



POLITECHNIKA RZESZOWSKA
im. Ignacego Łukasiewicza
WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA
KATEDRA ODLEWNICTWA I SPAWALNICTWA

Bartłomiej Kucel

**ANALIZA WPLYWU PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH SPAWANIA
CIENKOŚCIENNYCH ELEMENTÓW STOSOWANYCH W BUDOWIE
SILNIKA LOTNICZEGO NA MINIMALIZACJĘ ICH DEFORMACJI**

Promotor pracy

Dr hab. inż. Marek Mróz, prof. uczelni

Opiekun pomocniczy

mgr. inż. Bartłomiej Pikul

RZESZÓW 2024

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania mojemu promotorowi, dr hab. inż. Markowi Mrozowi, za nieocenioną pomoc, merytoryczne wsparcie, a przede wszystkim za otwartość i gotowość do dzielenia się swoją wiedzą oraz doświadczeniem. Dzięki jego cennym wskazówkom i zaangażowaniu możliwe było ukończenie tej pracy. Jestem niezmiernie wdzięczny za poświęcony czas i wyrozumiałość w trakcie całego procesu badawczego.

Chciałbym także podziękować wszystkim pracownikom Katedry Odlewnictwa i Spawalnictwa Politechniki Rzeszowskiej za wsparcie, życzliwość oraz pomoc, które okazywali mi podczas realizacji moich badań. Wasza pomoc miała nieoceniony wpływ na jakość mojej pracy.

Spis treści

WPROWADZENIE	5
1. MATERIAŁY STOSOWANE W BUDOWIE SILNIKÓW LOTNICZYCH.....	7
1.1 Stale wysokostopowe.....	9
1.2 Stopy niklu.....	15
2. METODY SPAWANIA CZĘŚCI LOTNICZYCH	21
2.1 Spawanie metodą TIG	24
2.2 Spawanie wiązką elektronów.....	26
2.3 Spawanie wiązką lasera	30
3. NAPRĘŻENIA I DEFORMACJE SPAWALNICZE	35
3.1 Powstawanie naprężeń spawalniczych	35
3.2 Przewidywanie naprężeń – symulacje	44
3.3 Metody redukcji deformacji.....	48
4. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA I TEZA PRACY	51
5. BADANIA WŁASNE.....	56
5.1 Cel i program badań.....	56
5.2 Dobór materiału i kształtu próbek.....	57
5.3 Oprzyrządowanie i stanowisko do automatycznego spawania metodą TIG	60
5.4 Wykonanie próbných złączy spawanych.....	73
5.5 Pomiary złączy próbných po spawaniu	88
5.6 Badania nieniszczące próbných złączy spawanych	94
5.7 Obróbka cieplna próbných złączy spawanych.....	97
5.8 Pomiary próbných złączy spawanych po obróbce cieplnej	101
5.9 Analiza deformacji spawalniczych próbných złączy spawanych	106
5.9.1 Analiza stopnia odchylenia profilu od kształtu nominalnego	106
5.9.2 Analiza odkształcenia kąтового	110

5.9.3 Analiza skurczu poprzecznego.....	114
5.10 Badania niszczące złączy spawanych.....	116
5.10.1 Badanie metalograficzne.....	116
5.10.2 Pomiary twardości.....	135
5.10.3 Badania właściwości mechanicznych.....	138
6. WNIOSKI SZCZEGÓŁOWE I KOŃCOWE.....	144
7. PODSUMOWANIE PRACY.....	148
Streszczenie.....	149
Summary.....	151
Literatura.....	153
Spis rysunków.....	162
Spis tabel.....	171

WPROWADZENIE

Transport lotniczy, podobnie jak wszystkie inne sektory transportu, stoi przed nowymi wyzwaniami ukierunkowanymi na zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko. Transport ten odpowiada za 2% rocznej światowej emisji zanieczyszczeń. Konieczność redukcji emisji zanieczyszczeń i kosztów produkcji, a jednocześnie zwiększenie niezawodności statków powietrznych i komfortu pasażerów, sprzyja tworzeniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych, dotyczących metod i koncepcji systemów transportu lotniczego [1,2].

Nowoczesne i przyjazne dla środowiska systemy transportowe wymagają coraz lepszych konstrukcji, w których stosowane są nowe materiały. Rosnącemu zainteresowaniu innowacyjnymi materiałami towarzyszy rozwój metod i technik ich wytwarzania. W wyzwaniach tych nadal kluczowa jest jakość komponentów lotniczych, która decyduje o niezawodności konstrukcji lotniczych [2].

Konstrukcje lotnicze, dla spełnienia rygorystycznych kryteriów bezpieczeństwa, są często skomplikowane i wymagają precyzyjnego łączenia poszczególnych elementów. Jednym z tych procesów jest spawanie, a w szczególności metoda spawania łukowego w osłonie gazów ochronnych (TIG - Tungsten Inert Gas).

Procesy spawalnicze, nawet te najbardziej zaawansowane technologicznie, posiadają wady i ograniczenia, które wpływają na jakość konstrukcji spawanych. Jednym z kluczowych problemów, które dotyczą spawania metodą TIG jest deformacja elementów łączonych wynikająca z oddziaływania cyklu cieplnego procesu spawania. W przypadku części lotniczych deformacje te mogą prowadzić do problemów, takich jak nieodpowiednie dopasowanie elementów, a w skrajnych przypadkach uniemożliwić ich montaż w silniku. Z uwagi na to w przemyśle lotniczym stosuje się różne sposoby relaksacji naprężeń prowadzących do redukcji deformacji, takie jak zastosowanie odpowiedniego oprzyrządowania spawalniczego, dobór parametrów spawania, czy obróbka cieplna po spawaniu.

Deformacje i odkształcenia spawalnicze stanowią istotny problem w przypadku złączy spawanych cienkościennych elementów silników lotniczych. W literaturze technicznej jest niewiele opracowań opisujących metodologię opracowania konstrukcji oprzyrządowania spawalniczego, doboru parametrów spawania oraz ich wpływ na deformację cienkościennych elementów silników lotniczych, zwłaszcza wykonanych ze stali nierdzewnych i stopów niklu.

Dodatkowo wynika to z faktu, że opracowanie oprzyrządowania spawalniczego jest procesem skomplikowanym, a efekty opracowanej konstrukcji trudno jest określić na etapie jej projektowania.

W niniejszej pracy doktorskiej przedstawiono nową koncepcję procesu technologicznego spawania cienkościennych elementów silników lotniczych, w której usprawnienie procesu spawania polega na opracowaniu oprzyrządowania spawalniczego zapewniającego minimalizację deformacji spawalniczych oraz opracowaniu nowych założeń technologicznych wytwarzania tych elementów wraz z doбором parametrów technologicznych metody TIG. Rozwiązania te poddano weryfikacji i ocenie pod kątem jakości nowoopracowanych złączy spawanych cienkościennych elementów wykonanych ze stali 17-4 PH i ze stopu niklu Inconel 718, z wykorzystaniem metod oceny redukcji deformacji, badań nieniszczących, badań makro- i mikroskopowych oraz oceny właściwości mechanicznych.

Utylitarnym i wymiernym efektem pracy jest wdrożenie w warunkach przemysłowych firmy MB Aerospace nowoopracowanej technologii spawania cienkościennych elementów stosowanych w budowie silników lotniczych, zapewniającej minimalizację ich deformacji spawalniczych i tym samym redukcję kosztów produkcji poprzez eliminację konieczności napraw lub modyfikacji elementów po zakończeniu procesu spawania.

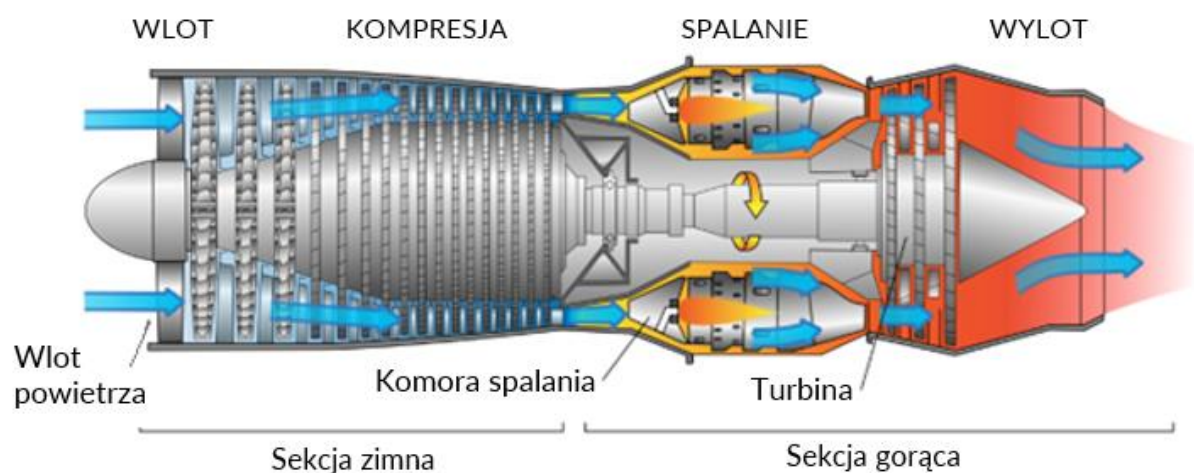
Praca ta stanowi wkład w dyscyplinę inżynieria mechaniczna, a jej wyniki mogą mieć zastosowanie nie tylko w przemyśle lotniczym, ale także w innych dziedzinach, gdzie precyzyjne i niezawodne połączenia są kluczowym elementem.

1. MATERIAŁY STOSOWANE W BUDOWIE SILNIKÓW LOTNICZYCH

Postępy w poszukiwaniu nowych materiałów oraz w sposobach ich wytwarzania są ogromne, a wiodącą dziedziną w tym obszarze jest przemysł lotniczy. Wraz z zastosowaniem nowych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych weryfikacji uleg muszą procesy produkcyjne.

Silniki lotnicze, oprócz osiągnięć napędowych, charakteryzuje zwartość konstrukcji, mała masa, niezawodność działania i trwałość, gwarantujące bezpieczeństwo podczas lotu samolotu. Wysokie wymagania stawiane tym konstrukcjom przekładają się na złożoność elementów silnika i procesów produkcyjnych ich wytwarzania oraz na ciągłe poszukiwania nowych rozwiązań i materiałów, mogących sprostać coraz to wyższym wymaganiom.

Silniki turbowentylatorowe oraz turboodrzutowe można podzielić na podstawowe sekcje zależne od temperatury pracy (Rys. 1), tj. sekcja zimna oraz sekcja gorąca [3]. Sekcja zimna silnika obejmuje wlot powietrza, sprężarkę lub wentylator oraz sekcję dyfuzora. Sekcja gorąca silnika obejmuje: komorę spalania, turbinę oraz wylot. Warunki pracy, a co za tym idzie wymagania stawiane materiałom zastosowanym w danej sekcji, różnią się znacząco między poszczególnymi sekcjami [4, 5].

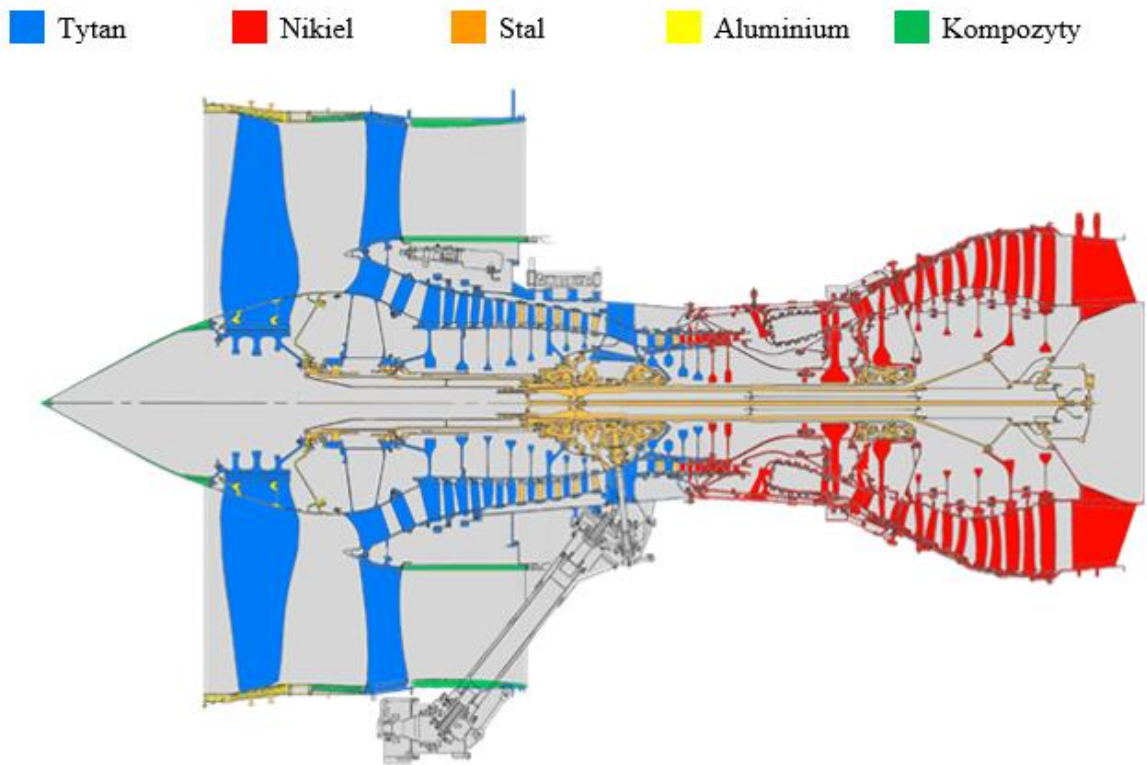


Rys. 1. Silnik turboodrzutowy [3]

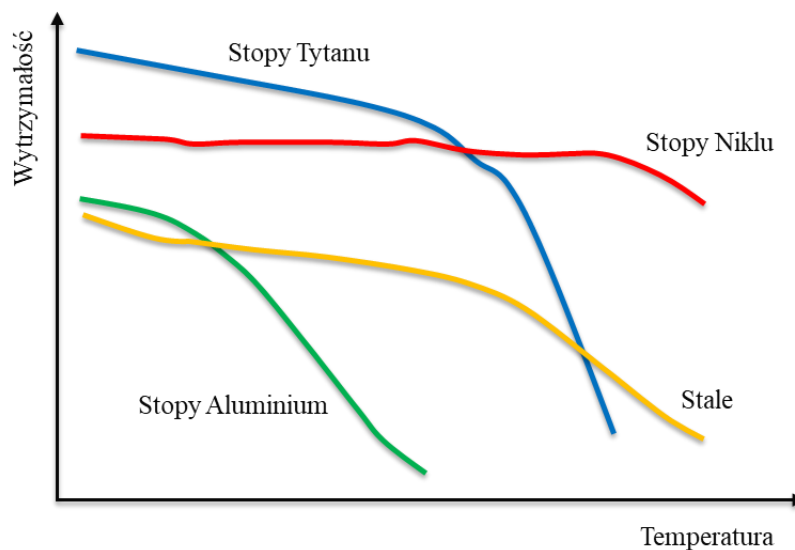
Aby silnik działał poprawnie niezbędne jest by zaszły w nim 4 procesy: zassanie, kompresja, zapłon i wyrzut spalin. Pierwsze dwa procesy, czyli zassanie i kompresja, zachodzą w przedniej części silnika nazwanej sekcją zimną. Kolejne dwa, tj. zapłon i wyrzut

spalin, zachodzą w tylnej części silnika zwanej sekcją gorącą. Zapłon zachodzi w komorze spalania (combustion chamber), gdzie mieszanina sprężonego powietrza i paliwa jest podpalana i „wyrzucana” poprzez turbinę na zewnątrz silnika. Temperatura w komorze spalania może sięgać 1400 °C [3].

