

ANALIZA NOWOCZESNYCH TECHNOLOGII SPAWANIA MATERIAŁÓW

Opracował: dr inż. Tomasz Urbański

**Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Techniki Morskiej i Transportu
Katedra Mechaniki Konstrukcji**

SZCZECIN, LUTY 2022

Spis treści

PODSTAWA OPRACOWANIA.....	3
0 SPIS OZNACZEŃ.....	3
0.1 OZNACZENIA.....	3
1 WSTĘP.....	4
2 CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA ALUMINIUM I JEGO STOPÓW, WPROWADZENIE DO TECHNOLOGII SPAWANIA	5
2.1 PRZEGLĄD KLASYFIKACYJNY	5
2.2 ZASTOSOWANIE.....	8
2.3 SPAWALNOŚĆ	9
2.4 MATERIAŁY DODATKOWE	11
2.5 PRZYGOTOWANIE ZŁĄCZY DO SPAWANIA.....	13
3 CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA METOD SPAWANIA ALUMINIUM I JEGO STOPÓW 16	
3.1 SPAWANIE METODĄ TIG	18
3.2 SPAWANIE METODĄ MIG	19
3.3 SPAWANIE PLAZMOWE	20
3.4 SPAWANIE ELEKTRONOWE	21
3.5 SPAWANIE LASEROWE.....	22
3.6 SPAWANIE HYBRYDOWE.....	24
4 ANALIZA NOWOCZESNYCH TECHNOLOGII SPAWANIA MATERIAŁÓW.....	25
4.1 OCENA WIELOWSKAŹNIKOWA.....	25
4.2 SFORMUŁOWANIE ZBIORU KRYTERIÓW OCENY	26
4.3 OKREŚLENIE ZASAD OCENY.....	26
4.4 WYNIKI OCENY	27
5 PODSUMOWANIE	32
6 BIBLIOGRAFIA	33
7 ZAŁĄCZNIKI.....	36
SPIS RYSUNKÓW	37
SPIS TABEL	38

Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest Umowa pomiędzy Zachodniopomorskim Uniwersytetem Technologicznym w Szczecinie, al. Piastów 17, 70-310 Szczecin, będącym Zamawiającym, reprezentowanym przez dr hab. inż. Macieja Taczałę, prof. ZUT jako Kierownika pracy naukowo-badawczej a Tomaszem Urbańskim (nr PESEL 77032617715) zamieszkałym: ul. Partyzantów 13/1 73-110 Stargard, będącym Wykonawcą, z dnia 7 lutego 2022 r.

0 Spis oznaczeń

Celem jednoznacznego sprecyzowania poruszanych w opracowaniu zagadnień wprowadzono dostępne w literaturze fachowej oraz funkcjonujące w przemyśle stoczniowym oznaczenia, zestawienie których (w porządku alfabetycznym) podano w kolejnym podrozdziale.

W spisie oznaczeń zamieszczono tylko najważniejsze z nich, tzn. te, które wykorzystywano w opracowaniu wielokrotnie. Oznaczenia występujące sporadycznie opisano w miejscu ich zastosowania.

0.1 Oznaczenia

Oznaczenie	Jednostka	Opis
EBW	-	Spawanie elektronowe
HLAW	-	Spawanie hybrydowe, w analizie opracowania: LBW+MIG
LBW	-	Spawanie laserowe
MIG	-	Spawanie łukowe w osłonie gazu obojętnego elektrodą topliwą
MIG-ZR	-	j. w. zrobotyzowana, tj. z zastosowaniem robota przegubowego
PAW	-	Spawanie plazmowe
TIG	-	Spawanie łukowe elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych

1 Wstęp

Technologie spawania aluminium znajdują szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Specyficzne właściwości stopów aluminium oraz szeroka wiedza na temat technologii spawalniczych sprawiają, że spawanie aluminium występuje w wielu procesach technologicznych związanych z budową konstrukcji inżynierskich, w tym konstrukcji okrętowych (tj. procesach prefabrykacji sekcji kadłuba statku).

Zarówno w procesie wytwarzania konstrukcji, jak i w pracach remontowo-naprawczych, do łączenia elementów ze stopów aluminium powszechnie stosowane są dostępne technologie spawalnicze.

Pojawienie się nowych technologii spawania, zwłaszcza wykorzystujących skoncentrowane wiązki energii o bardzo dużej gęstości mocy (zwanych innowacyjnymi) oraz możliwości modernizacji technologii konwencjonalnych stwarza nowe obszary aktywności w dziedzinie wytwarzania konstrukcji, zwłaszcza z wykorzystaniem materiałów, które są bardzo wrażliwe na procesy termiczne, jak stopy aluminium.

Każda ze stosowanych technologii spawalniczych powinna zapewnić powtarzalność oraz wymaganą jakość połączeń. Ponadto, technologie, bez względu na sposób realizacji procesu (ręczy, automatyczny), powinny również gwarantować m.in.: wymagane parametry wytrzymałościowe wykonanych połączeń, efektywność procesu, jego bezpieczeństwo oraz spełnić uwarunkowania związane ze specyfiką danej gałęzi przemysłu.

Dlatego ważnym zagadnieniem staje się analiza nowoczesnych technologii spawania materiałów (w tym przypadku aluminium i jego stopów) w kontekście określenia poziomu ich przydatności w danym procesie produkcyjnym oraz skonfrontowanie ich z technologiami już wykorzystywanymi. Analizę taką, wykonaną na podstawie metody wielowskaźnikowej, w oparciu o indywidualny zbiór kryteriów, przedstawiono w niniejszym opracowaniu.

2 Charakterystyka ogólna aluminium i jego stopów, wprowadzenie do technologii spawania

Prezentowana charakterystyka ogólna, oparta jest na literaturze fachowej z dziedziny nauki o materiałach oraz spawalnictwa, tj. w szczególności na: [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [32], [34], [35] i ma na celu przedstawienie tylko podstawowych informacji na temat aluminium i jego stopów oraz wprowadzenie do technologii spawania tych materiałów. Informacje szczegółowe, nie będące przedmiotem analizy wchodzącej w zakres tematyczny niniejszego opracowania dostępne są m. in. w w/w literaturze.

2.1 Przegląd klasyfikacyjny

„Atrakcyjność” stopów aluminium dla świata techniki wynika głównie z ich właściwości fizycznych, chemicznych i wytrzymałościowych. Aluminium jest trzecim najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem w skorupie ziemskiej i ważnym metalem stosowanym w przemyśle, zarówno w postaci czystego metalu, jak i wielu jego stopów. W Tab. 2.1 zestawiono wybrane własności aluminium.

Tab. 2.1. Wybrane własności aluminium

L.p.	Właściwość Al	Wartość (jednostka)
1	Liczba atomowa	13 (-)
2	CieŜar atomowy	26,9815 (-)
3	Gęstość (w 20°C)	2,7 (g/cm ³)
4	Temperatura topnienia	660 (°C)
5	Temperatura wrzenia	2494 (°C)
6	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	23 (10 ⁻⁶ /K)
7	Przewodność cieplna	240 (W/mK)
8	Przewodność elektryczna	63 (10 ⁻⁹ Ωm)
9	Rezystywność	77
10	Właściwości magnetyczne	paramagnetyk

Aluminium posiada korzystne właściwości fizyczne i mechaniczne tj. odporność na korozję w wielu środowiskach (np. wody, wodoru, tlenu, siarki, chloru, wielu kwasów organicznych i związków azotowych), oraz możliwość zwiększania cech

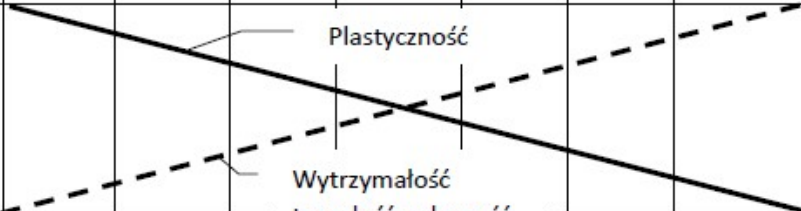
wytrzymałościowych poprzez zwiększanie zanieczyszczeń lub dodatków stopowych oraz zabiegów obróbki plastycznej (walcowanie blach, wyciskanie rur i prętów).

Ze względu na stosunkowo niskie własności wytrzymałościowe czystego aluminium do produkcji wyrobów technicznych stosuje się jego stopy. Podstawowymi pierwiastkami od których zależą cechy stopów aluminium są: miedź, magnez, mangan, krzem i cynk.

Szeroko stosowany podział stopów aluminium bazuje na składzie chemicznym (Rys. 2.1). Rodzaj i ilość pierwiastków tworzących określoną serię stopów oraz dodatki innych pierwiastków (niewielkie ilości niklu, tytanu i cyrkonu) mają wpływ na właściwości mechaniczne, chemiczne i technologiczne stopów. Znaczący wpływ na twardość stopów aluminium ma mangan, miedź i magnez a mniejszy krzem i cynk.

Wytrzymałość stopu najsilniej podnosi zawartość miedzi, ale też obniża ona jego plastyczność, odporność na korozję i spawalność. W Tab. 2.2 przedstawiono wpływ składników stopowych na własności stopów aluminium dla poszczególnych serii.

