷350 MPa. Plastyczność połączeń jest wysoka – możliwe jest uzyskanie kąta gięcia złączy doczołowych 180°, za wyjątkiem złączy, w których doszło do nadmiernego nadtopienia materiału podstawowego i jego rozpuszczenia się w ciekłym lucie, co doprowadziło do wydzielenia się kruchych faz międzymetalicznych. W tym przypadku kąt gięcia wynosił maksymalnie 80°[9].

Przeprowadzone badania metalograficzne mikroskopowe wykazały, że niewielka ilość wprowadzonego ciepła do złącza lutowanego powoduje niewielkie zmiany w SWC oraz powstanie struktury złożonej z ferrytu i bainitu, a także nieznaczny rozrost ziarna [9]. Strefa przejścia (materiał podstawowy – lut) widoczna jest na zdjęciach metalograficznych jako wąska, ciemna, ciągła warstewka (rys. 6a). Tworzenie się tej złożonej fazy międzymetalicznej zachodzi prawdopodobnie w wyniku reakcji bezpośredniego oddziaływania ciekłego lutu i materiału podstawowego (reakcja dyfuzyjna) oraz częściowego rozpuszczenia się materiału podstawowego w ciekłym lucie i krystalizacji warstwy fazy międzymetalicznej na ściankach materiału podstawowego jako fazy o tzw. niekongruentnej topliwości (nie występuje w stanie ciekłym przy stężeniu składników odpowiadających jej składowi chemicznemu) [9,10]. W strukturze obszaru lutowego można wyróżnić jasne ziarna miedzi ( $\alpha$ ) (pomarańczowe) oraz rozmieszczone w całej objętości drobne i bardzo drobne globularne ciemne fazy (rys. 6b). Widać charakterystyczną strukturę dendrytyczną. Dendryty te o zróżnicowanym ułożeniu osi głównych posiadają rozbudowany układ ramion wtórnych (rys. 6b). W strukturze tej obserwuje się również mikrosegregację pierwiastków na granicach kryształów (rys. 6c). Ujawniono również bardzo drobne wydzielenia złożonych faz międzymetalicznych, opartych głównie na miedzi (ok. 67 %) oraz żelazie (ok. 15%) oraz na fosforu miedzi  $Cu_3P$  (rys. 7). Mikroanaliza składu chemicznego obszaru lutowego potwierdziła występowanie roztworu stałego złożonego z: krzemu, manganu oraz żelaza, umiejscowionego w osnowie dendrytów. Ponadto w strukturze lutowego znajdują się wydzielenia fazy  $\chi$  oraz liczne drobne fazy międzymetaliczne o wysokiej zawartości żelaza [9].

Uzyskane wyniki badań zostały następnie wdrożone do praktyki przemysłowej. Jako przykłady można wymienić [10]:

- opracowanie technologii lutowania wsporników do belki poprzecznej zderzaka samochodu dostaw-