Materiały wykorzystane do budowy silnika, są tak dobrane by spełnić wymagania sekcji w jakiej będą pracowały (Rys. 2, Rys. 3) [6, 7].

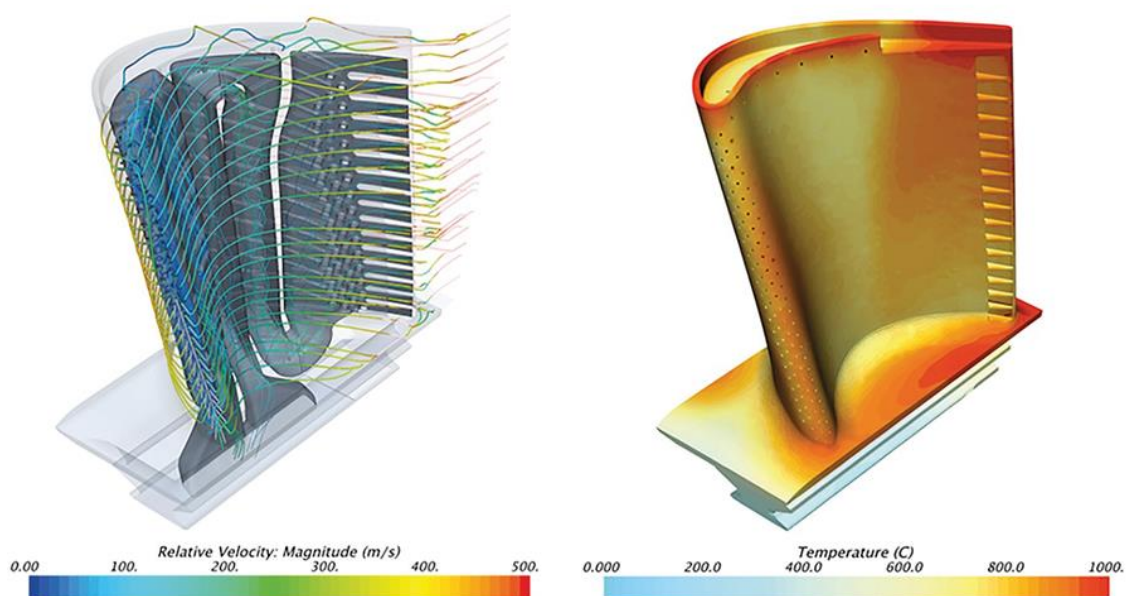


Rys. 2. Przekrój zaawansowanego silnika turbowentylatorowego Rolls-Royce [6]



Rys. 3. Wpływ temperatury pracy na wytrzymałość stopów [7]

Mimo zastosowania materiałów o wysokich właściwościach wytrzymałościowych w podwyższonej temperaturze, wymagane jest zastosowanie wielu innych rozwiązań takich jak odpowiednia konstrukcja (chłodzenie), czy zastosowanie powłok ochronnych, by uzyskać maksymalną sprawność silnika. Dobrym przykładem obrazującym stopień skomplikowania i zastosowania wielu rozwiązań technologicznych jest budowa łopatki turbiny, gdzie temperatura pracy łopatki często jest wyższa od temperatury topnienia materiału, z którego łopatka jest wykonana (Rys. 4) [8].



Rys. 4. Symulacja chłodzenia łopatki turbiny gazowej (Siemens) [8]

Przemysł lotniczy, szczególnie przy projektowaniu silników lotniczych, często wykorzystuje konstrukcje spawane wykonane z blachy. Części cienkościenne są rodzajem powszechnej konstrukcji, która istnieje w wielu dziedzinach. Konstrukcje takie charakteryzują się niższymi kosztami wytwarzania oraz niższą masą całkowitą, co przekłada się na wzrost stosunku ciągu do masy silnika [9, 10].

1.1 Stale wysokostopowe

Materiałem często wykorzystywanym do budowy elementów sekcji zimnej silnika są stale wysokostopowe, czyli stale o całkowitej zawartości pierwiastków stopowych powyżej 8%. Stale te można podzielić na: ulepszone cieplnie (utwardzane wtórnie), stale typu

maraging, stale do utwardzania wydzieleniowego. W przeciwieństwie do stali niskostopowych, stale wysokostopowe, poza bardzo wysoką wytrzymałością, charakteryzują się równocześnie wysoką ciągliwością, odpornością na kruche pękanie i odpornością na korozję naprężeniową [11].

Stale do utwardzania wydzieleniowego charakteryzują się dobrą spawalnością. Są stosowane do budowy takich elementów silnika jak obudowy wentylatorów, czy sprężarek. Ponadto materiał ten jest powszechnie stosowany w kosmonautyce, przemyśle morskim, papierniczym, energetycznym, oraz spożywczym jako odpowiedzialne podzespoły maszyn, tuleje, łopatkę turbin, złączki, śruby, wały napędowe, nakrętki, elementy urządzeń pomiarowych [11].

Obecnie baza American Iron and Steel Institute (AISI) zawiera 24 pozycje stali nierdzewnych [12]. Są to głównie stale chromowo-niklowe oraz chromowo-niklowo-magnezowe.

Stale do utwardzania wydzieleniowego wchodzi w skład grupy stali odpornych na korozję, które uzyskują wysoką wytrzymałość dzięki wytrąceniu węglków stopowych i umocnieniu wydzieleniowym roztworu stałego. Z uwagi na właściwości antykorozyjne, stale te zawierają minimum 12% Cr. W stalach tych, w celu uzyskania wysokiej wytrzymałości, występują dodatki pierwiastków tworzących węgliki, takich jak wolfram, molibden i wanad [11].

Stale wysokostopowe utwardzane wydzieleniowo wg [13] dzielą się na trzy grupy:

- stale wysokostopowe w pełni martenzytyczne (Stainless W, 17-4 PH)
- stale wysokostopowe poł austenityczne (AM 335, 17-7 PH). To stale, które w stanie wyżarzonym posiadają strukturę austenityczną, natomiast po pełnej obróbce cieplnej są stalami o strukturze martenzytycznej
- stale wysokostopowe austenityczne (HNM, 17-10 P)

Stale wysokostopowe martenzytyczne (grupa, do której zalicza się stal 17-4 PH, Stainless W), to stale o strukturze martenzytycznej po przesycaniu. Wysoka wytrzymałość jest otrzymywana w wyniku pojedynczego nisko temperaturowego starzenia. W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny przykładowych gatunków stali utwardzanych wydzieleniowo [13].

Tab. 1. Skład nominalny wybranych stali utwardzalnych wydzieleniowo [13]

AISI			Zawartość, %mas.					
Typ	Nazwa	Producent	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Inne
Stale martenzytyczne								
635	Stainless W	U.S. Steel	0,07	0,50	17	7	-	0,70 Ti; 0,20 Al
630	17-4 PH	Armco	0,04	0,25	16	4	-	3,2 Cu; 0,25 Cb-Ta
Stale pólaustenityczne								
633	AM 350	Allegheny Ludlum	0,10	0,80	16,5	4,3	2,75	0,10 N
634	AM 355	Allegheny Ludlum	0,13	0,95	15,5	4,3	2,75	0,10 N
631	17-7 PH	Armco	0,07	0,60	17	7	-	1,15 Al
632	PH 17-7 Mo	Armco	0,07	0,60	15	7	2,2	1,15 Al
Stale austenityczne								
-	HNM	Crucible	0,30	3,5	18,5	9,5	-	-
-	17-10 P	Armco	0,12	0,75	17	10	-	-
653	17-14 CuMo	Armco	0,12	0,75	16	14	2,5	3 Cu; 0,25 Ti
660	A-286	Allegheny Ludlum	0,06	1,5	15	26	1,2	1,8 Ti; 0,2 Al

Z grupy stali utwardzanych wydzieleniowo, stale o dobrej spawalności (niskiej zawartości węgla) to 17-7 PH [14] oraz 17-4 PH [15].

Właściwości fizyczne stali utwardzanych wydzieleniowo

Właściwości fizyczne trzech gatunków stali utwardzanych wydzieleniowo przedstawiono w Tab. 2.

Tab. 2. Właściwości fizyczne wybranych stali utwardzalnych wydzieleniowo [13]

Właściwość	Stainless W		AM 355		17-7 PH		HNM	
	Wyżarzony	Starzony	Kond. H.	SCT	Kond. A.	TH-1050	RH-950	Starzony
Przewodność cieplna, W/m ² *°C	61,32	68,70	-	49,51	-	55,65	55,65	-
Współczynnik rozszerzalności cieplnej (68-932), °C	11,3x10 ⁻⁶	-	16,9x10 ⁻⁶	13 x10 ⁻⁶	17,3 x10 ⁻⁶	11,9 x10 ⁻⁶	11,9 x10 ⁻⁶	18,5 x10 ⁻⁶
Oporność elektryczna, Ω*µm	1,00	0,849	-	0,75	0,799	0,819	0,829	0,77
Przenikalność magnetyczna (H=1000e)	81	101	-	-	1,4-3,5	80-99	75-87	1,003
Moduł sprężystości, GPa	185	191	-	202	200	200	200	200
Moduł sztywności, GPa	77	79	-	78	-	-	-	-
Współczynnik Poissona	0,20	0,20	-	-	-	-	-	-
Gęstość, kg/dm ³	7,75	7,75	7,91	7,78	7,81	7,64	7,64	7,86

Analizując właściwości fizyczne przedstawione w tabeli 2 można stwierdzić, że starzenie ma niewielki wpływ na zmianę właściwości fizycznych tych stali. Wyjątkiem jest oporność elektryczna, której wartość w stanie po starzeniu jest mniejsza, w porównaniu z wartością dla stali w stanie po wyżarzaniu. Współczynnik rozszerzalności cieplnej dla stali pół austenitycznych (AMS355, 17-7 PH) wyraźnie maleje po starzeniu, w porównaniu do wartości po wyżarzaniu. Ponadto, po starzeniu osiąga wartości zbliżone jak dla stali martenzytycznych. Największe zmiany dla grupy stali pół austenitycznych można zaobserwować w zmianach wartości przenikalności magnetycznej (zdolność stali do zmiany indukcji magnetycznej przy zmianie natężenia pola magnetycznego). W stanie po wyżarzaniu stale są słabo magnetyczne, natomiast w stanie po starzeniu, stają się wysoko magnetyczne.

Właściwości mechaniczne stali utwardzanych wydzieleniowo

W tabeli 3 przedstawiono właściwości mechaniczne wybranych stali utwardzanych wydzieleniowo. Można zauważyć, że granica plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie każdego rodzaju materiału wzrastają po obróbce cieplnej.

Tab. 3. Właściwości mechaniczne wybranych stali utwardzanych wydzieleniowo [13]

Stop	Stan	Granica plastyczności (0,2% offset)	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie (2 in)	Przewężenie	Twardość HRC
		ksi	ksi	%	%	
Stale martenzytyczne						
Stainless W	Przesycanie	95	135	14	16	26
	Starzenie	105	210	10	25	44
17-4 PH	Przesycanie	110	150	12	45	-
	Starzenie	185	200	14	50	44
Stale pół austenityczne						
AM 355	Przesycanie	57	160	26	-	-
	Starzenie	182	216	19	38	-
17-7 PH	Przesycanie	40	130	35	-	-
	Starzenie 1050	190	205	9	-	43
	Starzenie 950	210	225	6	-	47
Stale austenityczne						
HNM	Przesycanie	50	116	58	60	-
	Starzenie	79	135	26	40	38
17-10 P	Przesycanie	38	89	70	76	10
	Starzenie	88	137	25	39	30

Właściwości mechaniczne zależą od zastosowanej obróbki cieplnej. Podstawą doboru tych materiałów jest twardość, której wartość zależy w dużym stopniu od temperatury starzenia [13].

Uwagę zwraca, że wydłużenie stali martenzytycznej po starzeniu zmienia się w niewielkim zakresie. W przeciwieństwie do stali pół austenitycznej, dla której wartość wydłużenia znacznie maleje, podobnie jak dla stali austenitycznych.

Obróbka cieplna stali martenzytycznych utwardzanych wydzieleniowo

Utwardzanie wydzieleniowe to zabieg obróbki cieplnej, której efektem jest wzrost wytrzymałości, granicy plastyczności, twardości, a także zwiększenie odporności na korozję. Autorzy pracy [16] zwracają uwagę na wysoką odporność na korozję stali 17-4PH.

Wzmocnienie jest efektem wydzielenia nadmiaru rozpuszczonego składnika z przesyconego roztworu stałego, w formie innych faz metastabilnych oraz stabilnych. Rodzaj fazy wpływa na efekty umocnienia [17].

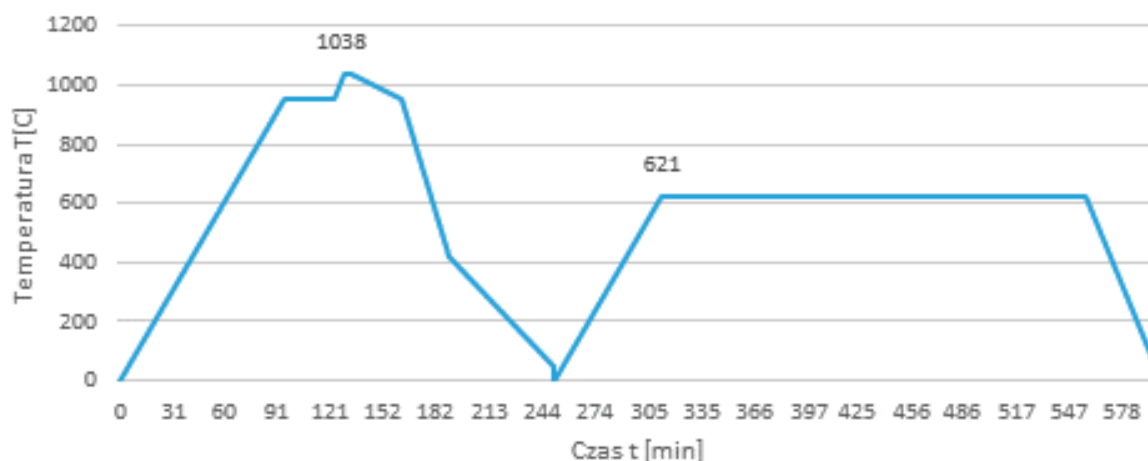
Proces umacniania wydzieleniowego składa się z dwóch etapów: przesykania i starzenia.

Przesykanie polega na nagraniu materiału do temperatury powyżej temperatury rozpuszczenia pierwiastków stopowych i uzyskaniu jednorodnego roztworu przesyconego tymi pierwiastkami, w zapewniającym zatrzymanie atomów tych pierwiastków w roztworze w efekcie czego uzyskuje się podwyższone stężenie wakancji - wytrącanie faz międzymetalicznych takich jak Ni_2Al , Ni_3Ti , $Ni_3(TiAl)$, Ni_3Al , Ni_3Nb , Ni_3Cu oraz węglików [11]).

Efektym szybkiego chłodzenia jest wzrost naprężeń wewnętrznych i znaczna deformacja materiału, co sprawia trudności w utrzymaniu wymaganych wymiarów dla detali stosowanych w przemyśle lotniczym. W zależności od konstrukcji części (stopnia ich skomplikowania), deformacje powstające w efekcie przesykania mogą wzrosnąć na tyle, że uniemożliwią późniejszą obróbkę mechaniczną. Dlatego często dla stali utwardzanych wydzieleniowo podczas przesykania stosuje się dodatkowe usztywnienie, redukujące deformację.

Starzenie jest ostatnim etapem obróbki cieplnej stopów uprzednio przesyconych, który decyduje o końcowych właściwościach umocnionego materiału. Starzenie stali martenzytycznych polega na nagraniu materiału do temperatury w zakresie 480-620 °C i wygrzaniu w tej temperaturze w czasie 4 godzin. Proces starzenia może skutkować dwukrotnym zwiększeniem wytrzymałości, przy mniejszej, ale wciąż stosunkowo dużej, ciągliwości (plastyczności) [18].