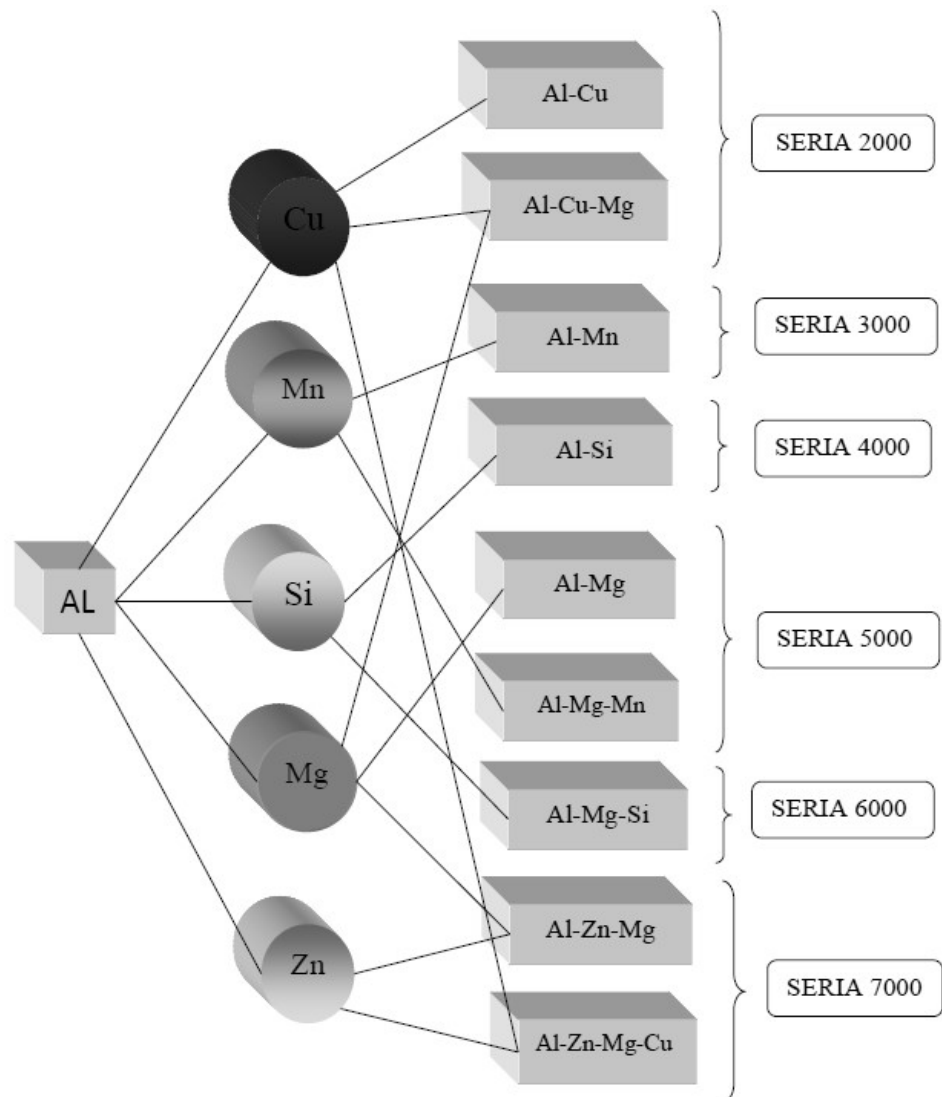
Tab. 2.2. Poglądowa ocena wpływu składników stopowych na własności stopów aluminium dla poszczególnych serii, [13]

Seria stopów	1xxx	3xxx	5xxx	6xxx	7xxx	2xxx	7xxx
Właściwości							
Składniki stopu	Al	AlMn	AlMg	AlMgSi	AlZn Mg	AlCu MgSi	AlZn MgCu
Wytrzymałość	b. niska	niska	średnia		dość wysoka		wysoka

Stosowany jest również podział stopów aluminium na stopy do obróbki plastycznej i stopy odlewnicze. Stopy do przeróbki plastycznej w zależności od przeznaczenia zawierają do 6% miedzi, 1,5 % manganu, 8% cynku, 7% krzemu, 2%

żelaza i niekiedy nikiel, chrom i tytan. W zależności od sposobu podnoszenia wytrzymałości stopy do obróbki plastycznej zostały podzielone na nieulepszane cieplnie (bez obróbki cieplnej), tzn. umacniane przez zgniot i stopy ulepszone cieplnie, czyli poddawane obróbce cieplnej polegającej na tzw. utwardzaniu (umacnianiu) wydzieleniowym.

Odlewnicze stopy aluminium to przeważnie stopy wieloskładnikowe o zawartości dodatków stopowych, w wielkości od 5 do 25%. Przeważnie jest to krzem, miedź, magnez, cynk, nikiel. Stopy odlewnicze charakteryzują się dobrą lejnością i małym skurczem odlewniczym. W praktyce najważniejszą grupą odlewniczych stopów aluminium stanowią: stopy aluminium z krzemem (Al-Si) oraz stopy aluminium z miedzią (Al-Cu) i aluminium z magnezem (Al-Mg).



Rys. 2.1. Klasyfikacja stopów aluminium w zależności od składu chemicznego, [12]

2.2 Zastosowanie

Aluminium i jego stopy należą do materiałów stosowanych bardzo często we współczesnych gałęziach przemysłu na elementy różnego typu i przeznaczenia. W Tab. 2.3 zestawiono przykłady najbardziej powszechnych zastosowań stopów dla poszczególnych serii (grup).

Tab. 2.3. Zastosowanie serii (grup) aluminium i jego stopów

Seria (grupa) stopów Al	Postać produktu	Zastosowanie
Czyste aluminium	Folie, blachy, kształtowniki	Opakowania i folie dla przemysłu spożywczego, pokrycia dachów, zbiorniki i naczynia na substancje o niewielkim potencjale korozyjnym.
Stopy serii 2xxx (Al-Cu)	Blachy cienkie i grube, kształtowniki, odkuwki	Części wysoko obciążone, elementy konstrukcyjne w przemyśle lotniczym, odkuwki o wysokiej wytrzymałości, głowice cylindrów, tłoki.
Stopy serii 3xxx (Al-Mn)	Blachy cienkie i grube, kształtowniki, odkuwki	Opakowania, pokrycia dachów, zbiorniki i bębny dla przemysłu chemicznego, oprzyrządowanie dla przemysłu spożywczego.
Stopy serii 4xxx (Al-Si)	Druty, odlewy	Materiały dodatkowe do spawania łukowego i lutowania, głowice cylindrów, bloki silników, korpusy zaworów, elementy architektoniczne.
Stopy serii 5xxx (Al-Mg)	Blachy cienkie i grube, kształtowniki, odkuwki, rury	Płaszczki, kadłuby statków, nadbudówki statków, elementy konstrukcyjne w przemyśle okrętowym, zbiorniki, pojazdy szynowe i samochody, elementy architektoniczne, dachy, zadaszania dworców i przystanków, kijki.
Stopy serii 6xxx (Al-Si-Mg)	Blachy cienkie i grube, kształtowniki, odkuwki, rury	Elementy konstrukcyjne o wysokiej wytrzymałości w różnych gałęziach przemysłu, pojazdy szynowe i samochodowe, podwozia przyczep samochodów ciężarowych, elementy konstrukcyjne w przemyśle okrętowym, elementy architektoniczne.
Stopy serii 7xxx	Blachy cienkie i grube, kształtowniki, odkuwki	Elementy konstrukcyjne o wysokiej wytrzymałości w różnych gałęziach przemysłu, odkuwki dla przemysłu lotniczego o dużej grubości, rozbieralne mosty wojskowe, wysokowytrzymałe rusztowania, płyty pancerne, kształtowniki stosowane w konstrukcjach pojazdów szynowych i samochodowych.

2.3 Spawalność

Parametrem utrudniającym proces spawania aluminium metodą jest wysoka temperatura topnienia tlenku aluminium oraz podatność aluminium i jego stopów do rozpuszczania gazów w jezioru spawalniczym. Wysokie powinowactwo chemiczne aluminium do tlenu powoduje, że w kontakcie z powietrzem powierzchnie aluminium i jego stopów pokrywają się warstwą tlenku glinu Al_2O_3 . Temperatura topnienia tlenku aluminium wynosi około 2030°C i jest trzy razy większa od temperatury topnienia aluminium. Ta szczelna powłoka może być przyczyną powstawania niezgodności spawalniczych, a nawet całkowicie uniemożliwić wykonanie połączenia.

Przy spawaniu aluminium i jego stopów duże znaczenie odrywa dobór materiału spoiwa jako kluczowego elementu przy opracowaniu technologii spawania. Niewłaściwy dobór materiału spoiwa skutkuje zwiększeniem ryzyka powstawania pęknięć w przypadku, gdy zastosowane spoiwo zastyga szybciej od materiału spawanego. Zaleca się stosowanie spoiw z materiału krzepnącego wolniej od materiału połączenia. Jakość spoiny w znacznym stopniu zależy od ustawionych parametrów urządzenia spawalniczego. Niewłaściwy ich dobór może spowodować, że za wysoka temperatura i długi czas jarzenia łuku elektrycznego zmieni właściwości i strukturę materiału spawanego. Często jest to obniżenie wytrzymałości połączenia w SWC (strefie wpływu ciepła). Dobór wartości natężenia prądu spawania zależy od grubości i rodzaju materiału spawanego, zastosowanej elektrody nietopliwej, a także rodzaju gazu osłonowego. Za niskie natężenie może spowodować wadę połączenia w postaci braku przetopu. Z kolei za wysokie natężenie prądu powodować będzie niezgodności powstałe w wyniku przegrzania materiału, takie jak ubytki w materiale, wypływ materiału od strony grani, podtopienia lica. Zbyt wysokie natężenie prądu spawania może powodować nadtopienie elektrody wolframowej i możliwość powstawania wtrąceń metaliczne w spoinie. Wynika zatem, że uzyskanie połączenia charakteryzującego się odpowiednimi parametrami wytrzymałościowymi wymaga szczególnego zachowania wymagań technologicznych zwłaszcza wysokich wymagań związanych z doбором parametrów spawania, gatunku stosowanych stopów oraz gatunku spoiwa.