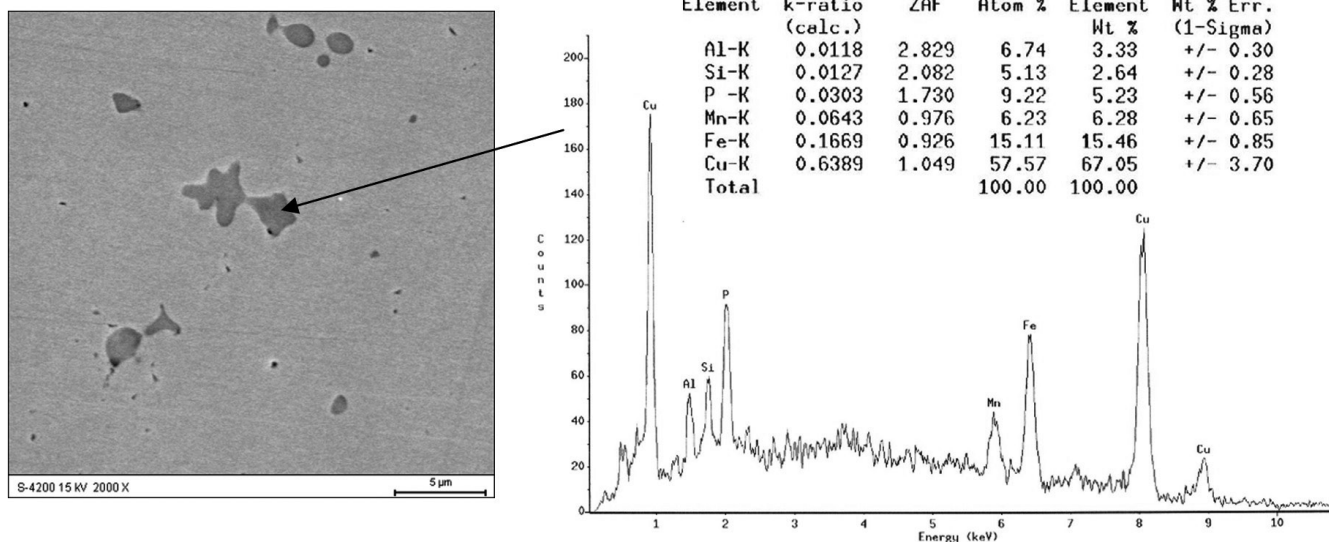


Rys. 6. Mikrostruktura złącza doczołowego blach stalowych ocynkowanych o grubości 1,5 mm, lutowanego metodą MIG prądem pulsującym: strefa przejścia od materiału do lutowego (a), lutowego (b, c)

Fig. 6. Microstructure of 1,5 mm thick zinc coated steel butt joint MIG welded using pulsed current: transition zone (a), weld metal (b, c)

czego, wykonanych ze stali o podwyższonej wytrzymałości bez powłoki ochronnej (minimalizacja odkształceń);

- opracowanie technologii łączenia elementów przekładni (lutowego pachwinowego) odlewu z żeliwa szarego ZL-250 z elementami konstrukcyjnymi ze stali C45;
- opracowanie technologii napawania (natapiania) walców (sworzni) zwałowarko – ładowarki ze stali 42CrMo4V z zastosowaniem spoiwa typu CuAl8.



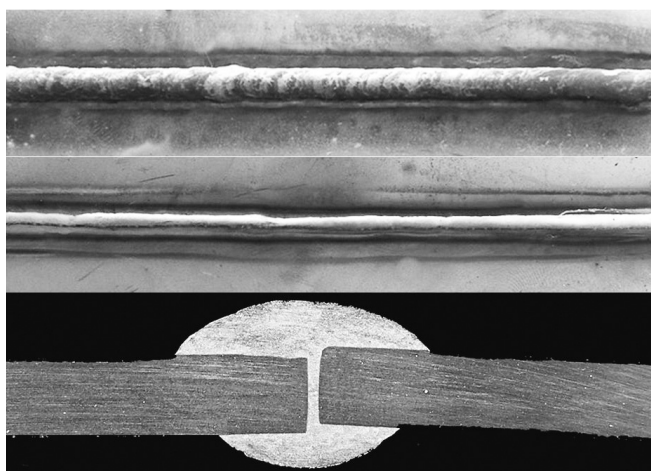
Rys. 2. Wyniki mikroanalizy rentgenowskiej wydzielen w lutospoinie  
Fig. 2. Results of X-ray microanalysis of chemical composition of precipitation in weldbraze