Przykładowy przebieg utwardzania wydzieleniowego stali 17-4 PH przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Przykładowy przebieg utwardzania wydzieleniowego stali 17-4 PH [19]

Spawalność stali utwardzanych wydzieleniowo

Stale martenzytyczne w stanie przesyconym charakteryzują się dobrą spawalnością. W przemyśle lotniczym, w procesie łączenia elementów silnika lotniczego najczęściej stosuje się metodę TIG (Gas Tungsten Arc Welding). Jest to spowodowane głównie wysoką czystością spoiny (brak żuźla), uniwersalnością metody i niskimi kosztami urządzeń spawalniczych.

Stale martenzytyczne, zdaniem autorów prac [16, 20-22], są dobrze spawalne, zarówno konwencjonalnymi metodami spawania łukowego (TIG), jak i metodą spawania laserowego, czy metodami hybrydowymi. Według autora pracy [23], ze względu na fakt, że spoina krzepnie i tworzy się δ -ferryt, ryzyko pęknięć gorących w spoinie jest niskie.

Stale martenzytyczne nie wymagają podgrzewania wstępnego. Podgrzewanie wstępne do 100 °C jest zalecane w przypadku spawania materiałów o grubości powyżej 25 mm, celem zmniejszenia ryzyka wystąpienia pęknięć [23].

Elementy ze stali pół austenitycznych mogą być łączone większością metod spawania łukowego oraz zgrzewania.

Stale austenityczne mogą być spawane w stanie przesyconym. Aby zwiększyć wytrzymałość złączy spawanych, należy przeprowadzić obróbkę starzeniową przez 15 godzin w temperaturze 720 °C. W przypadku tych stali wstępne podgrzewanie spoin nie jest konieczne [11].

Stal 17-4 PH, według AMS, jest produkowana w szerokim asortymencie (Tab. 4). Skład chemiczny tej stali przedstawiono w Tab. 5 [24].

Tab. 4. Oznaczenie stali 17-4 PH ze względu na postać dostawy [24]

Nazwa AMS	Postać dostawy
5342	Odlewy. Przesycanie, utwardzanie wydzieleniowe.
5343	Odlewy. Wyżarzanie, przesycanie, utwardzanie wydzieleniowe, 130.000 PSI
5344	Odlewy. Wyżarzanie, przesycanie, utwardzanie wydzieleniowe, 180.000 PSI
5355	Odlew precyzyjne
5398	Odlewy. Piaskowanie
5604	Blachy, taśmy, płyty
5622	Pręty, druty, odkuwki, pierścienie. Przesycone, utwardzane wydzieleniowo
5643	Pręty, druty, odkuwki, pierścienie. Przesycone, utwardzane wydzieleniowo

Tab. 5. Skład chemiczny stali AMS 5604 [24]

Pierwiastek	Min	Max
Węgiel	-	0.07
Mangan	-	1.00
Krzem	-	1.00
Fosfor	-	0.04
Siarka	-	0.03
Chrom	15.00	17.50
Nikiel	3.00	5.00
Niob	5xC	0.45
Miedź	3.00	5.00
Molibden	-	0.50

1.2 Stopy niklu

Stopy niklu, ze względu na swoje bardzo dobre właściwości mechaniczne w wysokich temperaturach (Rys. 3), znajdują zastosowanie w budowie silników lotniczych, zwłaszcza sekcji gorącej. Dodatkowo zakres temperatury pracy stopów niklu można zwiększyć poprzez zastosowanie powłok.

Stopy niklu są często określane jako „superstopy”. Należą do grupy stopów metali opracowanych po II wojnie światowej, z przeznaczeniem na elementy w turbosprężarek i turbin silników lotniczych, zwłaszcza tych, które wymagały wysokich osiągnięć w podwyższonych temperaturach. Stosowanie tych stopów rozszerzyło się następnie na wiele innych dziedzin, w tym na lądowe turbiny gazowe, silniki raketowe, zakłady chemiczne i naftowe. Materiały te szczególnie dobrze nadają się do tych wymagających zastosowań ze

względem na ich zdolność do zachowania większości swojej wytrzymałości nawet po długim czasie ekspozycji powyżej 650°C [11].

Wykorzystanie w budowie silników stopów niklu poprawia charakterystyki wydajności silnika i ogranicza zużycia paliwa.

Według autorów pracy [6] stopy niklu charakteryzują trzy podstawowe cechy:

- zdolność do przenoszenia obciążeń w temperaturze roboczej bliskiej temperaturze topnienia,
- znaczna odporność na degradację mechaniczną przez dłuższy czas,
- tolerancja na trudne warunki pracy.

Autorzy pracy [6], zdolność do przenoszenia obciążeń w wysokich temperaturach określili za pomocą współczynnika τ zdefiniowanego jako stosunek temperatury roboczej do temperatury topnienia. Współczynnik powinien być większy od wartości około 0,6. Tak więc stop pracujący w temperaturze 1000 °C, przy temperaturze topnienia 1450 °C, pracuje przy współczynniku $\tau = 0,75 = (1000 + 273)/(1455 + 273)$, a to klasyfikuje ten materiał jako odporny na działanie wysokiej temperatury.

Odporność na długotrwałą degradację mechaniczną jest scharakteryzowana na podstawie wyników próby pełzania w wysokich temperaturach, pod wpływem statycznych, długotrwałych obciążeń mechanicznych. Pożądane są materiały o niskim współczynniku pełzania.

Ostatnią cechą jest tolerancja na trudne warunki pracy. Pomimo tego, że nafta stosowana w paliwie do silników lotniczych jest wysokiej czystości, podczas eksploatacji może wystąpić korozja spowodowana zanieczyszczeniami, takimi jak sole potasowe oraz woda morską. Proces korozji intensyfikuje wysoka temperatura, która sprzyja utlenianiu, efektem czego jest degradacja powierzchni, która skraca trwałość eksploatacyjną komponentów lotniczych [6].

Przykładowe stopy niklu przedstawiono w tabeli 6. Każdy ze tych stopów, ze względu na sposób wytwarzania, może być odlewany, kuty, lub wytworzony metalurgią proszków. Stopy do obróbki plastycznej są na ogół bardziej jednorodne pod względem mikrostruktury niż stopy odlewnicze. Jest to spowodowane segregacją składu chemicznego podczas ich krzepnięcia. W konsekwencji stopy do obróbki plastycznej są uważane za bardziej plastyczne i wykazują bardziej spójne właściwości mechaniczne [11].

Tab. 6. Skład chemiczny kutych stopów niklu [11]

Stop	Cr	Al	Co	Mo	W	Nb	Ti	B	Fe	C	Inne	Ni
Zastosowanie w komorach spalania												
Hastelloy X	22	-	1,5	9	0,7	-	-	0,005	1,9	0,07	-	Reszta
Nimonic C-263	20	0,4	20	6	-	-	2,1	-	0,4	0,06	-	Reszta
IN617	22	1,2	12,5	8,5	-	-	-	-	-	0,05	-	Reszta
IN 230	22	0,35	5	2	14	-	-	0,015	3	0,1	-	Reszta
Zastosowanie na dyski sprężarki (silniki lotnicze i przemysłowe turbiny gazowe)												
IN 706	16	-	-	-	-	2,9	1,8	-	37	0,03	-	Reszta
IN 718	19	0,5	-	3	-	5,1	0,9	-	18,5	0,03	-	Reszta
Udimet 720	18	2,5	14,8	3	1,25	-	5	0,033	-	0,035	0,03 Zr	Reszta
Udimet 720 LI	16	2,5	15	3	1,25	-	5	0,018	-	0,025	0,03 Zr	Reszta
IN 100*	10	5,5	15	3	-	-	4,7	0,015	-	0,15	0,06 Zr 1 V	Reszta
Rene 88 DT*	16	2,1	13	4	4	0,7	3,7	0,015	-	0,03	0,03 Zr	Reszta

* Wytwarzane metalurgią proszków.

Właściwości fizyczne i mechaniczne stopów niklu

Stopy na bazie niklu mogą występować jako wzmocnione roztworami stałymi lub utwardzane wydzieleniowo. Stopy ze wzmocnionymi roztworami stałymi to między innymi Hastelloy X [25] i Inconel 625 [26]. Stopami utwardzalnymi wydzieleniowo są między innymi Waspaloy oraz Inconel 718 [11].

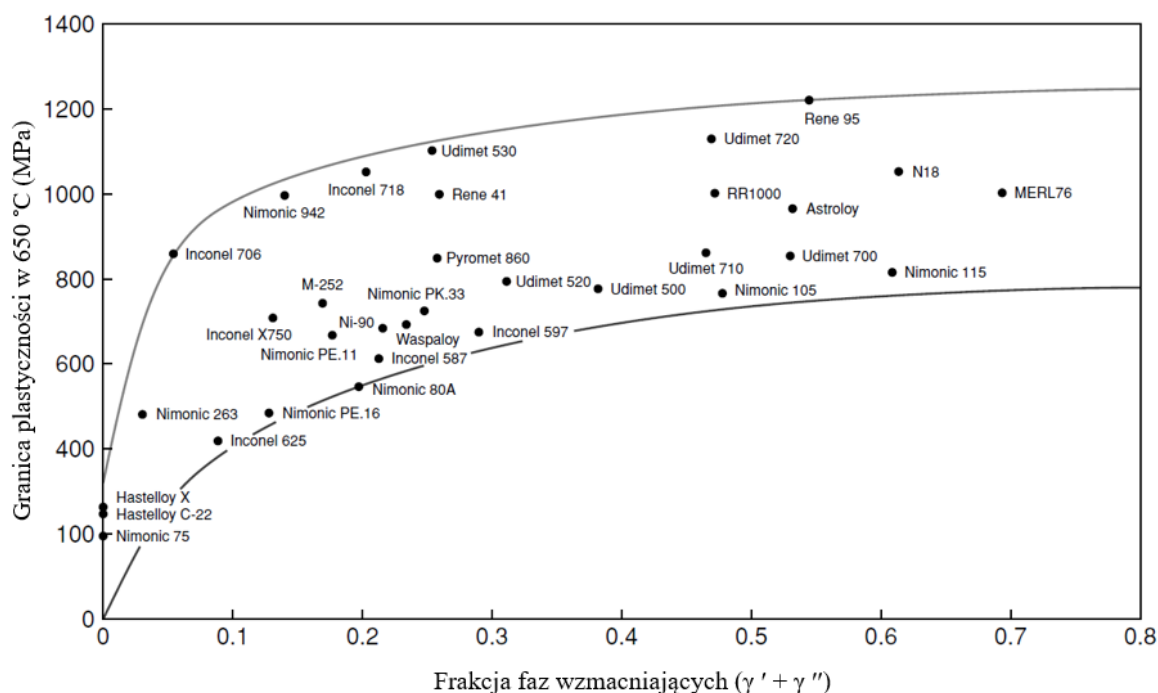
Stopy wzmocnione roztworami stałymi są stosowane w konstrukcjach o niewielkiej wytrzymałości, np. ściany komory spalania. W przypadku najbardziej wymagających zastosowań, takich jak łopatki turbin wysokociśnieniowych, stosowane są stopy wzmocnione wydzieleniowo [11]. Na Rys. 6 przedstawiono granicę plastyczności wybranych stopów niklu w zależności od udziału fazy wzmacniającej [6].

Większość stopów na bazie niklu zawiera 10–20% Cr, do 8% Al i Ti, 5–10% Co oraz niewielkie ilości B, Zr i C. Stopy te mogą zawierać również dodatki: Mo, W, Ta, Hf i Nb.

Chrom jest głównym pierwiastkiem stopowym. Jego obecność zwiększa odporność na utlenianie, a także intensyfikuje wzmocnienie roztworu stałego.

Do najbardziej znanych stopów zawierających nikiel i chrom należą Inconeale.

Stop Inconel 718 zaliczany jest do grupy stopów niklu utwardzanych wydzieleniowo. Stop ten różni się od większości stopów odpornych na działanie wysokiej temperatury tym, że zawiera niob, który zastępuje aluminium, a tytan i żelazo zastępują kobalt i molibden. Efektem tych zmian jest obniżenie wytrzymałości wysokotemperaturowej, przy jednoczesnej poprawie spawalności. W tabeli 7 przedstawiono skład chemiczny stopu Inconel 718.



Rys. 6. Zmienność granicy plastyczności w temperaturze 650 °C z całkowitym udziałem faz wzmacniających γ' i γ'' dla wybranych stopów niklu [6]

Tab. 7. Skład chemiczny stopu Inconel 718 [24]

Pierwiastek	Min	Max
Węgiel	-	0,08
Mangan	-	0,35
Krzem	-	0,35
Fosfor	-	0,015
Siarka	-	0,015
Chrom	17,00	21,00
Nikiel	50,00	55,00
Molibden	2,80	3,30
Niob	4,75	5,50
Tytan	0,65	1,15
Aluminium	0,20	0,80
Kobalt	-	1,00
Tantal	-	0,05
Bor	-	0,006
Miedź	-	0,30

Stop 718 został opracowany do pracy w temperaturach do 1300 F (704 °C). Ma również dobrą wytrzymałość i ciągliwość do 423 F (217 °C) [13]. Ze względu na swoje doskonałe właściwości mechaniczne i odporność na utlenianie w podwyższonych temperaturach, stop

Inconel 718 szczególnie nadaje się na komponenty produkowane w obszarach o wysokich temperaturach silników lotniczych i turbin gazowych [27, 28].

Podstawowe właściwości fizyczne wybranych stopów niklu przedstawiono w tabeli 8.

Tab. 8. Właściwości fizyczne wybranych stopów niklu utwardzalnych wydzieleniowo [13]

Właściwość	Alloy 600	Alloy 601	Alloy 625	Alloy 718	Alloy X-750
Temp. Topnienia (°F)	2500-2600	2375-2495	2350-2460	2300-2435	2540-2600
Przewodność cieplna, W/m ² ·°C	55,65	36,91	32,36	36,34	39,74
Współczynnik rozszerzalności cieplnej (70-1600), °C	16,4 x 10 ⁻⁶	17,1 x 10 ⁻⁶	16,9 x 10 ⁻⁶	17,1 x 10 ⁻⁶	16,7 x 10 ⁻⁶
Oporność elektryczna, Ω·μm	1,0307	1,192	1,29	1,252 ^c ;1,205 ^d	1,262-1,287
Przenikalność magnetyczna (H=100Oe)	1,010	1,003	1,006	1,0013 ^c , 1,0011 ^d	1,0020- 1,0035
Moduł sprężystości, GPa	213	206	205	205	214
Moduł sztywności, GPa	75	81	78	80	78
Współczynnik Poissona	0,29	0,267	0,308	0,284	0,29
Gęstość, kg/dm ³	8,41	8,05	8,44	8,19	8,25

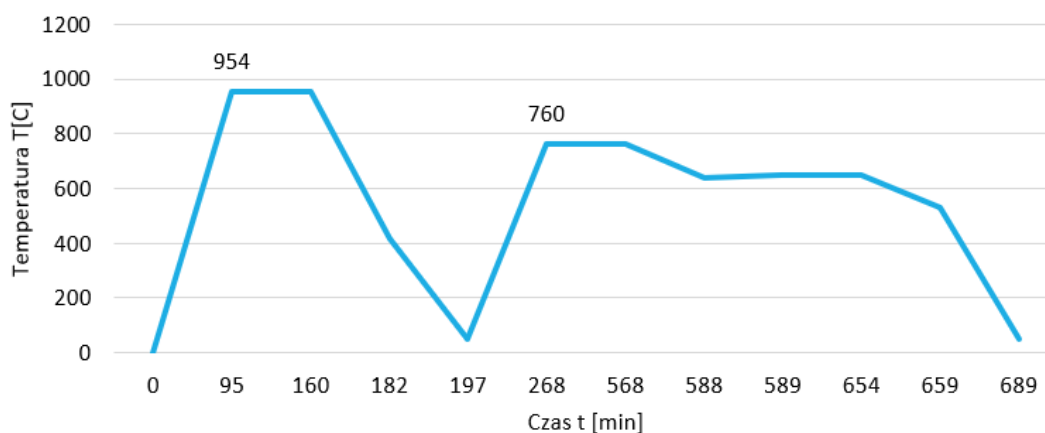
^c Wyżarzony ;^d Starzony

Stopy 718 i X-750 należą do grupy materiałów utwardzanych wydzieleniowo. Jak można wywnioskować z tabeli 8, utwardzanie wydzieleniowe ma wyraźny wpływ na właściwości fizyczne tych stopów, natomiast starzenie umiarkowanie wpływa na rezystywność elektryczną, ale ma znaczący wpływ na właściwości magnetyczne.