Właściwości wpływające na spawalność aluminium i jego stopów zestawiono w Tab. 2.4

Tab. 2.4. Właściwości wpływające na spawalność aluminium i jego stopów

L.p.	Właściwość	Znaczenie
1	Duże powinowactwo do tlenu	Powstająca na powierzchni aluminium ściśle przylegająca do niej, bardzo trwała chemicznie powłoka tlenkowa o ciężarze właściwym wyższym od aluminium ($3,9 \text{ g/cm}^3$) utrudnia (powoduje brak wtopienia, wtrącenia tlenkowe, itp.), a nawet uniemożliwia spawanie.
2	Wysoka przewodność cieplna	Utrudnia miejscowe stopienie metalu oraz powoduje bardzo szybkie krzepnięcie spoiw i stygnięcie złącza.
3	Wysoka rozszerzalność cieplna i duży skurcz	Sprzyjają powstawaniu naprężeń i odkształceń spawalniczych oraz pęknięć w połączeniach.
4	Niska wytrzymałość w temperaturach powyżej 500°C	Sprzyja deformacjom konstrukcji w temperaturach spawania.
5	Duża zdolność w stanie stałym do rozpuszczania gazów	Sprzyja porowatości w spoinach.
6	Brak barw nalotowych podczas nagrzewania	Utrudnia ocenę temperatury nagrzania złącza.
7	Tworzenie przez składniki stopowe nisko topliwych faz (mieszanin eutektycznych)	Sprzyja – w warunkach występowania naprężeń wynikających z wysokiej rozszerzalności cieplnej i dużego skurczu metalu – powstawaniu gorących pęknięć krystalizacyjnych w spoinie i likwacyjnych w SWC.

Z informacji zamieszczonych w Tab. 2.4 wynika, że przy spawaniu aluminium i jego stopów należy zapewnić: eliminację warstwy tlenkowej i ochronę strefy łączenia przed utlenianiem (czyszczenie chemiczne, „czyszczenie katodowe” w łuku elektrycznym, osłony gazów obojętnych), stosowanie źródeł ciepła o dużej koncentracji oraz zachowanie odpowiedniej sztywności konstrukcji (szczepianie, oprzyrządowanie pomocnicze).

Jednym z głównych problemów przy spawaniu aluminium i jego stopów jest porowatość w spoinach. Za jej główną przyczynę uznaje się zmienną i zróżnicowaną rozpuszczalność gazów (H_2) w metalu spoiny w stanie ciekłym i stałym, stosunkowo szybkie krzepnięcie metalu spoiny, a także obecność wilgoci lub zanieczyszczeń organicznych w obszarze spawania. Dlatego tak ważne jest: usuwanie zanieczyszczeń z rowka spawalniczego, unikanie spawania w warunkach wysokiej wilgotności, a także stosowanie czystych i osuszonych materiałów dodatkowych spoiw i gazów osłonowych. Oczywiście, na spawalność mają również wpływ zjawiska dotyczące poszczególnych serii (grup) aluminium i jego stopów

2.4 Materiały dodatkowe

Podstawowymi materiałami dodatkowymi, przy spawaniu aluminium i jego stopów są spoiwa oraz gazy osłonowe.

Jako spoiwa stosuje się głównie takie, których skład chemiczny odpowiada spawanym gatunkom materiałów aluminiowych.

Spoiwa aluminiowe, ze względu na ich skład chemiczny, można podzielić (wg [34]) na pięć podstawowych grup:

1. Czyste aluminium.
2. Stopy typu Al-Mn.
3. Stopy typu Al-Mg.
4. Stopy typu Al-Si.
5. Stopy typu Al-Cu oraz Al-Si-Cu.

Ogólne przeznaczenie spoiw (wg [34]) do spawania wybranych gatunków aluminium i stopów aluminium oraz ich kombinacji przedstawiono w Tab. 7.1 (w załączniku).

Wszystkie spoiwa z tych grup są stosowane w postaci prętów oraz drutów do spawania metodami TIG oraz MIG oraz PAW (rzadziej). Czyste aluminium, jak i stopy Al-Si są również wykorzystywane w postaci elektrod otulonych.

Charakterystycznymi dodatkami mikroskopowymi spoiw do spawania aluminium i jego stopów, są: tytan oraz chrom (w niektórych przypadkach również cyrkon). Dodatki te powodują rozdrobnienie ziaren w spoiwie i przeciwdziałanie jej pękaniu.

Do spawania stopów aluminium wykorzystywanych na konstrukcje okrętowe (patrz Tab. 2.3), tj. typu Al-Mg (seria 5xxx) należy stosować spoiwa o nieco wyższej zawartości magnezu, w porównaniu z materiałem podstawowym. Spowodowane jest to tym, że w trakcie procesów spawania łukowego magnez intensywnie paruje, a jego ubytek przyczynia się do zmniejszenia wytrzymałości złącza.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że spoiwa aluminiowe wymagają specjalnej dbałości o czystość ich powierzchni. Spoiwa z postaci prętów, przechowywane w otwartych opakowaniach, należy odtłuścić bezpośrednio przed użyciem ponieważ zanieczyszczenia mogą być powodem porowatości spoin. Następnie – po odtłuszczeniu – należy (najlepiej poprzez trawienie w roztworze wodnym zasady sodowej NaOH lub sposobem mechanicznym) usunąć powierzchniową warstwę tlenku Al_2O_3 ponieważ występuje zagrożenie wtrąceń tlenkowych, jak również porowatości w spoinach.

Natomiast spoiwa będące w szpulach należy przechowywać w oryginalnych, hermetycznie zamkniętych opakowaniach, i otwierać je bezpośrednio przed użyciem. Szpule z drutem, znajdujące się w podajnikach urządzeń spawalniczych należy osłaniać, podczas przerw w pracy, odpowiednimi pokrowcami, a przy dłuższych przerwach wyjmować z urządzeń i przechowywać w suchych pomieszczeniach (dotyczy to zwłaszcza spoiw Al-Mg, które są bardzo wrażliwe na wilgoć). Ponadto wszelkie zanieczyszczenia powierzchniowe drutu na szpulach mogą być przyczyną negatywnego oddziaływania metalurgicznego oraz powodować duże zakłócenia w równomiernym podawaniu drutu poprzez przewody do uchwytu spawalniczego.

Należy również pamiętać, że do najważniejszych kryteriów, na podstawie których najczęściej dobierane są spoiwa, należą: spawalność, właściwości mechaniczne złączy oraz ich odporność na korozję, jak również zgodność barwy spoiny z materiałem rodzimym po anodowaniu.

Gazami osłonowymi stosowanymi do spawania aluminium i jego stopów jest argon oraz hel, [34], których podstawową charakterystykę zestawiono w Tab. 2.5.

Tab. 2.5. Podstawowa charakterystyka argonu i helu

L.p.	Argon	Hel
1	Wysoka masa atomowa (39,95)	Niska masa atomowa (4)
2	Stosunkowo niski potencjał jonizacji (15,8 eV)	Wyższy potencjał jonizacji (24,9 eV)
3	Niska przewodność cieplna (współczynnik przewodności cieplnej 0,17 W/mK)	Wyższa przewodność cieplna (współczynnik przewodności cieplnej 1,15 W/mK)
4	---	Znaczny wpływ na podwyższenie napięcia oraz mocy cieplnej łuku elektrycznego

Argon - przy ręcznym spawaniu metodą TIG prądem przemiennym zapewnia elastyczną długość oraz łatwe zajarzanie łuku elektrycznego, a także skuteczne czyszczenie katodowe. Natomiast, przy półautomatycznym spawaniu MAG, umożliwia uzyskanie łuku natryskowego, o bardzo małej stabilności, co sprzyja układaniu spoin o poprawnym kształcie, z dobrym wtopieniem, we wszystkich pozycjach spawania.

Hel – stosowany we wszystkich przypadkach zmechanizowanego spawania metodą TIG oraz automatycznego spawania metodą MIG w pozycji podolnej, z zastosowaniem dużych prądów i prędkości spawania.

W chwili obecnej, coraz powszechniej, do spawania aluminium i jego stopów stosuje się mieszanki osłonowe argonu z helem, zwłaszcza do zmechanizowanego spawania metodą TIG oraz półautomatycznego i automatycznego spawania metodą MIG, zwłaszcza elementów konstrukcyjnych o większych grubościach.

2.5 Przygotowanie złączy do spawania

Właściwe i odpowiednie przygotowanie elementów przed spawaniem bardzo ważnym elementem każdej z technologii spawania, jednak w przypadku spawania aluminium i jego stopów jest niezbędne dla akceptowalnej jakości uzyskiwanych połączeń

Przygotowanie do spawania elementów z aluminium oraz jego stopów obejmuje: cięcie oraz obróbkę krawędzi spawanych elementów, czyszczenie materiału podstawowego (ewentualne mocowanie go w „odpowiednim” oprzyrządowaniu), szepianie, jak i podgrzewanie wstępne (w razie konieczności).

Z uwagi na to, że aluminium jest materiałem stosunkowo miękkim, a jego powierzchnia może ulec uszkodzeniu, np. poprzez zarysowania, odciski (w trakcie nieostrożnej manipulacji urządzeń transportowych), równie ważnym zagadnieniem jest właściwe postępowanie z materiałem podstawowym, w tym odpowiednie jego składowanie.

Krawędzie spawanych elementów powinny być przygotowane za pomocą: metod cięcia termicznego (najlepiej: plazmowego lub laserowego. Nie dopuszcza się cięcia tlenowego), cięcia strumieniem wody lub za pomocą obróbki mechanicznej.

Przygotowanie brzegów blach do spawania zależy od ich: grubości, rodzaju złącza, warunków spawania. Szczegółowe, zalecane sposoby przygotowania złączy (dla metod TIG i MIG) oraz ich wymiarów dostępne są np. w [36], których przykłady zestawiono w Tab. 2.6.

Powierzchnie spawanych elementów, w szczególności krawędzie łączenia, muszą być dokładnie odtłuszczone i oczyszczone. Szerokość warstwy oczyszczonej na powierzchni elementów powinna wynosić ok. 30 mm. Elementy odtłuszczone i oczyszczone powinny zostać pospawane w czasie nie przekraczającym 4 godz. W tym czasie należy je utrzymywać w czystości, a niekiedy wręcz pokryć powierzchnię folią polietylową lub specjalistycznym papierem.