W kolejnych latach przeprowadzono szereg badań technologicznych procesu lutowania łukowego w osłonie gazów z zastosowaniem niskoenergetycznych odmian procesów, takich jak CMT, ColdArc oraz lutowania prądem o zmiennej biegunowości (Variable Polarity -GMA) [1,2,5]. Celem tych badań było określenie potencjalnego obszaru zastosowań nowoczesnych procesów lutowania, a także zbadanie wpływu podstawowych parametrów technologicznych (napięcie łuku, natężenie prądu, prędkość przesuwu, rodzaj gazu osłonowego) na: przebieg procesu, jakość i budowę strukturalną połączeń oraz własności mechaniczne złączy wykonanych z blach stalowych z powłokami na bazie cynku (blachy karoseryjne). Badania wykazały, że wszystkie odmiany procesu lutowania elektrodą topliwą w osłonach gazów zapewniają uzyskanie złączy lutowanych charakteryzujących się bardzo dobrą jakością (rys. 8), minimalnym uszkodzeniem powłoki ochronnej, a także bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi [1,5]. Precyzyjne sterowanie mikroprocesorowe parametrami procesu zapewnia stabilny przebieg i bardzo małą ilość odprysków (ok. 1%). Dzięki mniejszej ilości wprowadzonego ciepła (lutowanie w zakresie łuku zwarciowego, ograniczenie prądu zwarcia, zajarzanie łuku z minimalną wartością natężenia prądu) znacznie mniejsze jest nadto-

pienie krawędzi łączonych elementów, mniejsze są również odkształcenia. Estetyka połączeń jest również znacznie lepsza niż w przypadku lutowania klasycznego prądem pulsującym. W Instytucie Spawalnictwa przeprowadzono również badania procesu lutowania połączeń różnorodnych stali ocynkowanej i nierdzewnej z aluminium oraz tytanu z aluminium. Wyniki tych badań zaprezentowano w innej publikacji znajdującej się w niniejszym numerze Przeglądu Spawalnictwa.