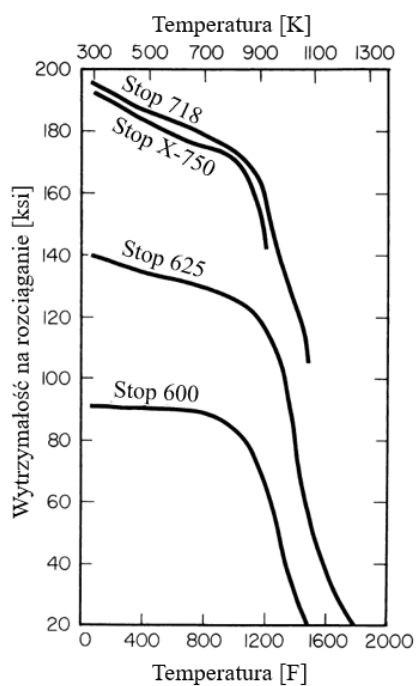
Przykładowy przebieg utwardzania wydzieleniowego Inconelu 718 przedstawiono na Rys. 7.

Stopy Inconel 600, 601 i 625 nie są utwardzane drogą obróbki cieplnej. Poprawę właściwości tych stopów można osiągnąć tylko przez obróbkę na zimno. Wytrzymałość na rozciąganie stopów niklu przedstawiono na Rys. 8.

Stop Inconel 718, w zależności od formy dostawy, oznaczony jest numerycznie zgodnie z AMS (tab. 9).



Rys. 7. Przykładowy przebieg utwardzania wydzieleniowego stopu Inconel 718 [19]



Rys. 8. Wytrzymałość na rozciąganie w podwyższonej temperaturze w krótkim czasie kilku stopów niklo-chromowych [13]

Tab. 9. Oznaczenie stopu Inconel 718 ze względu na postać dostawy [24]

Nazwa AMS	Postać dostawy
5589	rury bezszwowe.
5596	arkusz, taśma, folia i płyta
5662	pręty, odkuwki, pierścienie spawane łukowo i półfabrykaty do kucia spawane łukowo

2. METODY SPAWANIA CZĘŚCI LOTNICZYCH

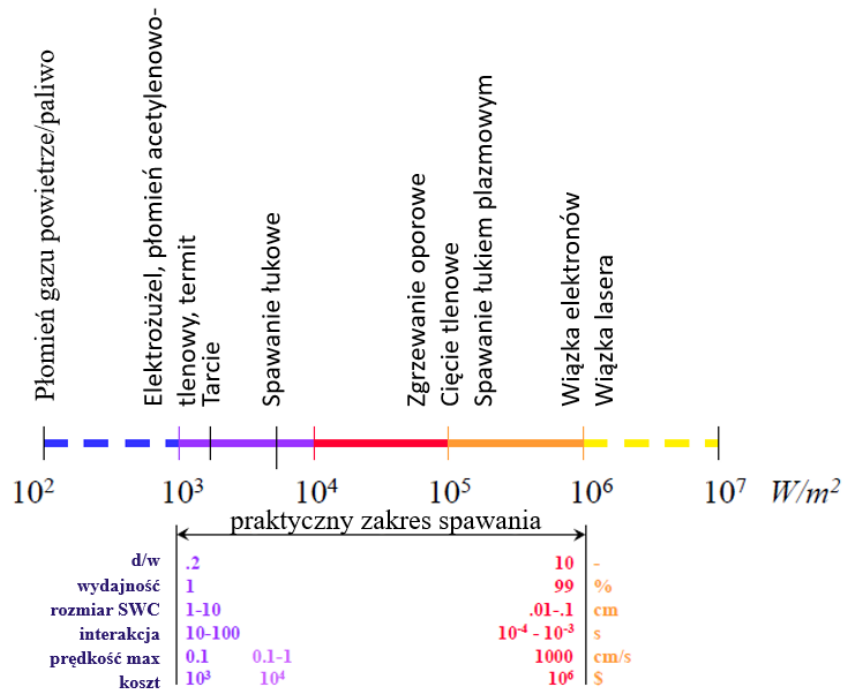
W 1882 roku polski inżynier Stanisław Olszewski i Rosjanin Mikołaj Benardos wynaleźli i opatentowali metodę spawania elektrycznego, w której wykorzystali elektrodę węglową. Kolejnym krokiem w rozwoju tej metody było zastosowanie elektrody otulonej. Metodę tą zaczęto wykorzystywać w budowie odpowiedzialnych konstrukcji. Pierwszy na świecie spawany most drogowy został zbudowany w latach 1928-1929 na rzece Słudwi pod Łowiczem [29].

W latach trzydziestych XX wieku podstawową metodą budowy samolotów było spawanie gazowe przy użyciu palników acetylenowo-tlenowych. Podczas II wojny światowej technologia spawania szybko się rozwinęła. Wraz ze wzrostem produkcji samolotów opracowano nowe techniki, takie jak spawanie elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych (TIG – Tungsten Inert Gas lub GTAW – Gas Tungsten Arc Welding). Spawanie metodą TIG, ze względu na precyzję i wysoką jakość złączy spawanych, szybko stało się preferowaną metodą spawania w przemyśle lotniczym [29].

Wraz z rozwojem i ekspansją przemysłu lotniczego rozwijano również nowe metody spawania. Obecnie w lotnictwie wykorzystuje się spawanie metodą TIG, spawanie wiązką elektronów (EBW) i spawanie wiązką lasera (LBW). Spawanie stało się integralną częścią produkcji lotniczej, zapewniając niezawodne i bezpieczne komponenty samolotów, które spełniają wysokie standardy branżowe. W firmie MB Aerospace wykorzystuje się wszystkie wspomniane powyżej metody spawania. Każda z tych metod ma swoje zalety i ograniczenia.

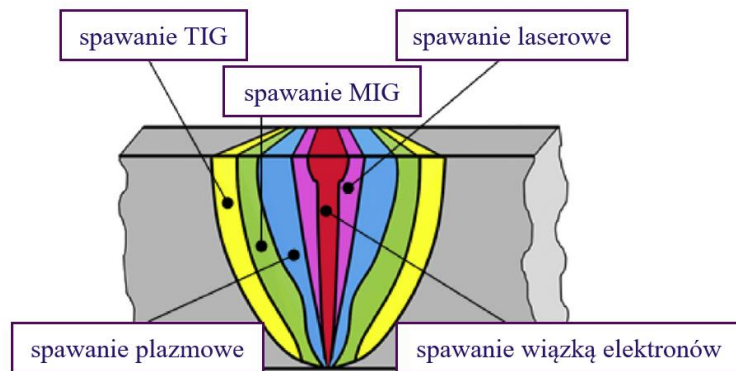
Ze względu na intensywność źródła ciepła, procesy spawania można sklasyfikować jak pokazano na Rys. 9 [30, 31]. Bardziej wydajne procesy spawania wymagają wprowadzenia mniejszej ilości ciepła w miejsce połączenia, w efekcie uzyskuje się złącze spawane o mniejszej strefie przegrzania. Słabsze źródło ciepła, poruszające się z większą prędkością, również skraca znacząco czas spawania. Jeżeli prędkość spawania jest zbyt wysoka, to proces nie może być kontrolowany ręcznie i musi zostać zautomatyzowany [30]. Dlatego też, korzystanie z wydajnych procesów spawania, jak spawanie wiązką elektronów lub laserowe wymagają automatyzacji. Minimalny czas spawania jaki może być kontrolowany ręcznie to 0,3 sekundy w odniesieniu do spawania łukowego [32]. Źródła ciepła bardziej intensywne od łukowych, mają krótszy czas przebywania w jednym punkcie spoiny. Podczas spawania ręcznego spawacz nie jest w stanie kontrolować procesów zachodzących podczas topienia i formowania spoiny w tak krótkim czasie. Wraz z rozwojem procesów spawania

i zastosowaniem bardziej wydajnych źródeł energii (wprowadzając mniej ciepła do spoiny – mniejsza strefa wpływu ciepła), nastąpił znaczący wzrost automatyzacji procesów łączenia. W procesach tych stosuje się automatyczne stoły obrotowe, wózki jezdne, a także roboty spawalnicze.

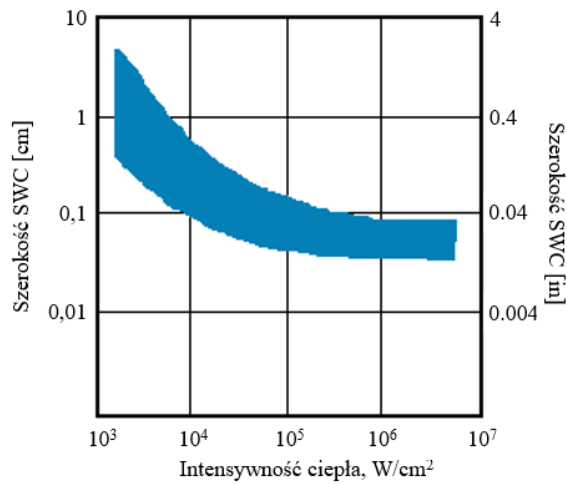


Rys. 9. Procesy spawania wg intensywności źródła ciepła [32]

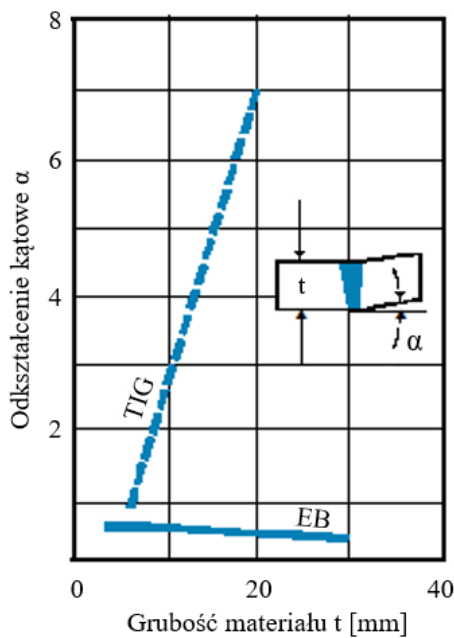
W procesach spawalniczych z bardziej skoncentrowaną energią powstaje mniejsza strefa wpływu ciepła. Mniejsze są również deformacje po spawaniu (Rys. 10, Rys. 11, Rys. 12). Koszty wyposażenia do spawania (stanowiska spawalniczego) rosną, wraz ze wzrostem energii źródła spawania (Rys. 13).



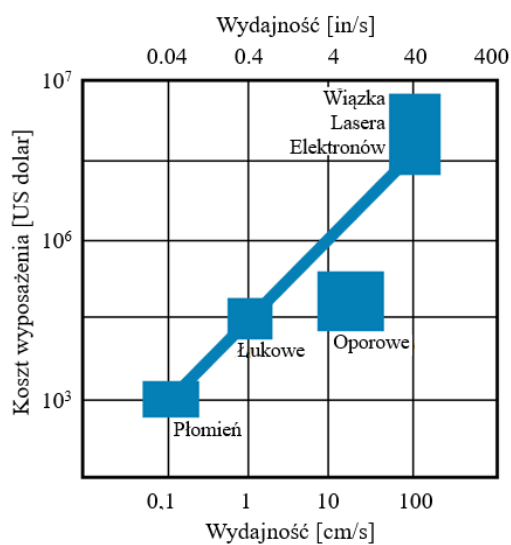
Rys. 10. Geometria złącza doczołowego wykonanego różnymi metodami spawania [33]



Rys. 11. Rozmiar strefy wpływu ciepła, w zależności od mocy źródła energii [30]



Rys. 12. Porównanie odkształcenia kąтового po spawaniu wiązką elektronów i metodą TIG [30]



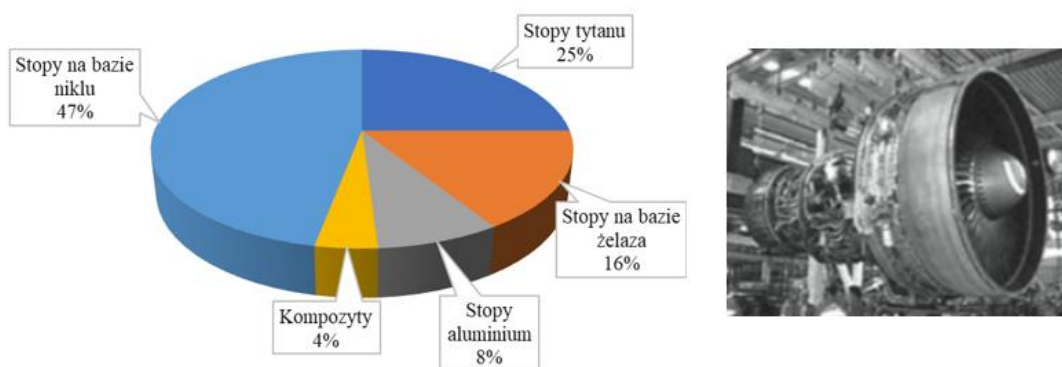
Rys. 13. Wydajność procesów spawania, porównana z kosztami wyposażenia [30]

2.1 Spawanie metodą TIG

Proces TIG (Tungsten Inert Gas) jest znany także jako GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Nazwy GTAW używa się w USA, z kolei TIG przyjęto w Europie (WIG w Niemczech).

Głównymi zaletami metody TIG, które zdecydowały o jej wykorzystaniu do łączenia elementów i części lotniczych, są wysoka jakość spoin (wykonanych metodą ręczną i automatyczną), stosunkowo niska cena urządzeń i możliwość spawania w trudno dostępnych miejscach [34].

Spawanie TIG pozwala uzyskać wysokiej jakości, precyzyjne spoiny o doskonałym wyglądzie i estetyce, nawet podczas spawania wysokostopowych materiałów, co ma kluczowe znaczenie w przemyśle lotniczym (Rys. 14). Spawanie TIG może być zastosowane do spawania szerokiej gamy materiałów, w tym aluminium [35], stopów tytanu i stali nierdzewnej, które są powszechnie stosowane w produkcji lotniczej.



Rys. 14. Podział materiałów wykorzystanych do budowy silnika lotniczego General Electric [36]

Spawanie TIG można prowadzić przy niskim natężeniu prądu spawania (5-10 A) i łączyć bardzo cienkie elementy, które występują w budowie silników lotniczych.

W metodzie TIG, ze względu na zastosowanie gazu osłonowego, który podczas spawania ochrania jeziorko ciekłego metalu oraz przyległy materiał, nie pozwalając na ich utlenienie, spoina charakteryzuje się wysoką czystością metalurgiczną. Jest to ważne w komponentach dla przemysłu lotniczego, gdzie wszelkie zanieczyszczenia w spoinie mogą zagrozić integralności strukturalnej i bezpieczeństwu statku powietrznego. Z tego względu większość rur

w samolotach komercyjnych jest spawana metodą TIG. Rdzenie wymienników ciepła, obudowy wydechów ze stali nierdzewnej i stopów niklu w silnikach, zarówno komercyjnych jak i wojskowych samolotach, są również spawane metodą TIG. Metoda TIG została

zastosowana do spawania stopów aluminium 2014 i 2219 w zbiornikach paliwa i utleniacza rakiety Saturn V [30].