Proces spawania aluminium i jego stopów korzystnie jest prowadzić z wykorzystaniem podkładek formujących grań spoiny (wykonanych ze stali żaroodpornej lub grafitu), w szczególności przy zmechanizowanych technologiach spawalniczych charakteryzujących się wysoką wydajnością procesu (w tym dużymi parametrami procesów).

Niekiedy zachodzi konieczność wstępnego podgrzania elementów przed spawaniem. Spowodowane jest to dużą przewodnością cieplną aluminium i jego stopów, co jest przyczyną trudności w szybkim ich nagrzaniu i sprzyja szybkiemu krzepnięciu metalu oraz stygnięciu spoiny, przyczyniając się do powstawania niezgodności spawalniczych. Temperatura wstępnego podgrzania zależy od: grubości i pojemności cieplnej spawanych elementów, rodzaju stopu i technologii spawania. Przy spawaniu metodami TIG oraz MIG stosuje się podgrzewanie wstępne dla blach o grubościach powyżej 10 mm (w zakresie temp. 150÷300°). Kiedy materiał przebywał pewien czas w temp. niższej, a następnie został przetransportowany do warunków o temp. wyższej stosuje się tzw. podgrzewanie osuszające elementów przed spawaniem – w zakresie temp. 90÷100°.

Tab. 2.6. Przykładowe sposoby przygotowania brzegów blach z aluminium i jego stopów do spawania (na podst.[36])

Grubość materiału t [mm]	Przekrój poprzeczny	Przygotowanie brzegów	Rysunek spoiny
$t \leq 2$		-	
$t \leq 4$		$b \leq 2 \text{ mm}$	
$3 \leq t \leq 15$		$\alpha \geq 50^\circ$ $b \leq 2 \text{ mm}$ $c \leq 2 \text{ mm}$	
-		$\alpha = 50^\circ$ $b \leq 2 \text{ mm}$	
$6 \leq t \leq 25$		$\alpha \geq 50^\circ$ $4 \text{ mm} \leq b \leq 10 \text{ mm}$ $c = 3 \text{ mm}$	
$t > 15$		$\alpha \geq 50^\circ$ $b \leq 3$ $c \leq 2$ $h = t/2$	

3 Charakterystyka ogólna metod spawania aluminium i jego stopów

Prezentowana charakterystyka ogólna, oparta jest na literaturze fachowej z dziedziny spawalnictwa, tj. w szczególności na: [2], [3], [4], [5], [6], [8], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], i ma na celu przedstawienie tylko wybranych informacji na temat stosowanych technologii spawania aluminium i jego stopów. Informacje dodatkowe, nie będące przedmiotem analizy wchodzącej w zakres tematu niniejszego opracowania dostępne są m. in. w w/w literaturze.

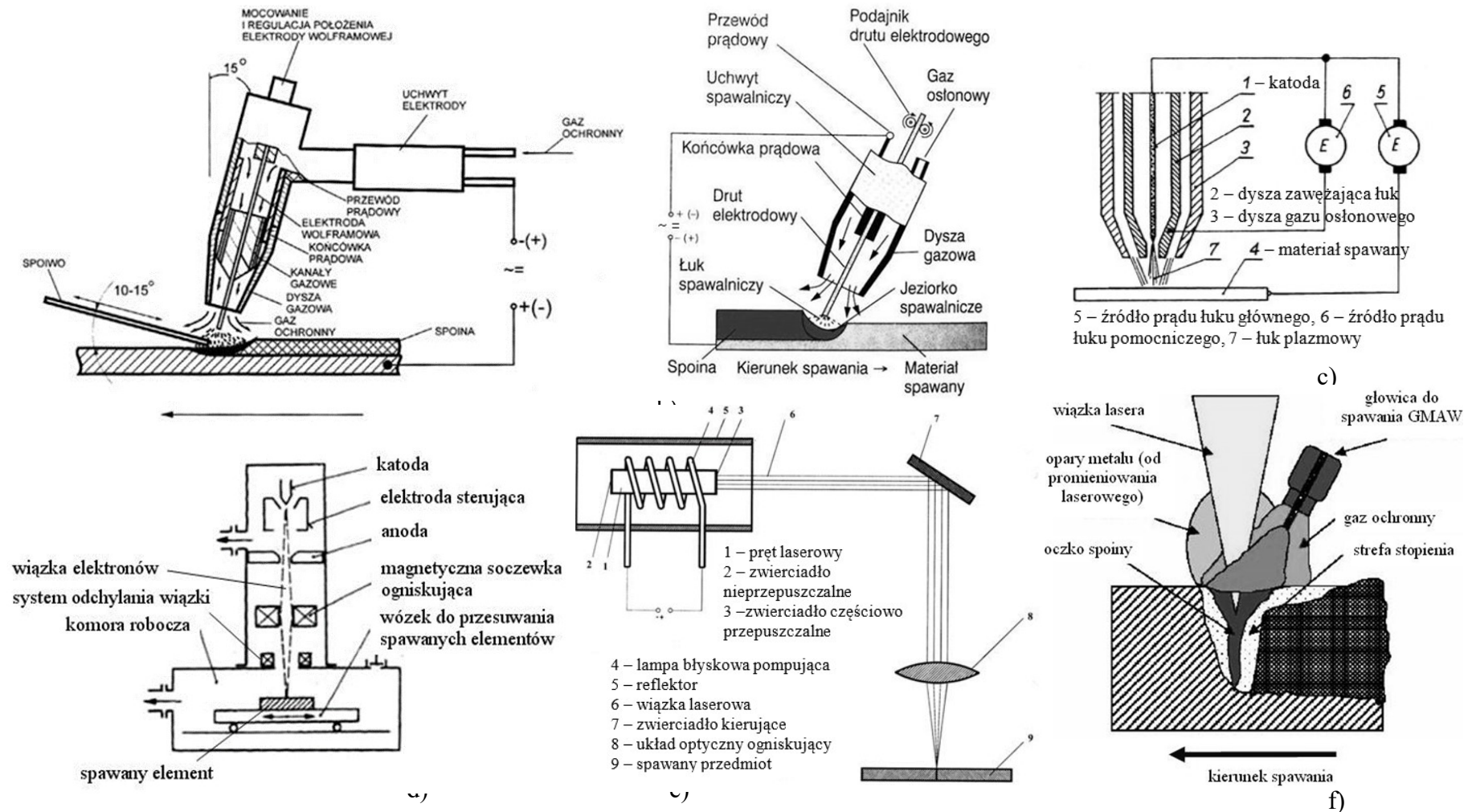
Najczęściej wykorzystywane metody spawania aluminium i jego stopów zestawiono w Tab. 3.1, a ich schematy zobrazowano na Rys. 3.1.

Tab. 3.1. Technologie spawania aluminium i jego stopów

L.p.	Nazwa w języku polskim/Nazwa w języku angielskim, wg [33]	Nr metody, wg [33]	Schemat metody, wg
1	Spawanie łukowe elektrodą wolframową, spawanie metodą TIG/Tungsten inert gas arc welding, TIG welding	141	Rys. 3.1 a)
2	Spawanie łukowe w osłonie gazu obojętnego elektrodą topliwą, spawanie metodą MIG/Metal-arc inert gas welding, MIG welding	131	Rys. 3.1 b)
3	Spawanie plazmowe/Plasma arc welding	15	Rys. 3.1 c)
4	Spawanie elektronowe/Electron beam welding	76	Rys. 3.1 d)
5	Spawanie laserowe/Laser beam welding	751	Rys. 3.1 e)
6	Spawanie hybrydowe/Hybrid welding (brak w [27])	-	Rys. 3.1 f)

Oprócz metod zestawionych w Tab. 3.1 do spawania aluminium i jego stopów można zastosować – choć w chwili obecnej w bardzo ograniczonym zakresie – spawanie łukowe elektrodą węglową, spawanie łukowe elektrodą otuloną (MMA) oraz spawanie gazowe. Jednak, w produkcji przemysłowej, uważane są za metody tzw. archaiczne (MMA może być stosowana do tzw. „poprawek”).

Z uwagi na to, że temat niniejszego opracowania dotyczy analizy tzw. nowoczesnych technologii spawania, skupiono się tylko na technologiach najczęściej wykorzystywanych (patrz Tab. 3.1). Pomimo tego, że TIG i MIG w swojej konwencjonalnej odmianie nie należą do technologii innowacyjnych (jak pozostałe z zestawionych Tab. 3.1), to nadal, dzięki swoim zaletom, stanowią dla nich praktyczną alternatywę..



Rys. 3.1. Schematy metod spawania aluminium: a) TIG, b) MIG, c) PAW, d) EBW, e) LBW, f) HLAW (LBW+MIG)

3.1 Spawanie metodą TIG

W metodzie TIG elektroda wolframowa umieszczona jest w dyszy, do której doprowadzony jest gaz osłonowy (Rys. 3.1 a). Elektroda jest podłączona do jednego bieguna źródła prądu, do drugiego zaś spawany przedmiot. Po zajarzeniu łuku, utrzymującego się między elektrodą a spawanym przedmiotem, nadtapia się miejscowo przedmiot oraz wprowadzone równocześnie do przestrzeni łuku spoiwo. Z ciekłego metalu kształtuje się spoina.

Spawanie aluminium i jego stopów metodą TIG prowadzi się zwykle z zastosowaniem prądu przemiennego (o przebiegu sinusoidalnym). W nowoczesnych, inwertorowych urządzeniach do spawania, wykorzystywany jest prostokątny przebieg prądu przemiennego.