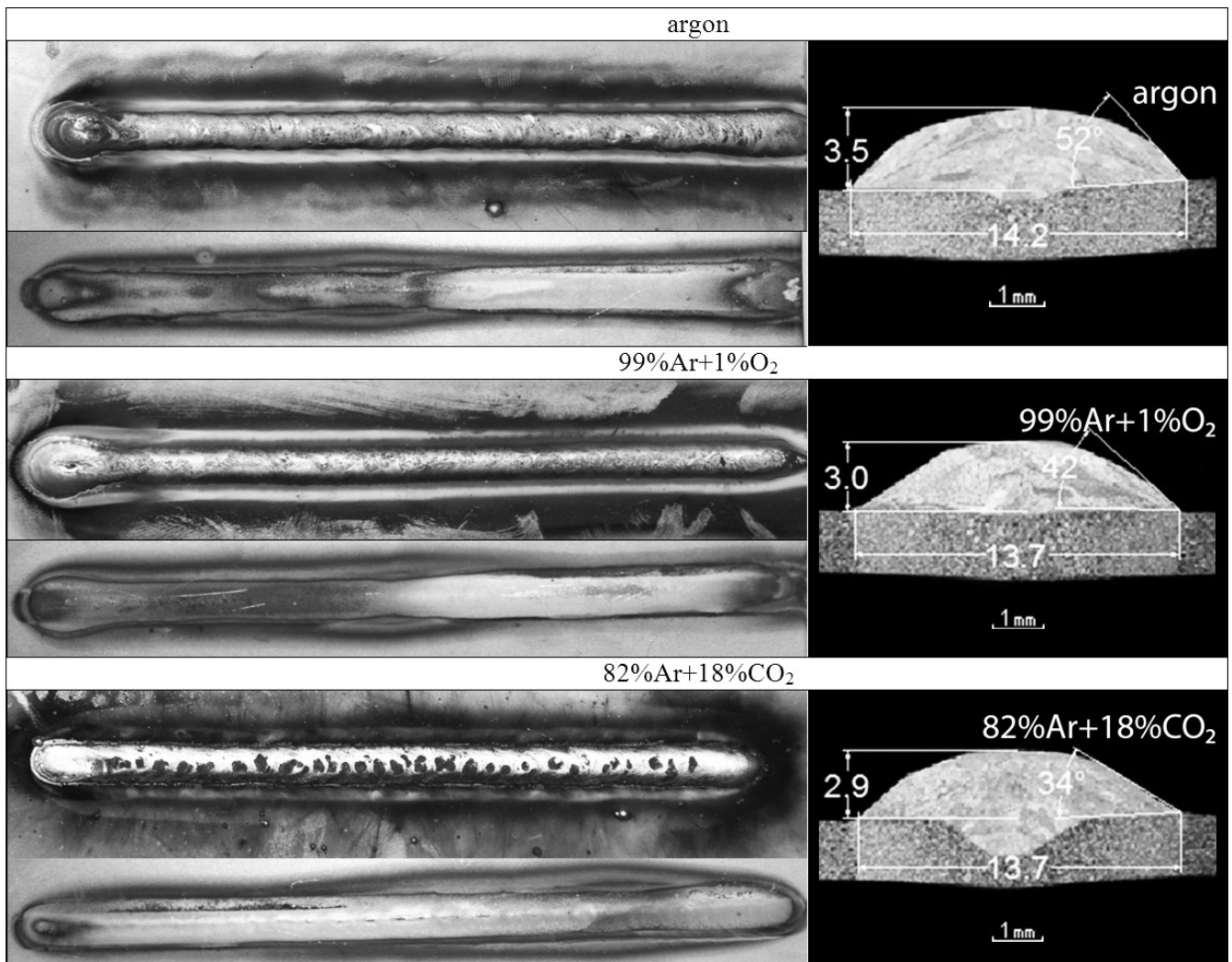
Jednym z obszarów badawczych w zakresie lutowania blach stalowych ocynkowanych było określenie wpływu gazu osłonowego na jakość złączy, budowę strukturalną, a także własności mechaniczne. Przeprowadzone w Instytucie Spawalnictwa badania wykazały, że stosowanie jako gazu osłonowego mieszanek argonu z gazami utleniającymi (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) obniża napięcie powierzchniowe jeziora spawalniczego, przez co poprawiają się warunki zwilżania i rozplwiania stopionego spoiwa na materiale podstawowym (rys. 9). Zwiększa się też stabilność łuku i następuje poprawa wyglądu lica lutospoiny oraz zmniejsza się ilość odprysków. Mieszanek z tlenem można stosować wraz z lutami dobrze oddlenionymi, gdyż w innym przypadku może powstawać w lutospoinie tlenek miedzi (CuO<sub>2</sub>), który gromadzi się na granicy ziaren i może być przyczyną kruchości i pęknięć pod wpływem naprężeń [9]. Badania wykazały, że wraz ze wzrostem indeksu oksydacyjnego mieszanki zwiększa się ilość wydzieleni faz międzymetalicznych w lutospoinie ze względu na znacznie większe nadtopienie materiału podstawowego [9]. Dla spoiw do lutowania w postaci drutów proszkowych zaleca się stosowanie mieszanki argon-wodór (Ar + 2% H<sub>2</sub>). Wodór w mieszance gazowej, podobnie jak tlen i dwutlenek węgla, poprawia stabilność łuku zwłaszcza przy stosowaniu niższych prądów spawania, podwyższa jakość i wygląd ścięgu lutospoiny, a także oddziałuje oddleniająco na warstwę cynku w strefie łączenia. Jednak mieszanki argonu z tlenem, dwutlenkiem węgla lub wodorem wpływają na wprowadzenie większej ilości ciepła do strefy lutowanej i mogą sprzyjać intensyfikacji utleniania lub nadtopienia powłok, zwłaszcza cynkowych (rys. 9) [5].