Spawanie metodą TIG można zautomatyzować lub zrobotyzować. Jakość złączy spawanych metodą TIG wykonanych na zrobotyzowanym stanowisku zależy od korekcji położenia uchwytu elektrodowego i stabilizacji parametrów spawania łukowego, takich jak prąd, napięcie i natężenie przepływu gazu osłonowego [37].

Podczas spawania metodą TIG skłonność do tworzenia deformacji (odkształceń spawalniczych) jest większa w porównaniu do procesów EBW i LBW. Odkształcenie elementów łączonych powstaje w efekcie oddziaływania cyklu cieplnego procesu spawania, materiał się rozszerza podczas nagrzewania i kurczy podczas chłodzenia. Odkształcenia spawalnicze stanowią poważny problem w przemyśle lotniczym, ponieważ nawet niewielkie wypaczenie lub odkształcenie elementu może skutkować zmianą przepływu powietrza, spalin, a co za tym idzie zmianą rozkładu pól temperatur, utratą wydajności lub awarią elementu. Z tego względu kontrolowanie odkształceń podczas spawania TIG ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia integralności i wydajności spawanych elementów stosowanych w przemyśle lotniczym.

Spawanie TIG (Rys. 15) to proces polegający na miejscowym stopieniu materiału podstawowego w plazmie łuku elektrycznego łukiem elektrycznym, jarzącego się pomiędzy nietopliwą elektrodą wolframową a materiałem spawanym. Jarzenie łuku odbywa się w osłonie gazów obojętnych (argon, hel, lub mieszaniny gazowe). Materiał dodatkowy w postaci prętów jest podawany ręcznie lub automatycznie. Istnieje również możliwość spawania bez materiału dodatkowego [39].



Rys. 15. Spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych TIG (GTAW) [38]

Spawanie metodą TIG jest bardzo uniwersalne. Metoda ta może być używana do łączenia metali żelaznych (stali nierdzewnych, stali wysokostopowych), jak i metali nieżelaznych (aluminium, miedź, tytan, magnez). Proces został opracowany do spawania metali trudno spawalnych i może być użyty do łączenia większej ilości materiałów niż jakakolwiek inna metoda spawania. Dodatkową zaletą procesu jest fakt iż spawanie odbywa się bez odprysków, co oznacza, że nie ma konieczności czyszczenia materiału podstawowego po spawaniu [39].

2.2 Spawanie wiązką elektronów

Początki badań nad wiązką elektronów sięgają lat 1880-1900. Wykorzystanie wiązki elektronów w praktyce jako źródło energii do spawania rozwinęło się w latach 50tych XX wieku.

Spawanie wiązką elektronów (EBW - Electron Beam Welding) zostało opracowane przez niemieckiego fizyka Karla-Heinza Steigerwalda w 1949 r. [33], który wymyślił i opracował pierwszą praktyczną spawarkę wykorzystującą wiązkę elektronów. W 1958 r. spawając stop cyrkonu o grubości 5 mm, odkrył tzw. efekt głębokiego wtopienia [40].

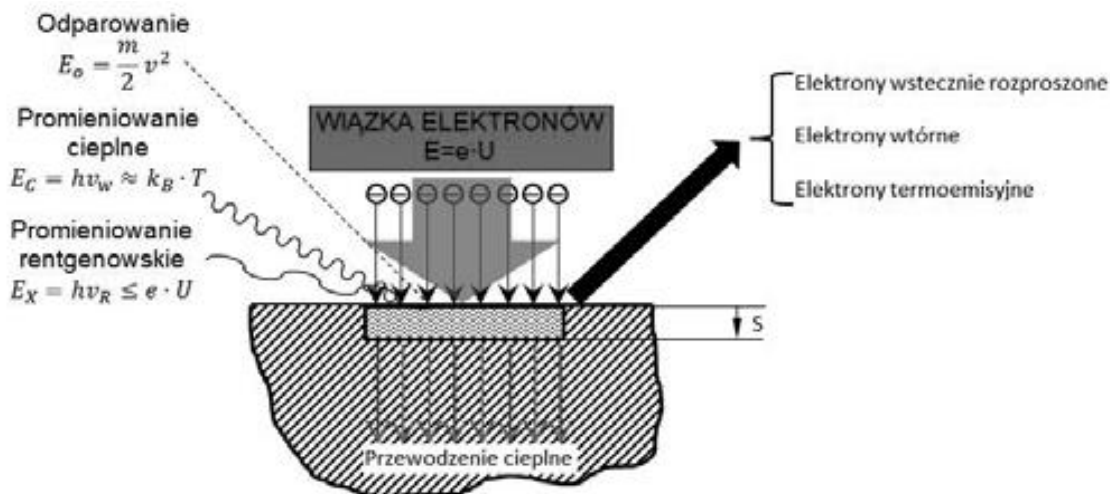
Spawanie wiązką elektronów jest szeroko stosowane w przemyśle lotniczym. To niekonwencjonalna technika spawania, w której łączenie metali odbywa się poprzez wytworzenie ciepła powstającego w efekcie uderzenia strumienia elektronów rozpędzonych do dużej prędkości o spawany materiał [41].

Według Schultza (1994) największą zaletą EBW jest to, że można spawać blachy stalowe o grubości od 0,5 mm do 300 mm w jednym przejściu oraz to, że dzięki tej technologii można osiągnąć bardzo duże prędkości spawania [42].

Elektrony posiadają ładunek elektryczny i można im nadać przyspieszenie za pomocą pola elektrycznego. Wiązka przyspieszonych elektronów jest kierowana na powierzchnię łączonych elementów. W wyniku zderzenia ich energia kinetyczna jest zamieniana na ciepło. Proces spawania odbywa się w próżni w celu uniknięcia rozogniskowania wiązki i utraty mocy [43, 44].

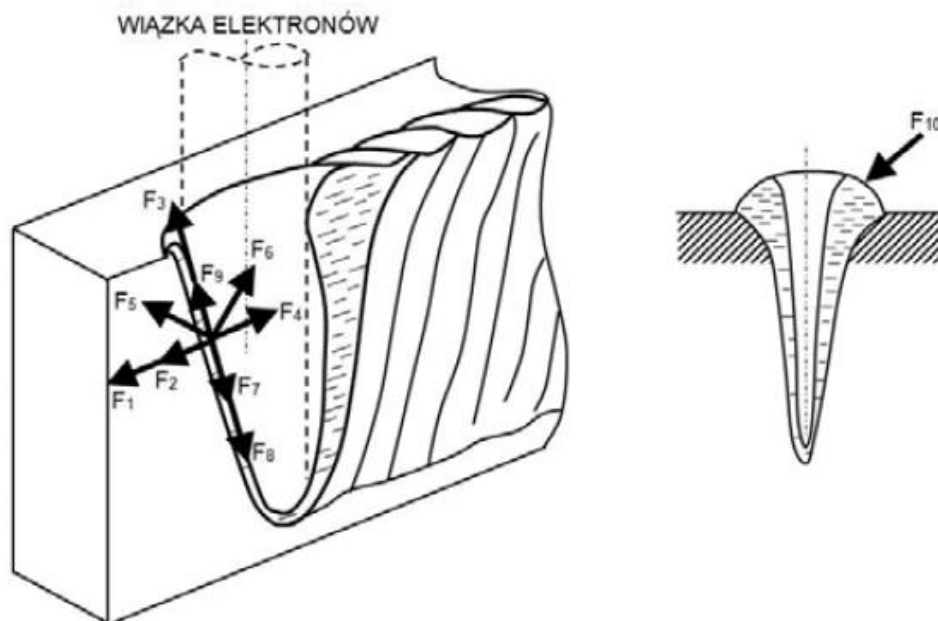
Elektrony padając na materiał oddziałują z elektronami tego materiału i powodują emisję elektronów: wstecznie rozproszonych (odbitych), wtórnych, Augera, a także promieniowania rentgenowskiego, fluorescencyjnego i ciepłego [45].

Schemat oddziaływania wiązki z powierzchnią materiału przedstawiono na Rys. 16.



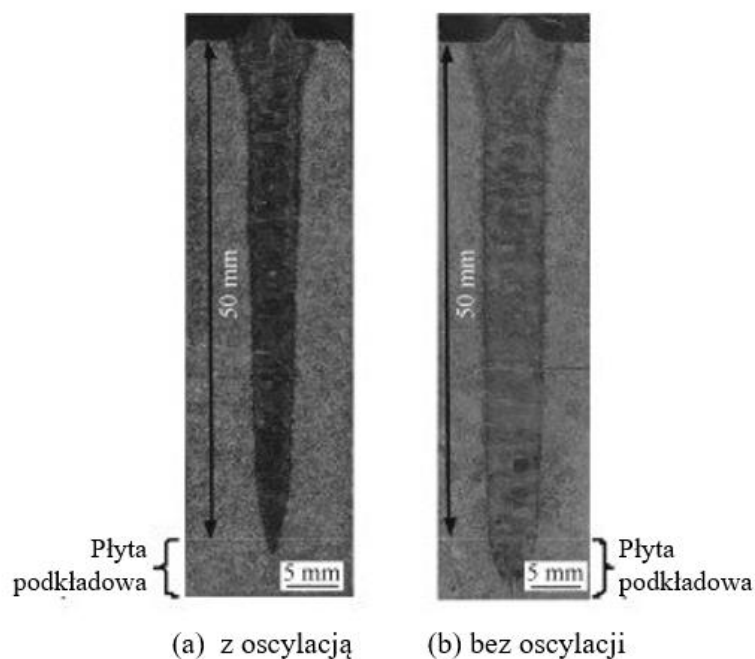
Rys. 16. Schemat oddziaływania wiązki elektronów z powierzchnią materiału [45]

Układ sił utrzymujących kanał w równowadze przedstawiono na rysunku Rys. 17. Kapilara (kanał gazodynamiczny) tworzy się przede wszystkim w wyniku oddziaływania ciśnienia par metali i ich sił odrzutu [45].



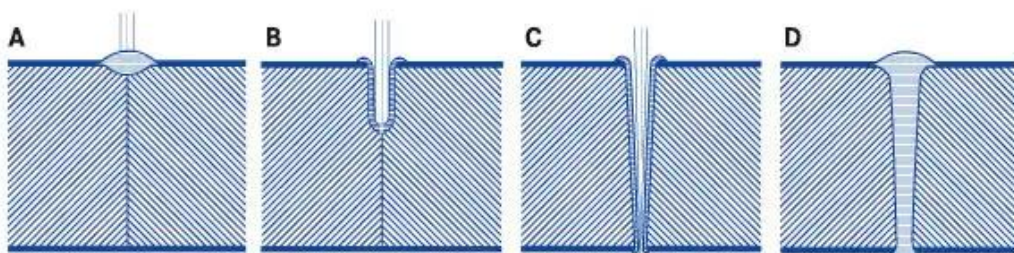
Rys. 17. Siły utrzymujące kanał w równowadze, F1– odrzut par materiału, F2 – ciśnienie par w kanale, F3 – siła tarcia między strumieniem par a warstwą ciekłą, F4 – napięcie powierzchniowe, F5 – siła elektromagnetyczna, F6 –siła termokapilarna (wskutek różnicy temperatur między tylną i przednią ścianką kanału), F7 – ciśnienie elektronów, F8 – ciśnienie hydrostatyczne, F9 – siła termokapilarna (wskutek gradientu temperatury na przedniej ściance), F10 – napięcie powierzchniowe [45, 37]

Przekrój spoiny wykonanej wiązką elektronów o głębokości penetracji 50 mm przedstawiono na Rys. 18.



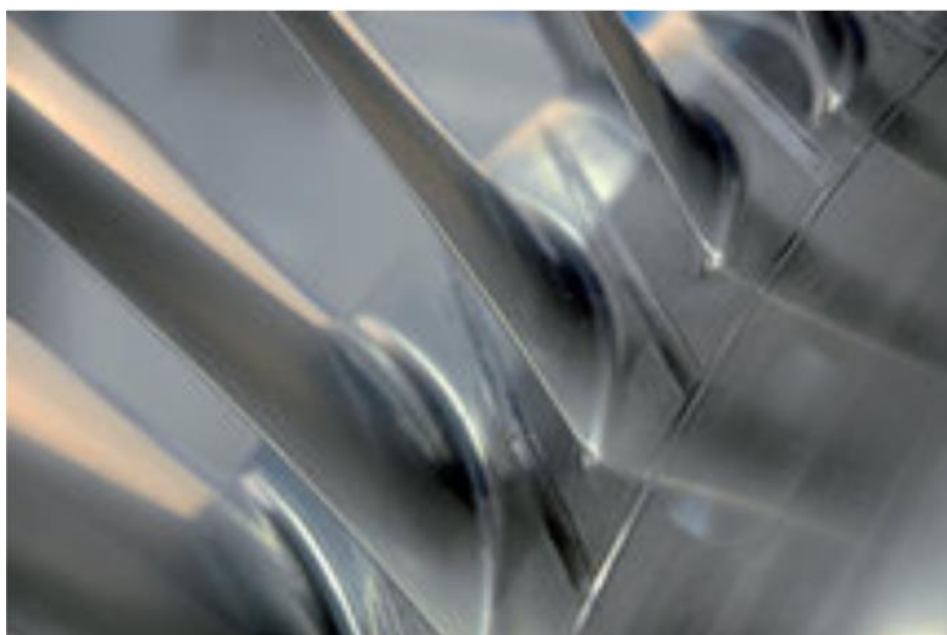
Rys. 18. Przekrój spoiny wykonanej metodą EBW (a) bez oscylacji, (b) z oscylacją [46]

Bardzo cienka spoina i jej wąskie strefy wpływu ciepła znacznie minimalizują przenoszenie energii i odkształcenia elementu spawanego. Elementy mające tendencję do odkształcania się oraz podzespoły wymagające wysokiego stopnia wstępnej obróbki mechanicznej można łączyć tą metodą bez ich uszkodzenia [47]. Na Rys. 19 przedstawiono etapy tworzenia głębokiego wtopienia podczas spawania wiązką elektronów.



Rys. 19. Etapy uzyskania głębokiego wtopienia [47]: A - wysoka koncentracja energii w miejscu wiązki topi materiał, B - materiał paruje w środku, C - wiązka wnika głębiej w obrabiany przedmiot poprzez utworzony kanał parowy, D - podczas przesuwania przedmiotu obrabianego stopiony materiał przepływa od przodu do tyłu, wokół kanału parowego i krzepnie

W wielu zastosowaniach spawanie wiązką elektronów jest jedyną możliwą technologią do zastosowania i nawet najnowszej generacji urządzenia laserowe oparte o generatory ciała stałego nie są w stanie tego zmienić. Do takich zastosowań należy m.in. spawanie elementów turbin. Na Rys. 20 przedstawiono obudowę łożyska przedniego turbosprężarki silnika turbo wentylatorowego do samolotu pasażerskiego Airbus A380. Obudowa ta składa się z szeregu oddzielnych elementów wykonanych ze stopu tytanu. Podczas spawania tych elementów w komorze próżniowej wykorzystuje się specjalne oprzyrządowanie. Pozycja i geometria złącza spawanego wymagają obracania i odpowiedniego pochylenia elementów podczas spawania [48, 49].



Rys. 20. Spawanie automatyczne obudowy łożyska przedniego [49]

Wiązkę elektronów wykorzystuje się także do drukowania 3d (Additive Manufacturing - produkcja przyrostowa). Jest to sterowany komputerowo proces, który tworzy trójwymiarowe obiekty, poprzez osadzanie materiałów zwykle w warstwach [50]. Przykład takiego wykorzystania przedstawiono na Rys. 21. General Electric Aviation wprowadził na rynek silnik do samolotów komercyjnych GE9X, który jest produkowany ze znaczną zawartością dodatków. Silnik ten zostanie zamontowany w nowym dwusilnikowym odrzutowcu Boeinga 777X. Z siedmioma komponentami i 204 częściami wytwarzanymi metodą addytywną, GE9X stanowi pierwszy komercyjny silnik wykonany w technologii AM. GE jest w stanie łączyć różne materiały w swoich AM proces. W roku 2020 silnik otrzymał ostateczny certyfikat Federalnej Administracji Lotniczej (FAA) [51].