Przed przystąpieniem do spawania elektroda wolframowa powinna zostać odpowiednio przygotowana poprzez zapstrzenie oraz szlifowanie. Do spawania aluminium i jego stopów prądem przemiennym elektrodę szlifuje się na stożek o kącie rozwarcia $90\div 120^\circ$. Przed rozpoczęciem spawania należy na zaostrzonej końcówce elektrody utworzyć powierzchnię półkolistą, najlepiej przez zajarzenie łuku elektrycznego na płytce dobiegowej lub płytce grafitowej.

W trakcie spawania należy zwracać uwagę na odpowiednie obciążenie prądowe elektrody. Zbyt mała średnica elektrody dla danego natężenia prądu może spowodować jej przegrzanie i nadtapianie kocówki, co doprowadzi do wtrąceń wolframu w spoinie. Natomiast zbyt duża średnica elektrody dla danego natężenia prądu może spowodować problemy ze stabilnością łuku oraz zwiększenie szerokości jeziora ciekłego metalu. Elektroda nie powinna wystawać z dyszy gazowej na odległość większą niż 6 mm (jeśli dysza ogranicza dostęp do miejsca spawania, wyjątkowo, odległość ta może wynosić do 10 mm).

Podczas spawania powinno się utrzymywać jak najkrótszy łuk, o długości równej średnicy elektrody wolframowej. Nadmierna długość łuku może być przyczyną: braku przetopu, podtopień, zbyt dużej szerokości lica i mało estetycznej spoiny. Może również zostać zaburzona osłona gazowa, co spowoduje powstanie porowatości i wtrącenia tlenków w spoinie.

W przypadku spawania blach o różnej grubości łuk powinien być skierowany w stronę blachy o grubości większej. Dopuszczalne jest wykonywanie ruchów

poprzecznych (zakosowych) podczas spawania. Jednak ich amplituda (szerokość zakosu) powinna być ograniczona do wielkości średnicy dyszy gazowej. Wprowadzając spoiwo należy zwrócić uwagę, aby nie spowodować zetknięcia go z elektrodą wolframową. Spoiwo wprowadza się ruchem skokowo – wstecznym. Nie powinno być ono wprowadzane bezpośrednio w strefę słupa łuku ponieważ może to być przyczyną rozprysku – a w konsekwencji zanieczyszczenia elektrody wolframowej.

3.2 Spawanie metodą MIG

Spawanie MIG polega na stapianiu spawanego metalu i materiału elektrody topliwą ciepłem łuku elektrycznego jarzącego się pomiędzy elektrodą topliwą i spawanym przedmiotem, w osłonie gazu obojętnego (Rys. 3.1 b).

Zapewnienie stabilnego przebiegu procesu spawania stopów aluminium oraz uzyskanie złączy o dobrej jakości, metodą MIG wymaga: dobrania odpowiedniej technologii spawania, zastosowania właściwych urządzeń – wyposażonych w odpowiedni układ podawania drutu elektrodowego. Drut aluminiowy (ze względu na dużą elastyczność i małą twardość) podawany jest w miejsce spawania za pomocą tzw. układu pchającego (typu „push”), co może powodować jego wyginanie i zacinanie, skutkując nierównomiernym podawaniem drutu do uchwytu. Wpływa to na stabilność łuku i sprzyja powstawaniu niezgodności spawalniczych (w skrajnych przypadkach może dochodzić do zwijania i plątania drutu przy podajniku). Dlatego do spawania stopów aluminium, szczególnie przy użyciu drutów typu AlSi o niewielkich średnicach (1,2 mm, i mniejszych) zaleca się stosowanie układów podających typu „push-pull”. Układ taki składa się z dwóch zestawów rolek: „push” znajdującego się w podajniku oraz „pull” przy uchwycie spawalniczym. Pozwala to na bardzo precyzyjne prowadzenie drutu. Takie systemy stosowane są w przypadku zrobotyzowanego spawania metodą MIG stopów aluminium, gdzie wymaga się dokładnego podawania drutu, ze stałą, dużą prędkością. Rozwiązanie takie pozwala uzyskać dobrą wydajność spawania przy wysokiej jakości złączy.

Do drutów aluminiowych należy stosować przewodniki teflonowe lub grafitowe minimalizujące tarcie. Zapewniają one bardziej stabilne przesuwanie się drutu w przewodniku i eliminują możliwość zatarcia oraz zakleszczenia się drutu w układzie prowadzącym. Ponadto do podawania drutów aluminiowych należy stosować

odpowiednie rolki o przekrojach rowków półkolistych, gładko szlifowanych, dostosowanych do średnicy drutu (powinny mieć one cztery rolki, co zapewni bardziej niezawodne podawanie drutu do strefy spawania).

Również końcówka prądowa stanowi istotny element obwodu spawania. Jest ona wykonana z miedzi lub brązu i osadzona w uchwycie spawalniczym, zapewniając kontakt prądowy między urządzeniem spawalniczym a materiałem dodatkowym. Należy zwracać uwagę na stan zużycia końcówki. Kończówka o nadmiernym stopniu zużycia jest zwykle przyczyną powstawania niezgodności typu: przyklejenia, braki przetopu, porowatość. Może też powodować niestabilności w jarzeniu się łuku.

Zaleca się, podczas spawania aluminium i jego stopów metodą MIG, prowadzić uchwyt spawalniczy prostoliniowo, prostopadle do spawanych blach, odchylając go od pionu o kąt $10\div 15^\circ$ w kierunku przeciwnym do kierunku spawania. Spawać należy łukiem krótkim, a odległość dyszy gazowej od materiału powinna wynosić ok. $12\div 15$ mm. Proces należy prowadzić bez przerywania (w miejscach przerw i ponownego zajarzania łuku zwykle powstają niezgodności kształtu – zbyt duże nadlewy lica spoiny). Najkorzystniejszą pozycją jest pozycja podolna. Przy spawaniu blach o większej grubości korzystnie jest stosować podkładki formujące grań spoiny (ze względu na objętość ciekłego metalu).

Bardzo istotnym etapem procesu spawania aluminium metodą MIG jest jego zakończenie. Jeśli w momencie kończenia procesu podawanie drutu zostanie gwałtownie zatrzymane – jezioro zakrzepnie, tworząc krater. Jeśli jezioro ciekłego metalu ma niewielkie wymiary – krater może stanowić zagłębienie na powierzchni spoiny. Natomiast jeśli jezioro jest duże – krater może przedłużyć się w stronę dolnej powierzchni złącza, tworząc pęcherz kanalikowy. Należy pamiętać, że w trakcie krzepnięcia metalu w kraterze naprężenia zwykle doprowadzają do powstawania pęknięć.

3.3 Spawanie plazmowe

Spawanie plazmowe jest podobne do spawania metodą GTAW. Istotna różnica między tymi metodami polega na tym, że plazma łuku jest zawężona dyszą w celu wytworzenia strumienia plazmy o wysokiej energii (Rys. 3.1 c), w której uzyskuje się temperatury rzędu pomiędzy ok.. $10\ 000^\circ\text{C}$ a $20\ 000^\circ\text{C}$. Główną zaletą łuku

plazmowego jest prawie stały przekrój łuku na całej długości. Łuk plazmowy charakteryzuje się dużą stabilnością i elastycznością, co ma szczególne znaczenie przy zmechanizowanych procesach spawania.

Warunkiem wprowadzenia PAW do łączenia elementów ze stopów aluminium jest dysponowanie urządzeniami plazmowymi, umożliwiającymi spawanie prądem przemiennym.

W porównaniu do spawania stopów aluminium metodami TIG oraz MIG, spawanie plazmowe zapewnia:

1. Większą łatwość jarzenia łuku (dzięki zastosowaniu łuku pomocniczego).
2. Dużą stabilność łuku oraz niewielką jego wrażliwość na zmiany odległości uchwyty spawalniczego od spawanego materiału.
3. Duży stopień koncentracji łuku oraz wysoką gęstość mocy. Prowadzi to do: uzyskania głębszych głębokości wtopienia, węższej spoiny i SWC, a tym samym mniejszych odkształceń elementów spawanych.
4. Dużą elastyczność oraz precyzję doboru parametrów, co umożliwia prowadzenie zmechanizowanego procesu spawania: ze znacznie większą wydajnością, zapewniającą szybki dobór najbardziej korzystnych parametrów, charakteryzujących się niską temperaturą topnienia.
5. Większą sprawność energetyczną łuku.
6. Wykonanie złączy o mniejszych szerokościach i prawie równoległych liniach wtopienia, co przyczynia się do minimalnych odkształceń spawalniczych oraz zapewnia estetykę spoin na wyższym poziomie.

PAW zapewnia dokładną kontrolę energii łuku, jako funkcji natężenia prądu i związanych z tym rozmiarów dysz gazowych, a także rodzaju i natężenia przepływu gazu plazmowego.

3.4 Spawanie elektronowe

Spawanie elektronowe polega na stopieniu obszaru styku łączonych przedmiotów ciepłem uzyskanym przez bombardowanie go w próżni skoncentrowaną wiązką elektronów o dużej energii, emitowaną z katody żarzonej i przyspieszonej wysokim napięciem (ok. 30÷200 kV). Katoda wolframowa nagrzewana jest prądem ze źródła

jarzenia. Emitowane z katody elektrony, skupione w postaci cienkiej wiązki, poruszają się z dużą prędkością w kierunku anody i dalej w kierunku spawanego przedmiotu. Spawany przedmiot jest przesuwany na stoliku krzyżowym (Rys. 3.1 d). Duże skupienie wiązki elektronów osiąga się za pomocą elektrody sterującej oraz soczewek magnetycznych. Nośnikiem energii w procesie spawania jest strumień elektronów, przyspieszany do prędkości około 200 tys. km/s.

Stopy aluminium, o szerokim zakresie grubości (tj.: 0,5÷500 mm), są na ogół dobrze spawalne przy użyciu wiązki elektronów. Przy tej technologii nie są wymagane żadne specjalne zabiegi dotyczące usuwania warstewki tlenków, ani stosowanie gazu ochronnego. Wiązka elektronów, bez trudu, rozrywa warstwę tlenków, a próżnia chroni przed oddziaływaniem szkodliwych gazów.