W Instytucie Spawalnictwa prowadzono również badania procesu lutowania laserowego. Głównym ich celem było poznanie i opanowanie warunków prowadzenia procesu, a także opracowanie podstaw technologicznych lutowania laserowego z wykorzystaniem nowoczesnej generacji laserów typu YAG i specjalnych głowic technologicznych z systemami śledzenia styku jakie dziś zaczynają być coraz



Rys. 8. Lico (a) i grań (b) oraz makrostruktura złącza doczołowego (c) blach ze stali ocynkowanej galwanicznie o grubości 1,5 mm lutowanego metodą CMT

Fig. 8. The face (a) and root (b) side and macrostructure of 1,5 mm zinc coated steel butt joint made using CMT weldbraze



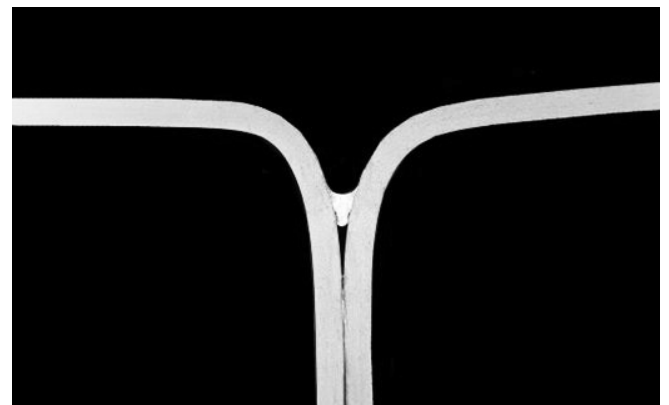
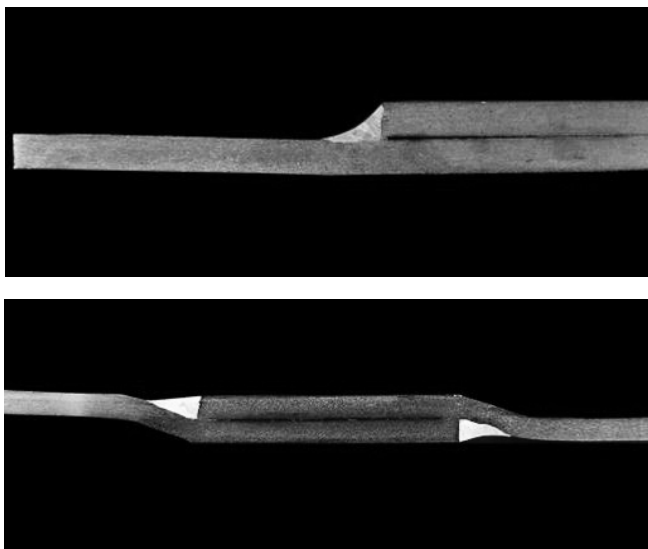
**Rys. 9.** Lico lutonapoiny, próbka od strony przeciwnej oraz makrostruktura lutonapoin wykonanych z zastosowaniem różnych gazów osłonowych

**Fig. 9.** Overlay brazes made using various shielding gases – view of the face and opposite side of the test piece of the overlay braze, overlay braze macrostructure (etching agent: Adler)

częściej stosowane w światowym przemyśle. Zakres badań obejmował określenie wpływu warunków i parametrów procesu na przebieg lutowania laserowego i własności złączy wykonanych z blach stalowych z powłoką cynkową o grubości do 1,0 mm. Badania przeprowadzono na nowoczesnym stanowisku zrobotyzowanym, wyposażonym w laser dyskowy TruDisk 12002 Yb:YAG firmy Trumpf, robot

przemysłowy KUKA KRC30 HA i głowicę Scansonic ALO3 z taktynym układem śledzenia styku w złączu.

Przeprowadzone badania technologiczne wykazały, że proces lutowania laserowego przebiega stabilnie i pozwala uzyskiwać poprawne złącza, bez nadtopienia blach. Złącza charakteryzują się bardzo dobrą jakością i wysoką estetyką (rys. 10).