Rys. 21. Łopatkı turbıny niskociśnieniowej (LTP) silnika GE9X [51]

2.3 Spawanie wiązka laserą

Spawanie laserowe w lotnictwie stało się rzeczywistością dzięki złożonym zamówieniom na Airbusy A318 i A380. Dolne panele kadłuba A318 są pierwszymi w historii spawanymi laserowo panelami. Panele te produkowane są w Saint-Nazaire (Francja) i Nordenheim (Niemcy). Spawarki do tej ostatniej lokalizacji dostarczyła hiszpańska firma M. Torres. W porównaniu do nitowania automatycznego, spawanie laserowe skraca czas łączenia o połowę, spawanie 8 m podłużnic zajmuje tylko jedną minutę, Niższe są także koszty produkcji. Połączenia spawane są również mniej wrażliwe na korozję niż nity [32].

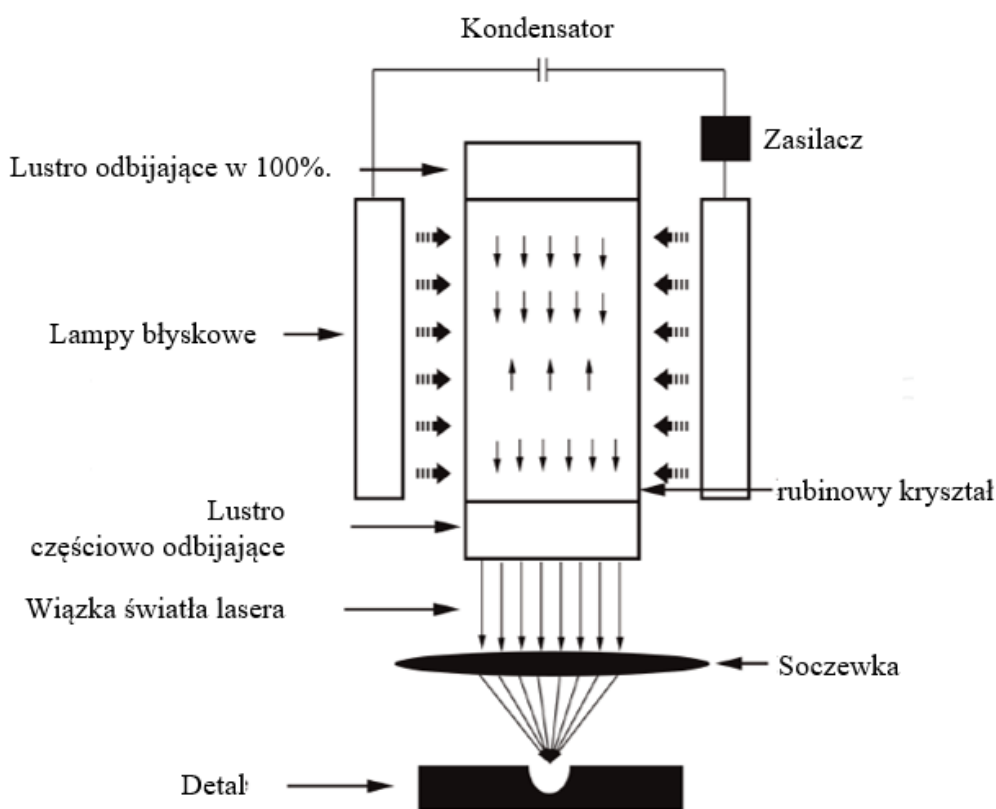
Jak opisuje J. Blackburn termin LASER (skrót od Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) odnosi się do mechanizmu wytwarzania promieniowania elektromagnetycznego, zwykle pomiędzy częstotliwościami ultrafioletowymi i podczerwonymi widma elektromagnetycznego, w procesie emisji wymuszonej [52].

Jednym z najczęstszych zastosowań spawania laserem światłowodowym w sektorze lotniczym jest tworzenie wysokojakościowych połączeń spawanych pomiędzy elementami turbin. Tradycyjnie stosowano metody takie jak lutowanie próżniowe, ale było to kosztowne i czasochłonne. Spawanie za pomocą lasera światłowodowego wiąże się z niższymi kosztami poprawek, jest znacznie szybsze, a części nie muszą być specjalnie projektowane ze szczeliną. Nie są potrzebne również żadne mocowania do utrzymywania różnych części we właściwej pozycji [53].

Lata 60-ąte XX wieku to mocny rozwój technologii laserowych. Najpowszechniej stosowany typ lasera na ciele stałym to laser Nd: YAG [51], opracowany w 1964r. W tym

samym roku został również opracowany laser CO₂ [55]. Spawanie laserowe było określane jako potencjalna technika wytwarzania części lotniczych od lat 60tych, chociaż w ostatnich latach poświęcono mu znacznie więcej uwagi. Dotyczy to przede wszystkim postępu w źródłach laserowych o dużej mocy umożliwiających głębokie wtopienia.

Technika spawania laserowego znacznie różni się od spawania łukowego. Jeziorko spawalnicze podczas spawania laserem, w porównaniu do metod konwencjonalnych jest znacznie węższe i głębsze, a ilość ciepła doprowadzana do złącza jest niewielka (strefa SWC jest znacznie mniejsza w porównaniu do metod łukowych). W metodzie tej można uzyskać wysokie prędkości spawania [56]. Te właściwości pozwalają na wykorzystanie LBW (Laser Beam Welding) w wielu aplikacjach. Głębokość wtopienia i szerokość spoiny może być dostosowana przez kontrolowanie mocy lasera, zmieniając ogniskową wiązki, prędkość spawania, sposób dystrybucji energii (pulsacyjnie, lub w trybie ciągłym) lub parametry gazu osłonowego [57]. Ze względu na krótką długość fali i zmniejszone promieniowanie materiałów metalicznych, Laser Nd: YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet) może być bardziej wszechstronny niż laser CO₂ (Rys. 22) [57].



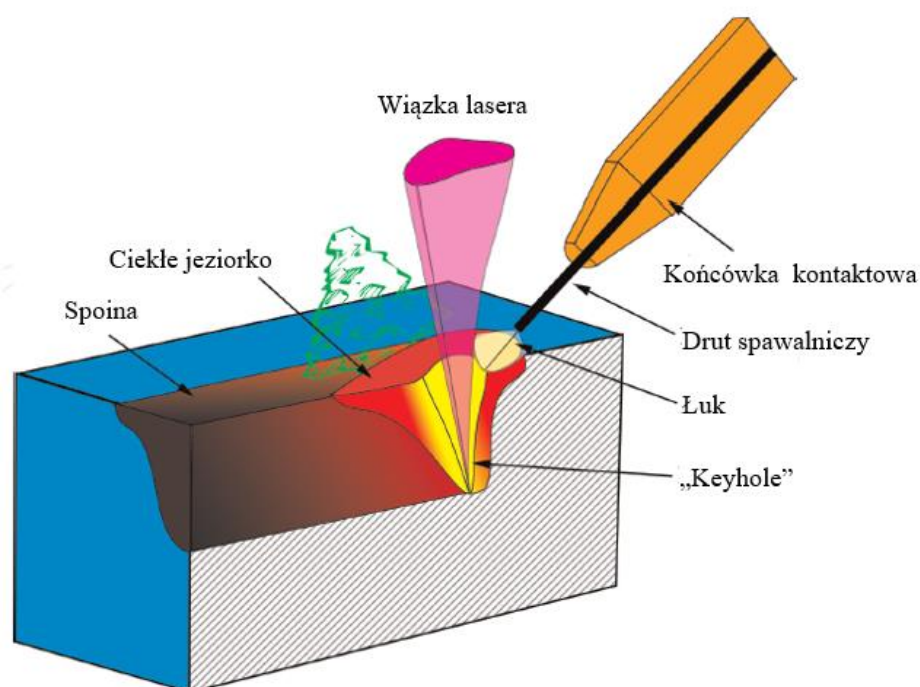
Rys. 22. Schemat wytwarzania wiązki laserowej [57]

W tabeli 10 opisano ośrodki wzmocnienia i związaną z nimi długość fali fotonów dla przemysłowych źródeł laserowych stosowanych w spawalnictwie.

Tab. 10. Typowe źródła laserowe wykorzystywane do spawania o dużej mocy [52]

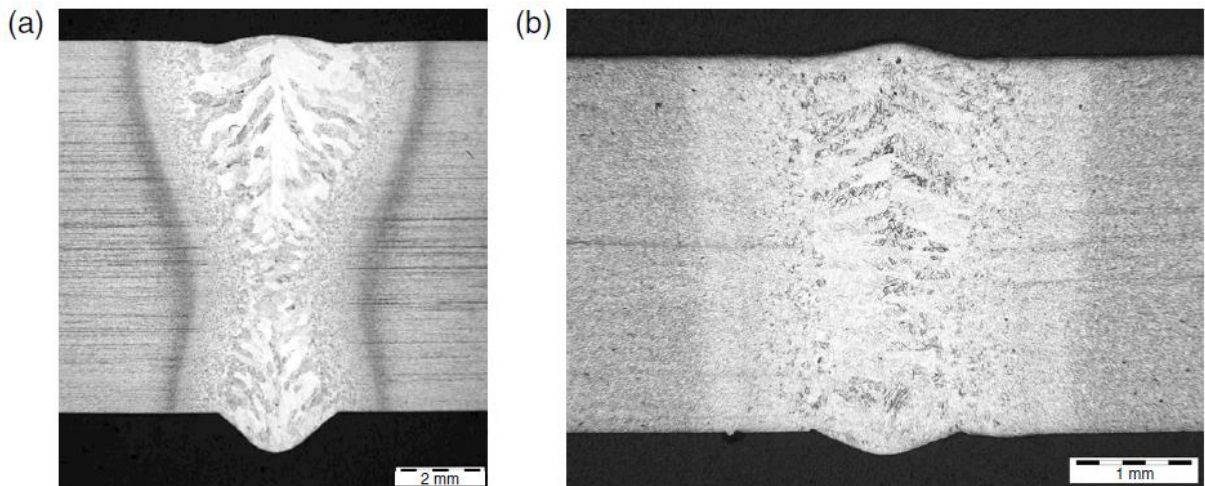
Laser	Długość fali, μm	Maksymalna dostępna na rynku moc (kW)
CO ₂	~10	20
Nd: YAG	~1	5
Yb-fibre	~1	50
Yb:YAG disc	~1	16

Droga wiązki lasera do jeziorka spawalniczego jest często zakłócana przez gromadzenie się gorących dymów w punkcie skupienia wiązki. W pewnych warunkach te gorące opary mogą zamienić się w chmurę plazmy, która silnie oddziałuje na wiązkę oraz ją pochłania i rozprasza (Rys. 23) [57]. Z tego względu ważne jest by zdefiniować parametry wpływające na balans nagrzewanie/chłodzenie, płynne jeziorko, obszar spawania, oraz opracowanie metod kontroli tych czynników.



Rys. 23. Formowanie dziurki od klucza i spawanie laserowe w trybie dziurki od klucza [57]

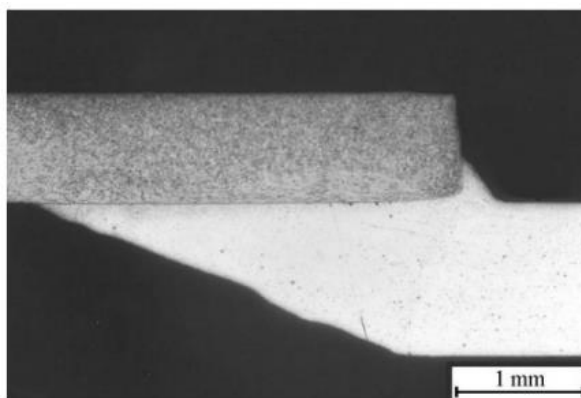
Charakterystyczne profile spoin laserowych wytwarzanych metodą „keyhole”, wykonanych z Ti-6Al-4V przy użyciu źródła lasera o średnicy 1 μm przedstawiono na Rys. 24.



Rys. 24. Profile spoin wykonanych laserem, metodą dziurki od klucza z materiału Ti-6Al-4V, (a) o grubości 9,3 mm i (b) o grubości 3,2 mm. Uwaga: różne skale. Dzięki uprzejmości TWI Ltd [52]

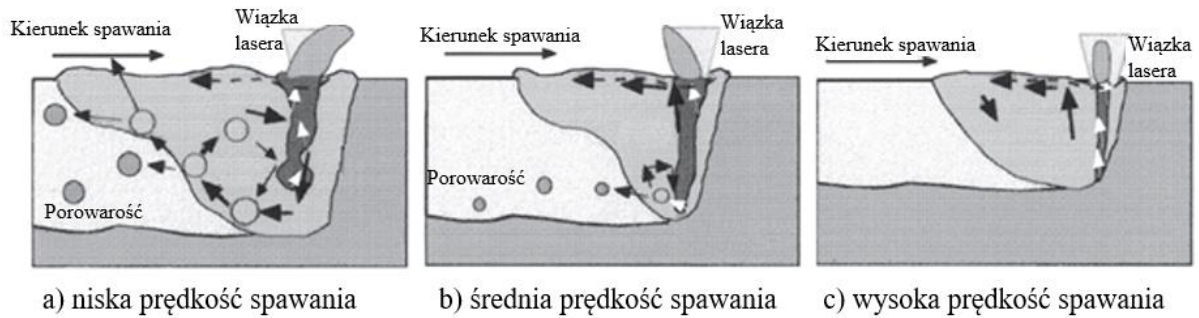
Spawanie laserem światłowodowym stopów lotniczych na bazie niklu i tytanu wymaga kontroli geometrii i mikrostruktury spoiny, w tym minimalizacji jej porowatości. W wielu zastosowaniach lotniczych właściwości zmęczeniowe spoiny są krytycznymi kryteriami projektowymi. Z tego powodu projektanci prawie zawsze określają, że lico i grań spoiny powinny być wypukłe, aby zapewnić wzmocnienie spoiny. Aby to osiągnąć należy wykonywać proces spawania z dodatkowym materiałem wypełniającym. Wybór stopu drutu ma również wpływ na właściwości mechaniczne spoiny, zapewniając odpowiednią mikrostrukturę spoiny.

Spawanie laserowe z powodzeniem wykorzystywane jest także do tworzenia połączeń różnoimiennych, między innymi w konstrukcji poszycia samolotu, gdzie wykonuje się połączenia stal-aluminium. Przykład takiego połączenia przedstawia Rys. 25.



Rys. 25. Przekrój połączenia aluminium-stal [58]

Jednym z wyzwań podczas spawania laserowego jest powstawanie pęcherzy w spoinie. Autorzy prac [59, 60] badali zachowanie keyhole oraz mechanizmy powstawania pęcherzyków i porowatości przy różnych prędkościach spawania w procesie spawania laserowego. Poinformowali, że pęcherzyki powstają na czubku keyhole. Zjawisko powstawania pęcherzy pokazano na Rys. 26.



Rys. 26. Schematyczny widok wpływu przepływu płynu na powstawanie pęcherzyków podczas spawania laserowego przy różnych prędkościach: (a) niska prędkość spawania, (b) średnia prędkość spawania i (c) duża prędkość spawania [61]

3. NAPRĘŻENIA I DEFORMACJE SPAWALNICZE

3.1 Powstawanie naprężeń spawalniczych

Naprężenia spawalnicze odnoszą się do naprężeń powstających podczas procesu spawania konstrukcji. Naprężenia te spowodowane są termicznym procesem spawania i wynikającymi z niego naprężeniami wewnętrznymi oraz zmianami kształtu konstrukcji spawanej.