Ograniczenia występujące podczas spawania stopów aluminium EBW wynikają z wpływu składników stopowych na przebieg procesu spawania. W grupie stopów do przeróbki plastycznej o przydatności danego stopu do spawania decyduje zawartość magnezu. Wraz ze wzrostem Mg (do ok. 1÷2%) skłonność do pęknięć gorących początkowo wzrasta, następnie maleje – ale pojawia się, z kolei, niebezpieczeństwo powstawania porowatości w wyniku wzmagającego się odparowania magnezu w próżni.

W przypadku stopów aluminium utwardzalnych wydzieleniowo bardzo dobrą spawalnością charakteryzują się niektóre stopy uznawalne za niespawalne metodami łukowymi (np. AlCuMg2).

Na przydatność stopów aluminium do spawania elektronowego wpływa również zawartość w nich krzemu oraz cynku. Cynk charakteryzuje się dużą prężnością par, łatwo odparowuje w próżni i wpływa na zwiększoną porowatość spoin.

3.5 Spawanie laserowe

Proces spawania laserowego polega na stapianiu obszaru styku łączonych przedmiotów ciepłem otrzymanym w wyniku doprowadzenia do tego obszaru skoncentrowanej wiązki promieniowania laserowego o bardzo dużej gęstości mocy (Rys. 3.1 e). Spawanie odbywać się może przez tworzenie jeziora spawalniczego, jak w klasycznym spawaniu łukowym, lub z pełnym przetopieniem złącza w jednym przejściu lub wielowarstwowo, bez lub z materiałem dodatkowym.

Aluminium i jego stopy charakteryzują się niskim współczynnikiem absorpcji promieniowania laserowego. Absorbowanie promieniowania wzrasta ze zmniejszaniem długości fali promieniowania i wzrostem temperatury aluminium. W porównaniu ze stałą wymagane są większe gęstości mocy niezbędne do inicjacji procesu spawania i utworzenia kanału gazodynamicznego.

Literatura fachowa podaje minimalne wartości gęstości mocy niezbędne do zainicjowania procesu spawania z głębokim przetopieniem stopów aluminium. Są to: $1.5 \cdot 10^6$ W/cm², dla długości fali promieniowania 1,06 μ m (lasery Nd:YAG) i $4 \cdot 10^6$ W/cm², dla długości fali promieniowania 10,6 μ m (lasery CO₂). Dlatego do spawania laserowego aluminium stosowane są najczęściej lasery typu YAG oraz lasery światłowodowe (włóknowe).

Ze względu na wysoki współczynnik odbicia promieniowania laserowego, dużą przewodność i rozszerzalność cieplną, niską lepkość i niskie napięcie powierzchniowe ciekłego metalu, duże powinowactwo aluminium do tlenu, skłonność do porowatości spoin i utraty składników stopowych w spoinie, w procesie spawania laserowego mogą pojawić się miejscowe braki przetopu, pory i pęcherze, podtopienia i wycieki od strony grani spoiny. Proces spawania jest bardzo czuły na wszelkiego rodzaju zakłócenia, a zakres stabilnych parametrów spawania jest stosunkowo wąski. Spawalność stopów aluminium zależy od gatunku stopu (składu chemicznego). Niektóre stopy, ze względu na zwiększoną skłonność do pęknięcia gorącego, powinny być spawane z dodatkiem materiału dodatkowego modyfikującego skład chemiczny spoiny. Stopami o ograniczonej spawalności są m.in. stopy serii 6000 (typu AlMgSi), których wysoką wytrzymałość uzyskuje się w wyniku utwardzania dyspersyjnego. Podstawowy problem metalurgiczny przy spawaniu tych stopów stanowi pęknięcie gorące spoin, spowodowane obniżoną wytrzymałością obszarów wydzieleni fazy β (Mg₂Si), które w momencie krzepnięcia części jeziora spawalniczego o składzie fazy α (roztwór stały) pozostają w stanie ciekłym (niższa temperatura topnienia). Powstające w czasie spawania naprężenia poprzeczne powodują, w połączeniu z segregacją fazy Mg₂Si, podwyższoną skłonność spoin do pęknięcia gorącego. Podstawową zasadą, pozwalającą na ograniczenie występowania pęknięć gorących jest zmniejszenie udziału fazy β w spoinie (rozcieńczenie metalurgiczne), co można osiągnąć poprzez zastosowanie materiału dodatkowego do spawania o odpowiednim składzie chemicznym (stopy serii 4xxx i 5xxx, a więc Al-Si i Al-MgSi). Zmniejszenie poziomu naprężeń poprzecznych osiąga się m.in. przez zastosowanie odpowiedniej geometrii rowka spawalniczego (kąt

ukosowania, odstęp) lub poprzez zastosowanie materiału dodatkowego o niższej temperaturze topnienia niż dla materiału spawanego. Jednak podawanie materiału dodatkowego powoduje znaczne zmniejszenie wydajności spawania i wymaga stosowania laserów o dużo większej mocy.

3.6 Spawanie hybrydowe

Spawanie hybrydowe polega na jednoczesnym użyciu dwóch źródeł ciepła: wiązki promieniowania laserowego i łuku elektrycznego. Można stosować różne zestawienia źródeł ciepła, np.: laser CO₂ lub Nd:YAG + TIG, laser CO₂ lub Nd:YAG + MIG, laser CO₂ lub Nd:YAG + spawanie plazmowe. Proces hybrydowy wymaga specjalistycznego stanowiska zapewniającego precyzyjne wzajemne usytuowanie dwu źródeł ciepła (Rys. 3.1 f). Możliwe jest też wykorzystanie specjalnych głowic, w których wiązka laserowa jest otoczona koncentrycznie przez łuk elektryczny lub plazmowy.

Spawanie hybrydowe łączy głębokie wtopienie wiązki laserowej z dobrym wypełnieniem rowka (szczeliny) w procesie spawania łukowego. Równocześnie wiązka laserowa stabilizuje łuk i sprzyja poprawie sprawności cieplnej procesu. Wybór odmiany spawania hybrydowego zależy od spawanego materiału i jego grubości.

Coraz częściej, w alternatywie dla spawania laserowego, do łączenia stopów aluminium stosuje się proces hybrydowy, w którym najlepsze efekty pod względem wydajności spawania uzyskuje się łącząc wiązkę laserową z metodą MIG.

Proces spawania hybrydowego laser YAG + MIG umożliwia modyfikację składu chemicznego spoiny poprzez podawanie materiału dodatkowego, co daje możliwość spawania stopów wrażliwych na pękanie gorące oraz spawanie złączy ze stopu aluminium przygotowanych ze szczeliną (co daje możliwość mniej dokładnego przygotowania krawędzi spawanych elementów). Przygotowanie złącza ze szczeliną pozwala również na znaczące zwiększenie prędkości spawania oraz zwiększenie parametrów prądowych metody MIG. Wiązka laserowa nie jest zużywana na przetapianie materiału w stanie stałym, a jedynie na zwiększenie penetracji ciekłego metalu jeziora utworzonego metodą MIG. Jednak spawanie złączy ze szczeliną zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia pęcherzy gazowych w spoinie, uzyskanie wypukłości lica jest trudne, a grań spoiny jest nierówna, z licznymi niewielkimi sopłami i kolcami.

4 Analiza nowoczesnych technologii spawania materiałów

Celem analizy jest ocena przydatności wybranych technologii spawania do łączenia elementów konstrukcji kadłubów jednostek pływających wykonanych ze stopów aluminium.

4.1 Ocena wielowskaźnikowa

Oceny przydatności technologii spawania dokonano na podstawie tzw. wielokryterialnej (wielowskaźnikowej) metody eksperckiej. Metoda ta oparta jest kilku podstawowych krokach:

1. Określeniu celu analizy oraz wyboru „obiektów” poddawanych ocenie.
2. Sformułowaniu zbioru kryteriów, definiujących poszukiwany zespół cech, które opisują wybrane „obiekty”.
3. Określeniu zasad oceny w oparciu o ustalone kryteria.
4. Przeprowadzeniu oceny, dla każdego z analizowanych „obiektów” oraz wybór najlepszego/najlepszych z nich.

„Obiektami” poddanymi wielokryterialnej ocenie są wybrane technologie spawania aluminium przedstawione w Tab. 3.1 oraz zobrazowane na Rys. 3.1.

Scharakteryzowana metoda ma bardzo szerokie, interdyscyplinarne, zastosowanie. W każdym przypadku, poprzez indywidualny zbiór kryteriów, tworzy wyjątkowe narzędzie oceny, zwłaszcza inżynierskiej. Metodę ekspercką wykorzystywano do analizy zagadnień z dziedziny technologii okrętowej, tj. przy ocenie:

1. Technologiczności połączeń innowacyjnych elementów konstrukcyjnych (tj.: połączeń panel sandwich – panel sandwich, [29] oraz połączeń panel sandwich – konwencjonalna płyta poszycia, [31]).
2. Techniczno-technologicznej (środków trwałych) jednej z polskich stoczní, [20].
3. Wpływu postaci odkształceń spawalniczych węzła konstrukcyjnego na przydatność montażową, [30].

4.2 Sformułowanie zbioru kryteriów oceny

Do oceny poszczególnych form odkształceń wybrano osiem kryteriów, przedstawionych w Tab. 4.1. Kryteria te, w opinii autora, pozwalają w rzetelny sposób osiągnąć cel prezentowanej analizy.