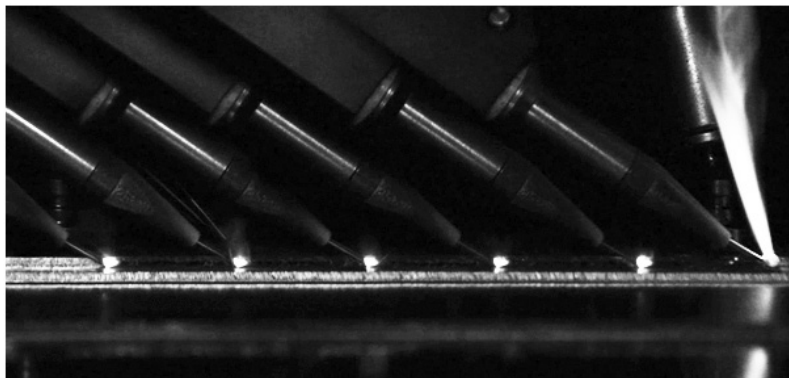


**Rys. 10.** Przykładowe makrostruktury złączy lutowanych laserowo

**Fig. 10.** Examples of laser weldbrazed joints macrostructures

Rejestracja procesu lutowania laserowego umożliwiła poznanie jego przebiegu i zjawiska tworzenia się lutowiny. W trakcie trwania procesu na powierzchni czołowej drutu tworzy się, w wyniku oddziaływania części przekroju plamki lasera, cienka, ciekła warstewka roztopionego metalu. Warstewka ta pod wpływem siły ciężkości spływa stabilnie w sposób ciągły do jeziora roztopionego metalu tworząc z nim jeden wspólny obszar metalu w stanie ciekłym (rys. 11). Drut dolnym „ostrym” końcem jest dociskany i przesuwany (ślizga) po powierzchni dolnej blachy. Przebiegający w ten sposób proces powoduje, że pozostała (poza cienką roztopioną warstewką) część drutu zachowuje dostateczną sztywność i może być dociskana do czołowej powierzchni górnej blachy siłą boczną służącą, jako „dotykowy

sensor” taktylnego układu śledzenia. Taki przebieg procesu można uzyskać tylko w wyniku precyzyjnego doboru i korelacji wszystkich parametrów procesu: mocy, prędkości, trzech kątów ustawienia głowicy i siły bocznej docisku. Na początkowym stadium procesu, gdy metal nie jest jeszcze nagrany, na końcu drutu może tworzyć się eliptyczna kropla (rys. 11) w zależności od parametrów procesu o średnicy ok. 2-3 razy większej niż średnica drutu. W tym czasie materiał lutowany jest ciągle podgrzewany wiązką promieniowania laserowego. Po osiągnięciu odpowiedniej temperatury kropla z końcówki drutu rozpląwa się na powierzchni blach tworząc ciekłe jezioro, na czołowej powierzchni drutu tworzy się stabilna ciekła, cienka warstewka metalu połączona z jeziorkiem, a proces przyjmuje stabilny charakter.



**Rys. 11.** Rejestracja fotograficzna (sekwencja nałożonych fotografii) procesu lutowania laserowego złączy zakładkowych głowicą z taktylnym układem śledzenia

**Fig. 11.** Photographic recording (sequence of imposed photographs) of laser weldbrazing process of lap joints using of tactile tracking system head

## Podsumowanie

Technologia lutowania umożliwia łączenie elementów ze stali niestopowej z powłokami ochronnymi (cynkowymi, aluminiowymi), ze stali stopowej, a także wykonywanie połączeń różniamiennych stali z aluminium i aluminium z tytanem. Technologia ta umożliwia również łączenie układów materiałowych, które uznawane są za niespawalne, np. żeliwo szare ze stalą do ulepszenia cieplnego. Niska temperatura procesu i niewielka ilość wprowadzonego w obszar złącza ciepła, zapobiega uszkodzeniu powłoki ochronnej (lutowanie laserowe i niskoenergetyczne odmiany metody MIG/MAG) lub powoduje, że jest ono minimalne (lutowanie łukowe klasyczne). Dodatkowo powstająca w procesie lutowania strefa wpływu ciepła jest znacznie węższa niż w przypadku spawania, a zachodzące w niej zmiany są minimalne.