Siły zewnętrzne działające na konstrukcję to: rozciąganie lub ściskanie, zginanie, lub skręcanie. Natomiast siły wewnętrzne działające na konstrukcję to napięcia. Napięcie to siła z jaką oddziałują cząstki na siebie wewnątrz ciała [62].

Naprężenie bezpośrednie σ to siła wewnętrzna wywierana przez materiał na jednostkę jego powierzchni A , gdy opiera się on zewnętrznej sile osiowej W [63]. Ponieważ siła zewnętrzna może być rozciągająca (+) lub ściskająca (-), naprężenie bezpośrednie zapisuje się jako [63]:

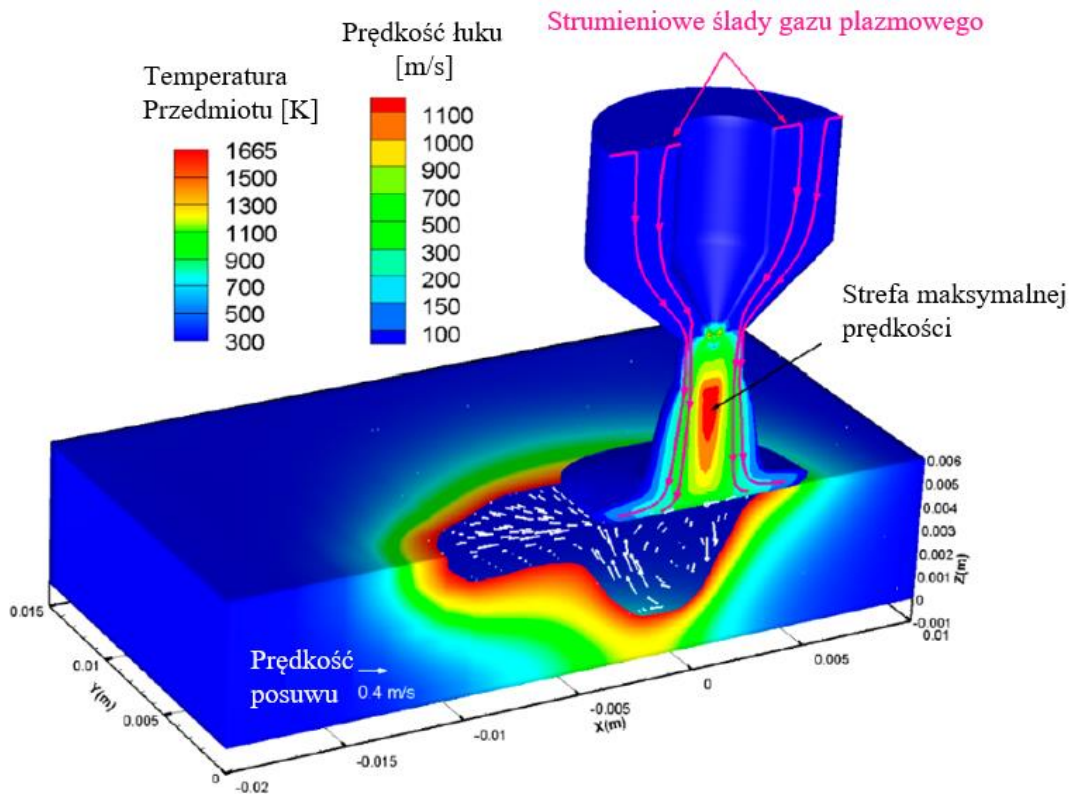
$$\sigma = \pm \frac{W}{A} \quad (1)$$

Naprężenie jest miarą stanu napięcia w danym punkcie ciała

Bezpośrednie odkształcenie ϵ , to ilość i jaką materiał będzie się rozciągać, lub ścisnąć na jednostkę swojej długości. Gdy rozciąganie lub ściskanie wynosi $\pm x$ długości l , bezpośrednie odkształcenie wynosi [63]:

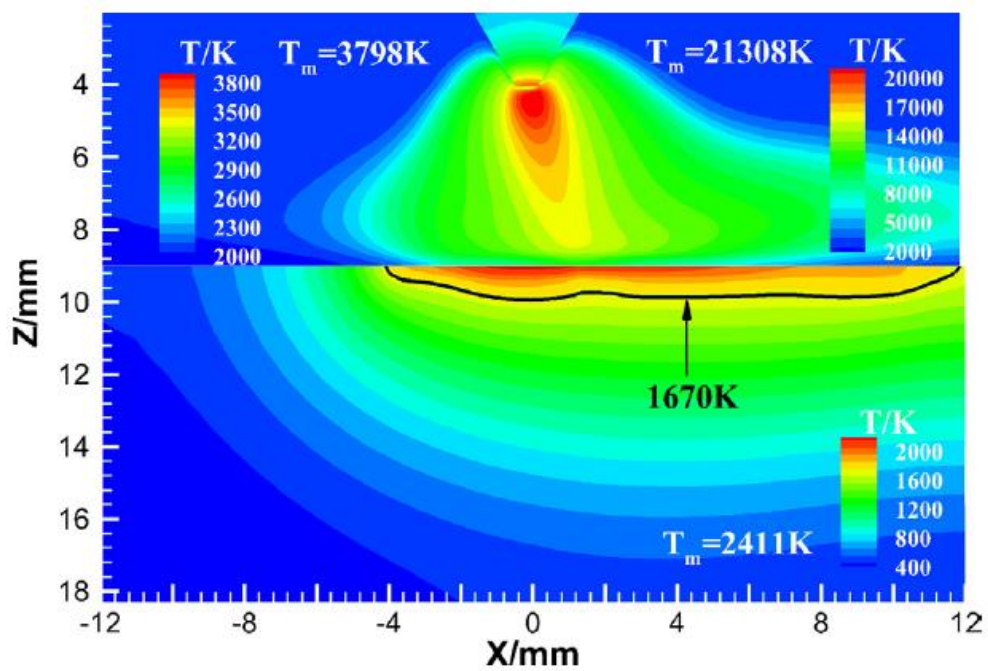
$$\epsilon = \pm \frac{x}{l} \quad (2)$$

Podczas procesu spawania łukowego TIG występuje lokalne nagrzanie materiału do temperatury topnienia, wymieszanie materiału, a następnie chłodzenie wzdłuż linii spawania do temperatury otoczenia. W zależności od energii spawania oraz odległości od jeziorka spawalniczego, materiał nagrzewa się do różnych temperatur. Wahania temperatury spoin i metali macierzystych mają istotny wpływ na właściwości materiału, naprężenia szczątkowe, dokładność wymiarową i kształtową elementów spawanych [64]. Zjawisko nagrzewania materiału dookoła jeziorka spawalniczego przedstawia tak zwane pole temperatur (cykl cieplny). Rozkład 3D temperatur oraz strumień przepływu opracowany na podstawie symulacji numerycznej metody spawania plazmowego przedstawiono na Rys. 27.



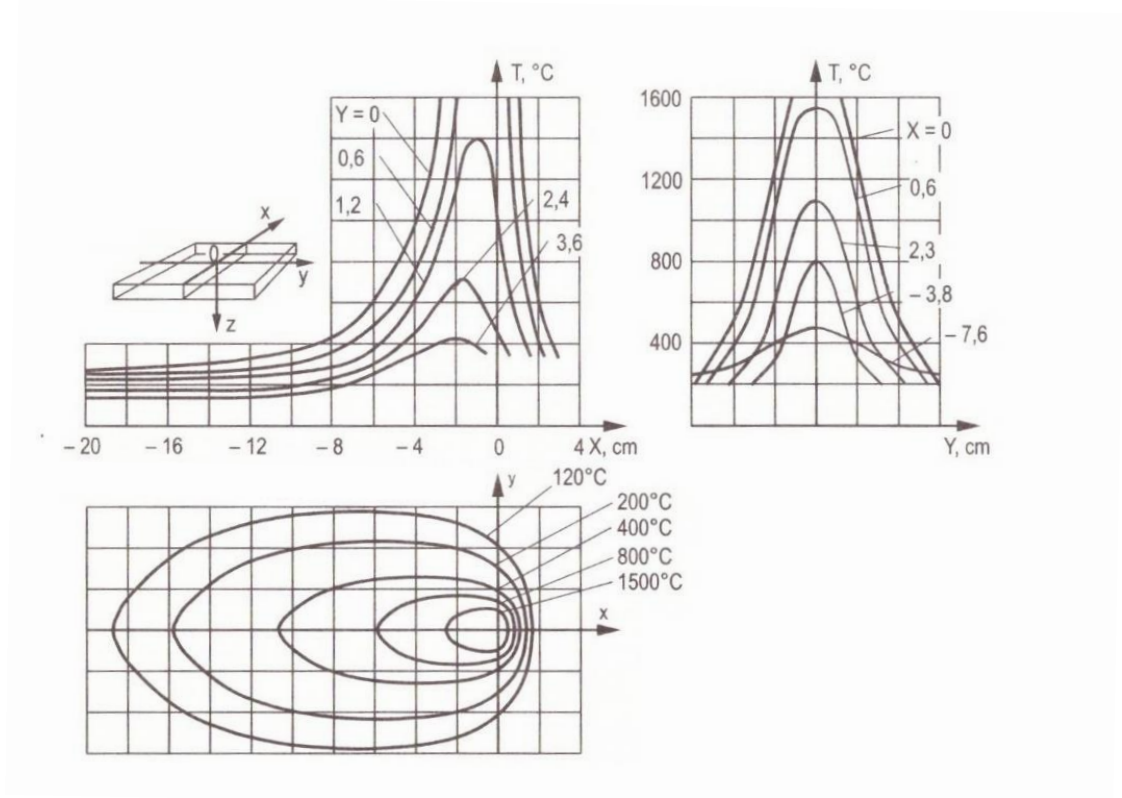
Rys. 27. Rozkład temperatur oraz strumień przepływu plazmy w łuku i jeziorce spawalniczym [65]

Rozkład temperatur wokół źródła ciepła w metodzie TIG przedstawiono na Rys. 28.



Rys. 28. Pola temperaturowe w łuku i elektrodzie GTAW z ETMF [66]

Właściwości materiału podstawowego zmieniają się w zależności od temperatury. Podczas spawania obszary nagrzane do różnych temperatur w SWC po schłodzeniu charakteryzują się zmienną strukturą i zmiennymi właściwościami mechanicznymi. Dotyczy to także ciekłego jeziora i spoiny. W przypadku spawania łukowego łuk elektryczny nagrzewa intensywnie miejsce spawania. Przesuw źródła ciepła powoduje nierównomierne nagrzewanie się materiału. Rozkład temperatur wokół przesuwanego się źródła ciepła przedstawiono na Rys. 29.

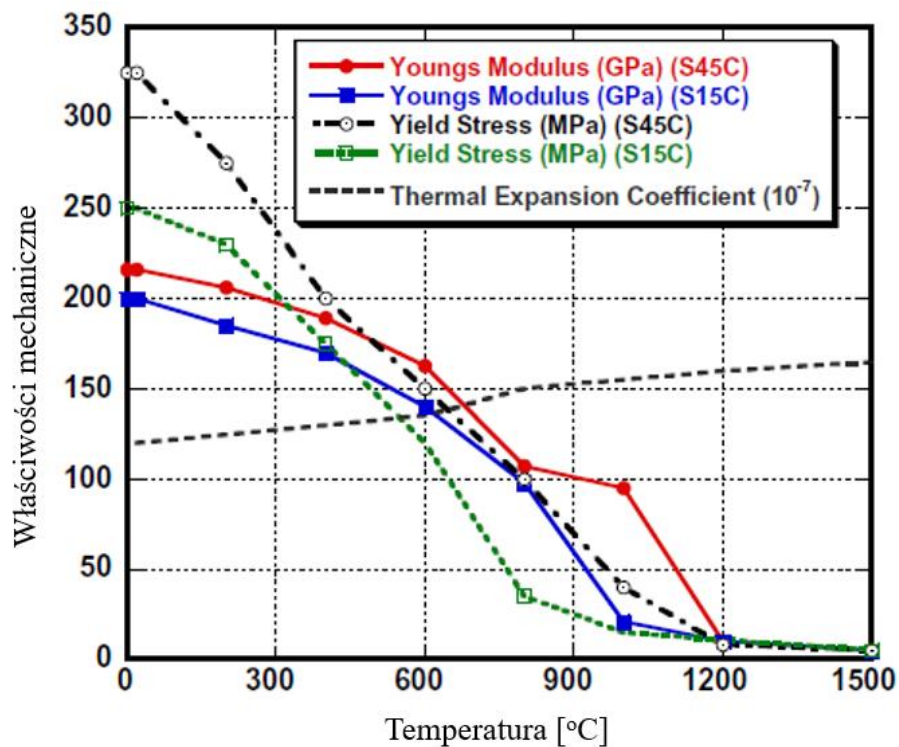


Rys. 29. Rozkład temperatur wokół źródła ciepła spawania [67]

Stan mechaniczny materiału w różnych temperaturach można opisać za pomocą takich parametrów jak:

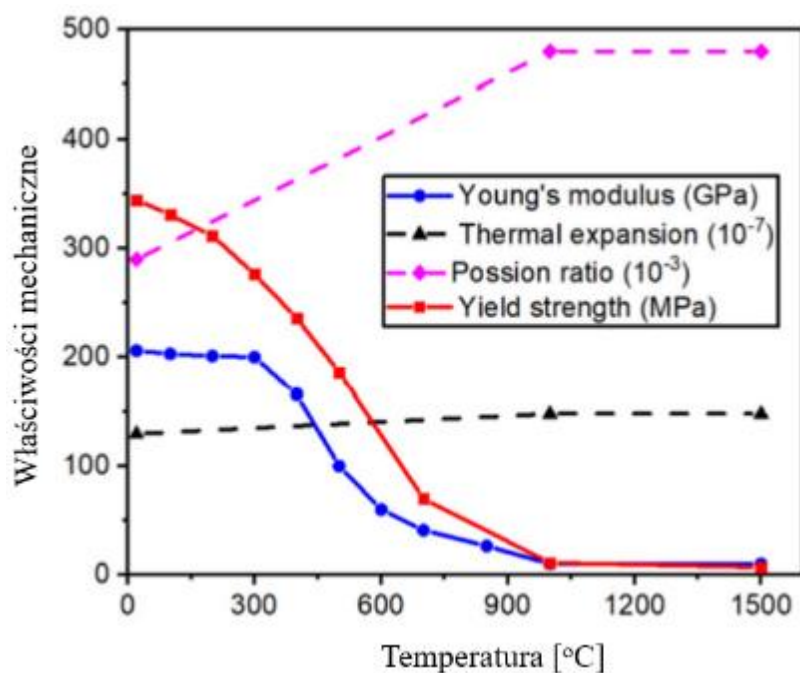
- moduł sprężystości podłużnej E w układzie SI (moduł Younga E),
- moduł sprężystości postaciowej G (Moduł Kirchhoffa G),
- współczynnik Poissona ν ,
- granica plastyczności R_e ,
- współczynnik rozszerzalności liniowej α .

Wartości poszczególnych parametrów różnią się w zależności od rodzaju materiału podstawowego oraz zmieniają się wraz ze zmianą temperatury materiału. Moduł Younga (moduł sprężystości podłużnej) określa sprężystość materiału przy rozciąganiu i ściskaniu. Wyraża ona charakterystyczną dla danego materiału zależność względnego odkształcenia liniowego ε materiału od naprężenia σ jakie w nim występuje. Moduł Younga E najczęściej zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury (właściwości sprężyste zmniejszają się). Przykład zależności modułu Younga od temperatury dla stali nisko i średnio węglowej przedstawiono na Rys. 30 [68] oraz Rys. 31 [69].



Rys. 30. Mechaniczno-fizyczne właściwości materiału, w zależności od jego temperatury [68]

Jak można zaobserwować na Rys. 31 granica plastyczności również maleje wraz ze wzrostem temperatury. Oznacza to, że wraz ze wzrostem temperatury wzrasta skłonność materiału do odkształceń plastycznych (aby wywołać dane odkształcenie, wartość siły rozciągającej jest mniejsza w wyższych temperaturach).