Tab. 4.1. Kryteria oceny wybranych technologii spawania

L. p.	Nazwa	Symbol	Opis
1	Kryterium funkcjonalności (pracy)	K1	Dotyczy sprawności kinematycznej urządzeń spawalniczych (realizowane ruchy robocze), w tym systemu ich pracy (tj. np.: ręczny, automatyczny) oraz związanymi z nim dodatkowymi czynnościami (np. potrzeba obrotów spawanych elementów).
2	Kryterium wydajności (czasu)	K2	Dotyczy wydajności ocenianej technologii w procesie produkcyjnym (tj.: w szczególności czasu spawania).
3	Kryterium inwestycyjne	K3	Dotyczy stopnia nakładów finansowych związanych z wprowadzeniem technologii do cyklu produkcyjnego (koszty: wyposażenia i utrzymania stanowiska, kwalifikacji personelu).
4	Kryterium kosztów produkcji	K4	Dotyczy stopnia zużywalności mediów (energetycznych oraz spawalniczych) niezbędnych do przeprowadzenia procesu oraz kosztów robocizny i przygotowania produkcji.
5	Kryterium jakości (jakości złącza)	K5	Dotyczy szacunkowego poziomu jakości uzyskiwanych spoin, a tym samym konieczności przeprowadzania poprawek usuwających niezgodności spawalnicze.
6	Kryterium deformacyjności (przydatności montażowej)	K6	Dotyczy szacunkowego poziomu generowania odkształceń spawalniczych, a tym samym konieczności przeprowadzania prac korekcyjnych (tj. głównie prostowania).
7	Kryterium BHP	K7	---
8	Kryterium ryzyka (zagrożenia ekologicznego)	K8	Dotyczy szacunkowej oceny wielkości emisji szkodliwych substancji wydzielanych w trakcie procesu spawania do środowiska naturalnego.
9	Kryterium adaptacyjności (dostosowania)	K9	Dotyczy możliwości dostosowania technologii spawania do specyfiki warunków pracy przemysłu okrętowego (głównie etapów prefabrykacji sekcji).

4.3 Określenie zasad oceny

Wybrane technologie spawania oceniano niezależnie wg kryteriów (Tab. 4.1) w skali punktowej od 0 do 5. Im wyższa ocena tym większa przydatność danej technologii spawania. Wszystkie kryteria doprowadzono do postaci bezwymiarowej poprzez ich

podział przez maksymalną liczbę punktów, jakie można nadać określone kryterium, tj. przez 5.

Dla każdej analizowanej technologii spawania wykreślano 9-parametryczny wykres radarowy. Powierzchnia wykresu jest kryterium zgeneralizowanym do oceny przydatności technologii w procesie spawania aluminium. W przypadku idealnym każde z 9 kryteriów ma bezwymiarową wartość równą 1. Pole wykresu radarowego dla obiektu idealnego wynosi 2,891. Ocenę wpływu przydatności technologii spawania, w zależności od powierzchni „p” wykresu radarowego, przedstawiono w Tab. 4.2.

Tab. 4.2. Ocena przydatności technologii spawania w zależności od powierzchni wykresu radarowego

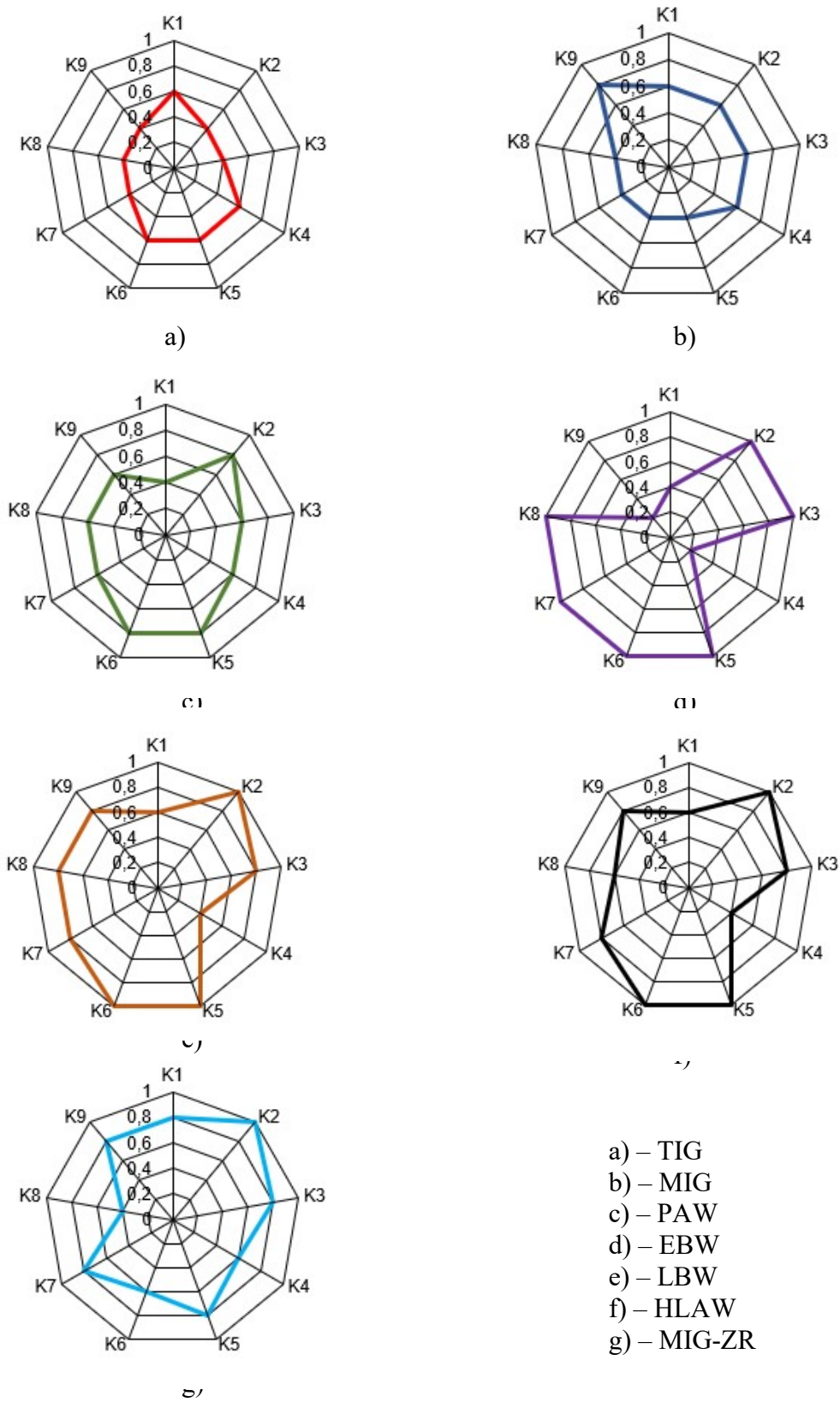
L.p.	Przydatność technologii spawania	Wartość pola powierzchni wykresu radarowego [-]
1	Bardzo dobra	$2,169 < p$
2	Dobra	$1,446 < p \leq 2,169$
3	Dopuszczalna	$0,723 < p \leq 1,446$
4	Zła	$p < 0,723$

4.4 Wyniki oceny

Wyniki wielokryterialnej oceny dla przeprowadzonej analizy zamieszczono w Tab. 4.3 oraz zobrazowano na Rys. 4.1 i Rys. 4.2.

Tab. 4.3. Ocena przydatności technologii spawania aluminium

L.p.	Kryterium oceny	Ocena w skali punktowej (od 0 do 5) dla wybranych technologii spawania						
		TIG	MIG	PAW	EBW	LBW	HLAW	MIG-ZR
1	Kryterium funkcjonalności (pracy)	3	3	2	2	3	3	4
2	Kryterium wydajności (czasu)	2	3	4	5	5	5	5
3	Kryterium inwestycyjne	2	3	3	5	4	4	4
4	Kryterium kosztów produkcji	3	3	3	1	2	2	3
5	Kryterium jakości (jakości złącza)	3	2	4	5	5	5	4
6	Kryterium deformacyjności (przydatności montażowej)	3	2	4	5	5	5	3
7	Kryterium BHP	2	2	3	5	4	4	4
8	Kryterium ryzyka (zagrożenia ekologicznego)	2	2	3	5	4	3	2
9	Kryterium adaptacyjności (dostosowania)	2	4	3	1	4	4	4
10	Pole pow. wykresu radarowego, [-]	0,694	0,835	1,195	1,632	1,825	1,722	1,542
11	Udział pola pow. wykresu ocenianej technologii spawania do pola pow. wykresu idealnego, [%]	24,003	28,892	41,338	56,451	63,118	59,562	53,339
12	Hierarchia technologiczna	7	6	5	3	1	2	4



Rys. 4.1. Zestawienie wykresów radarowych dla ocenianych technologii spawania



Rys. 4.2. Zestawienie wartości pól wykresów radarowych opisujących poziom przydatności ocenianych technologii spawania

Na podstawie otrzymanych wyników (patrz Tab. 4.3 oraz Rys. 4.1 i Rys. 4.2.) stwierdzono, że:

- większość technologii spawania poddanych ocenie (tj. cztery z siedmiu) uzyskało przydatność na poziomie dobrym,
- dwie z technologii spawania uzyskało przydatność na poziomie dostatecznych,
- jedna z technologii uzyskała zły poziom przydatności,
- żadna z technologii spawania poddanych ocenie nie uzyskała przydatności na poziomie bardzo dobrym.

Przeprowadzona analiza ekspercka pozwala na wprowadzenie tzw. hierarchii technologicznej, ułatwiającej uszeregowanie ocenianych technologii spawania, od najmniej do najbardziej znaczących, pod kątem ich przydatności do łączenia elementów konstrukcji kadłubów jednostek pływających wykonanych ze stopów aluminium (wiersz 12 Tab. 4.3).

Fakt nie uzyskania przez żadną z ocenianych technologii spawania najwyższego poziomu przydatności może świadczyć o trafnym doborze kryteriów oceny oraz jej poprawności merytorycznej.