Lutowanie łukowe z zastosowaniem niskoenergetycznych procesów (CMT, ColdArc, AC-Pulse) umożliwia ograniczenie rozprysku, a także znaczne zmniejszenie odkształceń, zapewnia jednocześnie bardzo dobre własności mechaniczne i plastyczne połączeń. Lutowanie laserowe zapewnia bardzo dobrą jakość i estetykę połączeń, a także bardzo wysoką wydajność procesu. Własności mechaniczne połączeń są również bardzo wysokie. Łatwość robotyzacji sprawia, że procesy lutowania stosowane są coraz częściej w przemyśle motoryzacyjnym w kraju i na świecie.

## Literatura

- [1] Matusiak J., Czwrónóg B., Pfeifer T.: Spawanie i lutowanie niskoenergetycznymi metodami MIG/MAG przeznaczonymi do łączenia materiałów i elementów wrażliwych na ciepło, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, vol. 51 (6), s. 41-46, 2007.
- [2] Matusiak J., Pfeifer T.: Niskoenergetyczne metody spawania łukowego w osłonie gazów – wpływ warunków materiałowo-technologicznych na jakość złączy i emisję zanieczyszczeń do środowiska pracy, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, vol. 52 (5), s. 85-92, 2008.
- [3] Quintino L., Pimenta G., Iordanescu D., Miranda R., Pepe N.: MIG brazing of galvanized thin sheets for automotive industry, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 21 (1), s. 63-73, 2006.
- [4] Joseph A., Webb C., Haramia M., Yapp D.: Variable polarity improves weld brazing of galvanized sheet, *Welding Journal*, vol. 80 (10), s. 36-40, 2001.
- [5] Piłkuła J., Mendakiewicz J., Pfeifer T.: Wpływ gazu osłonowego na własności połączeń blach ocynkowanych wykonanych metodą lutowania MIG/MAG prądem o zmiennej biegunowości, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, vol. 58 (1), s. 54-59, 2014.
- [6] Klimpel A., Czupryński A., Górka J.: Lutowanie plazmowe proszkowe PTA złączy blach karoseryjnych galwanizowanych cynkiem, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 9, s. 26-31, 2007.
- [7] Banasik M., Stano S., Dworak J.: Lutowanie laserowe na stanowiskach zrobotyzowanych, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, vol. 56 (5), s. 134-139, 2012.
- [8] Klimpel A., Czupryński A., Górka J.: Lutowanie laserowe ocynkowanych blach karoseryjnych, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, vol. 50 (6), s. 39-43, 2006.
- [9] Gawrysiuk W.: Technologia lutowania łukowego. Zalecenia technologiczne i przemysłowe przykłady zastosowań, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, vol. 49 (3), s. 35-40, 2005.
- [10] Różański M., Gawrysiuk W.: Lutowanie MIG/MAG blach ocynkowanych i przykłady trudno spawalnych układów materiałowych, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 9, s. 7-12, 2007.
- [11] Mirski Z., Granat K.: Lutowanie gazowe ocynkowanych rur stalowych, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 2-3, s. 19-21, 2003.
- [12] T. Strite, A. Gusenko, M. Grupp, T. Hoult: Lasery włóknowe w zastosowaniu do obróbki materiałów za pomocą wielokrotnej wiązki laserowej, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, vol. 60 (3), s. 46-48, 2016.
- [13] A. Czupryński, T. Kik, J. Górka: Wykorzystanie niskoenergetycznego procesu CBT do łączenia stali wysokostopowej z miedzią, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 87 (nr 5), s. 21-31, 2015.
- [14] A. Czupryński, D. Janicki: Przyczyny pęknięć lutowin w złączach różniamiennych typu aluminium-ocynkowana stal niestopowa, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 88 (nr 5), s. 43-48, 2016.