Zauważono (patrz Tab. 4.3 oraz Rys. 4.2.), że w obszarze, który określa dobry poziom przydatności technologii spawania znajdują się trzy technologie, które można

zakwalifikować do tzw. technologii innowacyjnych (tj. EBW, LBW oraz HLAW) oraz jedna technologia konwencjonalna (zmodernizowana, tj. tj. MIG-ZR) z wykorzystaniem robota przegubowego. Różnice pomiędzy udziałami pól powierzchni wykresów radarowych poszczególnych technologii do pola powierzchni wykresu idealnego, są znikome, tzn. na poziomie: $4\div 10\%$ (wiersz 11 Tab. 4.3). Świadczy to o tym, że nie ma zdecydowanie wiodącej technologii spawania, a pierwsze cztery (z hierarchii technologicznej) można traktować jako równorzędne.

Kolejne dwie technologie spawania, usytuowane w hierarchii technologicznej odpowiednio na miejscach: piątym oraz szóstym (tj. PAW oraz MIG), uzyskały dostateczny poziom przydatności. Różni je 0,35 p wartości pola powierzchni wykresu radarowego. Należy pamiętać, że MIG należy do technologii konwencjonalnych, natomiast PAW, w szczególności w systemie automatycznym można zakwalifikować do technologii będącej na „pograniczu” innowacyjnych. Dlatego, z dużą dozą prawdopodobieństwa można założyć, że zastosowanie technologii MIG w systemie zautomatyzowanym dałoby zbliżoną pozycję w hierarchii technologicznej, co oceniana PAW.

Technologia konwencjonalna TIG uzyskała zły poziom przydatności, jednak należy zauważyć, że do poziomu dobrego zabrakło jej zaledwie 0,029 p wartości pola powierzchni wykresu radarowego. Fakt ten dowodzi, że granice pomiędzy poszczególnymi obszarami, które określają poziom przydatności danej technologii spawania powinno się traktować elastycznie i rozpatrywać w zależności od indywidualnej sytuacji, związanej przede wszystkim z założoną technologią prefabrykacji oraz ustalonymi wymaganiami jakościowymi.

5 Podsumowanie

Wielkogabarytowe konstrukcje okrętowe, w tym wykonane ze stopów aluminium, charakteryzują się dużą powtarzalnością konstrukcyjno-technologiczną. Dlatego można się w nich spodziewać problemów natury produkcyjnej (technologicznej) o porównywalnej skali trudności. Warto zatem stworzyć hierarchię technologiczną ułatwiającą usystematyzowanie technologii spawalniczych. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do technologii nowoczesnych, zaadoptowanie których do cyklu produkcyjnego może okazać się korzystne w długofalowym planowaniu strategii przedsiębiorstwa.

Przedstawiona w opracowaniu wielokryterialna metoda ekspercka pozwala na określenie poziomu przydatności wybranych technologii spawania do łączenia elementów konstrukcji kadłubów jednostek pływających wykonanych ze stopów aluminium.

6 Bibliografia

- [1] Ashby M., Shercliff H., Cebon D.: Materials engineering, science, processing and design. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann Elsevier, Oxford, 2010.
- [2] Anderson T., New developments within the Aluminum Shipbuilding Industry, Svetsaren, 2003, 58(1), 3–5.
- [3] Anderson T. How to avoid cracking in aluminum alloys. Welding Journal, 2005, 9.
- [4] Armao F. G.: 11 Tips for Welding Aluminum in the Shipbuilding Industry. Technical Article. The Lincoln Electric Company. MC16-96 (<https://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/mc1696.pdf>).
- [5] Al Obeidi A. Hadi.: Spawane konstrukcje okrętowe ze stopów aluminium. Przegląd Spawalnictwa, 2009, 2: 29-31.
- [6] Chmielewski T.: Projektowanie procesów technologicznych – spawalnictwo. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [7] Cudny K. (red.): Metaloznawstwo okrętowe. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
- [8] Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. WNT, Warszawa, 2017.
- [9] Dobrzański L. A: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, WNT, Warszawa 2002.
- [10] Dobrzański L. A: Metaloznawstwo opisowe stopów metali nieżelaznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
- [11] Ferenc K.: Spawalnictwo. WNT, Warszawa 2007.
- [12] Ferenc K. (red.): Technika spawalnicza w praktyce. Poradnik inżyniera, konstruktora i technologa. Verlag Dashofer Sp. z o.o. Warszawa 2011.
- [13] Ferenc K.: Podręcznik spawania aluminium i jego stopów metodą TIG. Agencja Wydawnicza SIMP, Warszawa 2017.
- [14] Gourd L. M.: Podstawy technologii spawalniczych, WNT, Warszawa 1997.
- [15] Ion J. C.: Laser beam welding of wrought aluminum alloys. Science and Technology of Welding and Joining 2000, 2.
- [16] Irving B.: Welding the four most popular aluminum alloys. Welding Journal, 1994, 2.

- [17] Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [18] Knipström K. E.: New welding method for aluminum. Svetsaren, 1995, 3.
- [19] Mathers G.: The welding of aluminum and its alloys. Woodhead Publishing Ltd., Cambrige, 2002.
- [20] Metschkow B., Górski Z., Iwańkiewicz R., Piskorski Ł., Urbański T.: Ocena techniczno-technologiczna Stoczni Szczecińskiej Nowa sp. z o. o., dokument nr 9: Ocena stanu technicznego środków trwałych, Szczecin, maj 2007 (wykonano na zlecenie firmy Ernst & Young Polska).
- [21] Mizerski J.: Spawanie w osłonie gazów metodami MIG i MAG, Podręcznik dla spawaczy i personelu nadzoru spawalniczego, Wydawnictwo REA, Warszawa 2007.
- [22] Mizerski J.: Spawanie w osłonie gazów metodą TIG, Podręcznik dla spawaczy i personelu nadzoru spawalniczego, Wydawnictwo REA, Warszawa 2008.
- [23] Olabode M., Kah P., Martikainen J.: Aluminium alloys welding processes: Challenges, joint types and process selection. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(8): 1129-1137.
- [24] Pilarczyk J., Pilarczyk J.: Spawanie i napawanie elektryczne metali, Wydanie drugie uzupełnione, „Śląsk” Spółka z o.o., Katowice 1996.
- [25] Pilarczyk J. (red.): Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. Tom 1. WNT, Warszawa 2003.
- [26] Pilarczyk J. (red.): Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. Tom 2. WNT, Warszawa 2005.
- [27] Pilarczyk J., Banasik M., Dworak J., Stano S.: Spawanie hybrydowe z wykorzystaniem wiązki laserowej i łuku elektrycznego. Przegląd Spawalnictwa, 2007, 10: 44-48. Sebastian Stano
- [28] Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich, część. IX Materiały i spawanie. Polski Rejestr Statków, Gdańsk 2021.
- [29] Pyszko R.: Zastosowanie stalowych paneli typu sandwicz w konstrukcjach okrętowych i oceanotechnicznych. Rozprawa doktorska. Katedra Technologii Okrętu, Systemów Jakości i Materiałoznawstwa. Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2006.

- [30] Urbański T.: The influence of welding deformation types of hybrid node on assembly suitability, *Postępy Nauki i Techniki*, 2012, nr 16, ISSN 2080-4075, str. 42-47.
- [31] Urbański T.: Assessment of the productibility of hybrid nodes using the multi-criteria method, *Advances in Science and Technology Research Journal*, Volume 8, No. 22, June 2014, ISSN 2299-8624, pp. 31–36.
- [32] Woźny P.: Badanie wpływu parametrów spawania stopu aluminium AW 5754 metodą TIG na jakość spoiny. Rozprawa doktorska. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. Warszawa, 2018.
- [33] ISO 4063:1990 Welding, brazing, soldering and braze welding of metals - Nomenclature of processes and reference numbers for symbolic representation on drawings.
- [34] PN-EN ISO 18273: 2006 Materiały dodatkowe do spawania – Druty elektrodowe, druty i pręty do spawania aluminium i stopów aluminium – Klasyfikacja.
- [35] PN-EN ISO 14175: 2008 Materiały dodatkowe do spawania – Gazy i mieszaniny gazów do spawania i procesów pokrewnych.
- [36] PN-EN ISO 9602-3 Spawanie i procesy pokrewne. Zalecenia dotyczące przygotowania złączy. Część 3: Spawanie aluminium i jego stopów elektrodą metalową i elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych.

7 Załączniki

Tab. 7.1. Ogólne przeznaczenie spoiw do spawania aluminium i jego stopów [34]

[illegible]

Spis rysunków

Rys. 2.1. Klasyfikacja stopów aluminium w zależności od składu chemicznego, [12] ...	7
Rys. 3.1. Schematy metod spawania aluminium: a) TIG, b) MIG, c) PAW, d) EBW, e) LBW, f) HLAW (LBW+MIG)	17
Rys. 4.1. Zestawienie wykresów radarowych dla ocenianych technologii spawania.....	29
Rys. 4.2. Zestawienie wartości pól wykresów radarowych opisujących poziom przydatności ocenianych technologii spawania	30

Spis tabel

Tab. 2.1. Wybrane własności aluminium	5
Tab. 2.2. Poglądowa ocena wpływu składników stopowych na własności stopów aluminium dla poszczególnych serii, [13]	6
Tab. 2.3. Zastosowanie serii (grup) aluminium i jego stopów	8
Tab. 2.4. Właściwości wpływające na spawalność aluminium i jego stopów.....	10
Tab. 2.5. Podstawowa charakterystyka argonu i helu.....	12
Tab. 2.6. Przykładowe sposoby przygotowania brzegów blach z aluminium i jego stopów do spawania (na podst.[36])	15
Tab. 3.1. Technologie spawania aluminium i jego stopów	16
Tab. 4.1. Kryteria oceny wybranych technologii spawania.....	26
Tab. 4.2. Ocena przydatności technologii spawania w zależności od powierzchni wykresu radarowego	27
Tab. 4.3. Ocena przydatności technologii spawania aluminium	28
Tab. 7.1. Ogólne przeznaczenie spoiw do spawania aluminium i jego stopów [34].....	36