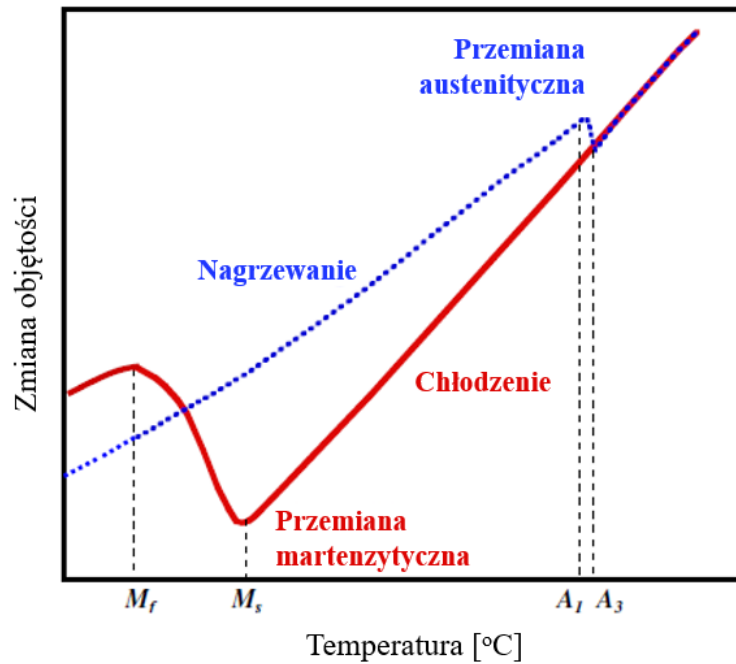


Rys. 31. Właściwości stali węglowej AH36 [69]

Współczynnik rozszerzalności cieplnej α (liniowej), jako parametr określający wielkość odkształceń pod wpływem temperatury, ma istotne znaczenie w procesie tworzenia się naprężeń i odkształceń cieplnych [67]. Jak przedstawiono na Rys. 30 wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej wzrasta wraz ze wzrostem temperatury.

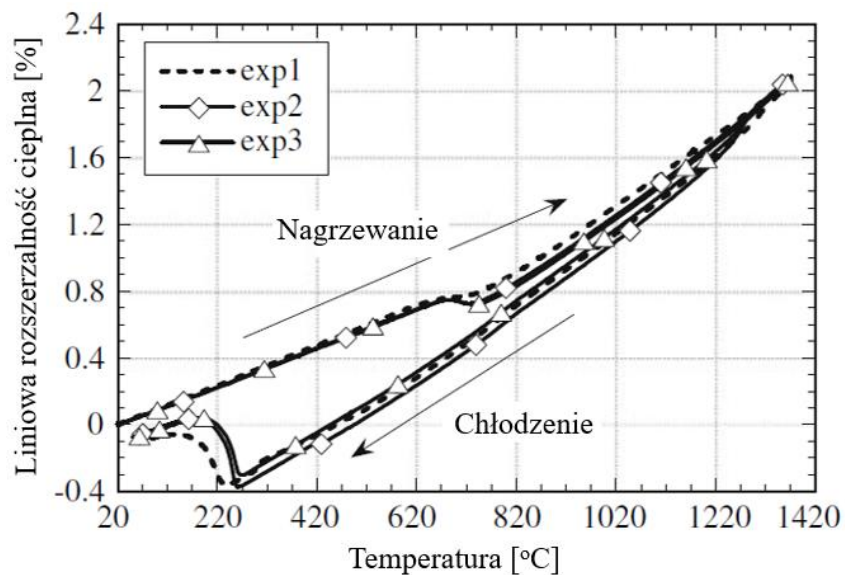
Procesowi spawania, a dokładniej nagrzewania i chłodzenia materiału w okolicach miejsca spawania towarzyszą także zmiany parametrów fizycznych, takich jak objętości, czy gęstości. Zmianę objętości materiału z grupy stali nierdzewnych utwardzalnych wydzieleniowo 17-4PH, który wykorzystywany jest w tej pracy, przedstawiono na Rys. 32.

Stal węglowa podczas ogrzewania i chłodzenia nie zachowuje się w ten sam sposób. Na Rys. 32 można zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury wzrasta objętość materiału, do osiągnięcia temperatury A_1 . Podczas chłodzenia zmiana objętości następuje szybciej niż podczas nagrzewania, w wyniku czego materiał ma mniejszą objętość w temperaturze M_s , niż miał przed nagrzaniem. W dalszym etapie chłodzenia następuje znaczny wzrost objętości do osiągnięcia temperatury M_f , a następnie powolny stały spadek objętości. W efekcie tego materiał po nagrzaniu i schłodzeniu ma większą objętość niż przed cyklem nagrzewania i chłodzenia.



Rys. 32. Schematyczny diagram zmiany objętości w wyniku przemiany fazowej (stal węglowa) [68]

Na Rys. 33 przedstawiono wyniki trzech serii pomiarowych współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej podczas nagrzewania i chłodzenia z prędkością 3 °C/min odlewu ze stali 17-4PH.



Rys. 33. Zmierzona liniowa rozszerzalność cieplna odlewu ze stopu 17-4PH [70]

W pracy [70] (Rys. 32) stwierdzono, że krzywe ogrzewania i chłodzenia nie zachowują się w ten sam sposób. Podczas nagrzewania stop 17-4PH składa się głównie z odpuszczonej fazy martenzytycznej do temperatury około 700 °C, w której to temperaturze faza ta zaczyna

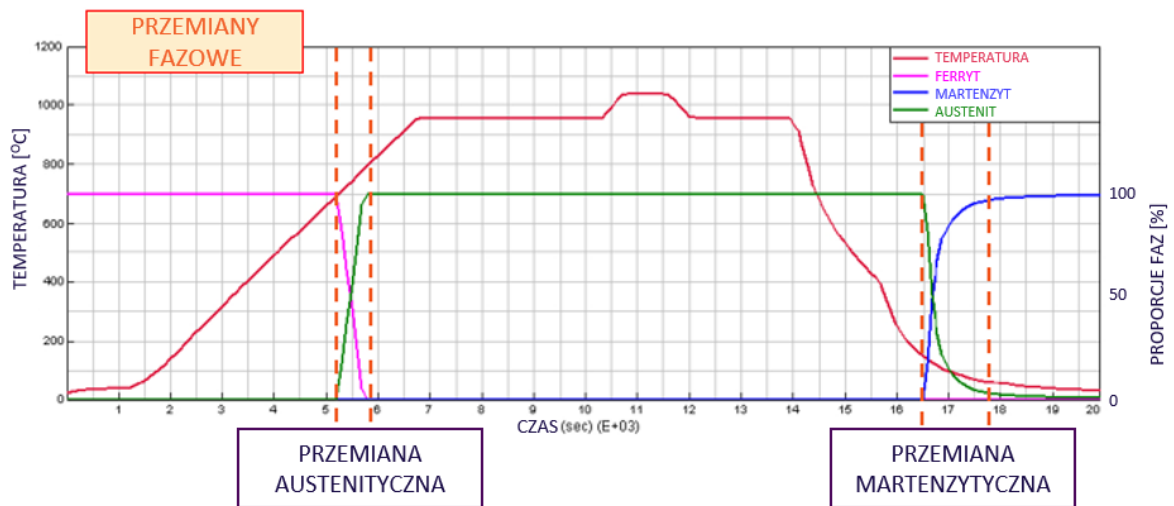
przekształcać się w austenit. Transformacji tej towarzyszy zarówno skurcz objętościowy, jak i większy CTE (baza danych Compu Therm zawierająca objętości molowe i termiczne współczynniki rozszerzalności cieplnej) dla fazy austenitu. Obydwa te efekty są widoczne na krzywej grzewczej pokazanej na Rys. 32. Podczas chłodzenia, w temperaturze około 265°C, stop wykazuje gwałtowne rozszerzanie (zamiast ciągłego kurczenia się). Ekspansja ta jest spowodowana przemianą wysokotemperaturowej fazy austenitu z powrotem w martenzyt. Dokładna temperatura rozpoczęcia tej przemiany, M_s , jest określona przez skład chemiczny austenitu.

Powyższe zmiany dotyczą materiału zlokalizowanego w strefie wpływu ciepła spoiny, a także samej spoiny. Należy podkreślić, że objętość stali po procesie cieplnym może się zmienić w zależności od prędkości nagrzewania i chłodzenia.

Nierównomierny proces nagrzewania wywołany jarzeniem łuku elektrycznego między materiałem spawanym i elektrodą powoduje wzrost objętości materiału w różnych obszarach złącza o różnej intensywności. Dodatkowo podczas chłodzenia występują znaczne zmiany prędkości rozszerzania i kurczenia się materiału. Zmiana parametrów fizycznych stali podczas spawania to jeden z istotniejszych czynników wpływających na stan naprężeń i odkształceń spawalniczych.

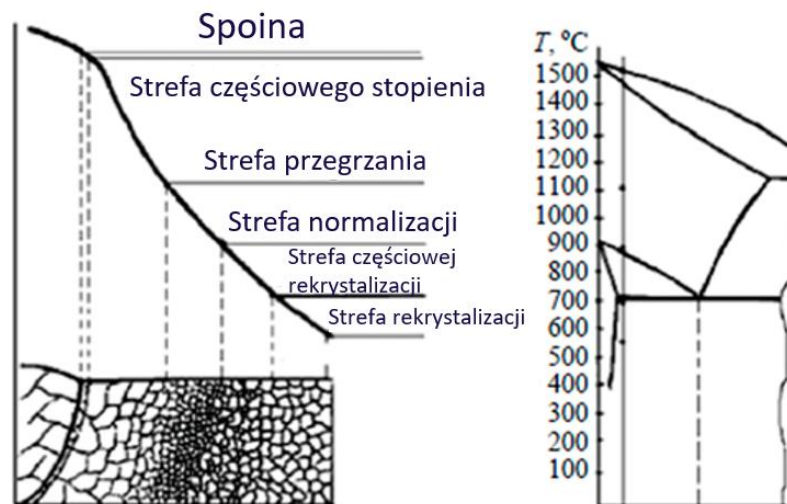
Podczas spawania w materiale podstawowym zachodzą także zmiany struktury, podobne do tych jakie zachodzą w materiale podczas obróbki cieplnej. Różnica przy spawaniu jest taka, że materiał nagrzewany jest lokalnie na bardzo niewielkiej powierzchni, prędkość nagrzewania jest bardzo wysoka, a maksymalna temperatura przekracza temperaturę topnienia materiału. Natomiast podczas obróbki cieplnej stali, prędkość nagrzewania i chłodzenia jest stosunkowo niewielka, zmiana temperatury występuje na większej powierzchni, oraz nie przekracza temperatury topnienia materiału podstawowego. Na Rys. 34 przedstawiono schemat zmian struktury stopu 17-4PH podczas nagrzewania i chłodzenia na przykładzie procesu przesycania. Można zauważyć, że podczas transformacji struktur następuje zmiana współczynnika rozszerzalności cieplnej jak przedstawiono na Rys. 30.

Analogiczne zmiany w szybszym tempie zachodzą podczas spawania. W zależności od temperatury do jakiej nagrzał się materiał SWC, jego struktura i właściwości będą inne.



Rys. 34. Zmiany struktury stali 17-4PH podczas symulacji procesu przesycania [19]

Zjawisko przegrzania materiału SWC i zmiany struktury dobrze przedstawiono w pracy [69]. Badania wykazały, że SWC nagrzewa się nierównomiernie na całej szerokości; maksymalna temperatura występująca w pobliżu przegrzanego obszaru wynosi 1400-1500°C. Krzywa charakterystyczna przedstawiona na Rys. 35 pokazuje obszary SWC różniące się strukturą krystaliczną i różnym rozdrobnieniem ziaren w zależności od temp przegrzania.



Rys. 35. Struktura strefy wpływu ciepła (SWC) [71]

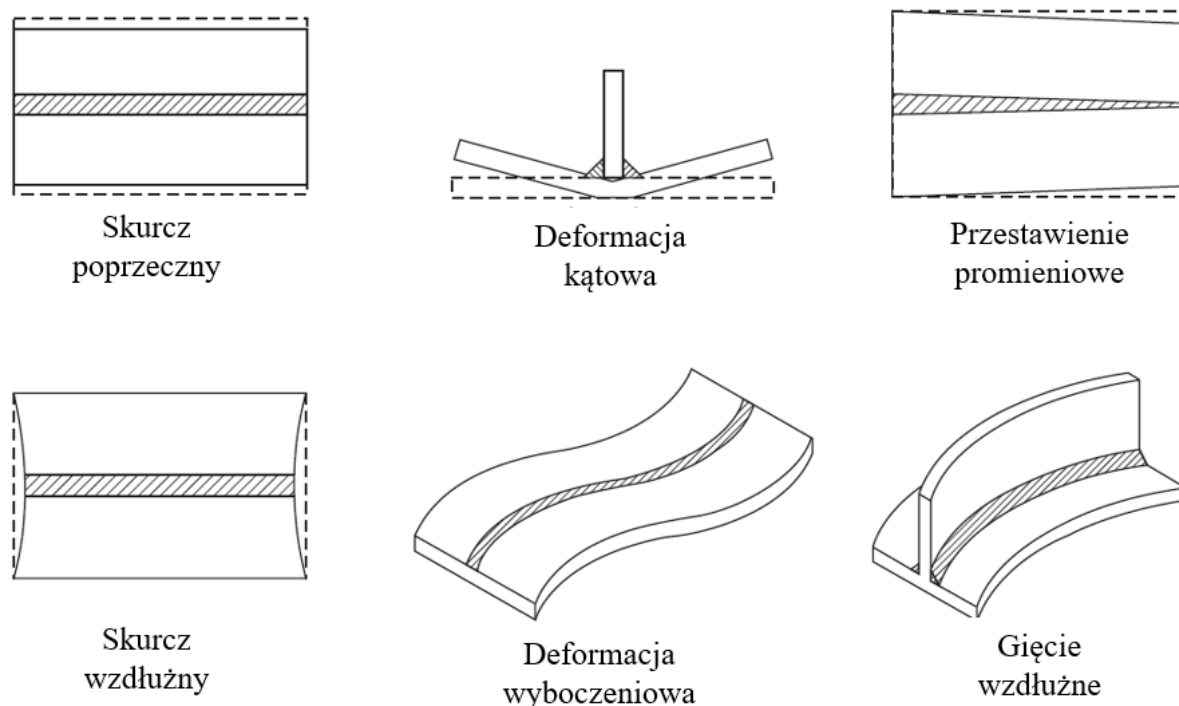
W przypadku spoiny, która jest nagrzewana nierównomiernie następuje silne oddziaływanie naprężeniowe pomiędzy jej różnymi obszarami. W związku z tym można założyć, że im bardziej równomierny i stabilny proces nagrzewania/spawania, tym mniejsze naprężenia wewnętrzne.

Materiał podczas spawania nagrzewa się i chłodzi. Podczas tych procesów cieplnych następuje zjawisko intensywnej dylatacji (rozszerzania się i kurczenia). Przyrost długości wynika z równania [67]:

$$\Delta l = l\alpha\Delta T \quad (3)$$

gdzie: Δl – przyrost długości [mm], l – długość początkowa [mm], α – współczynnik rozszerzalności cieplnej [K^{-1}], ΔT – przyrost temperatury [K]

Nagrzewanie i chłodzenie materiału jest krótkie w czasie i nierównomierne – podczas tych procesów w materiale zachodzą zmiany właściwości mechanicznych, zmiany właściwości fizycznych i przemiany fazowe (zmiany struktury). W efekcie tego na niewielkiej powierzchni w materiale powstają naprężenia mechaniczne pomiędzy poszczególnymi obszarami złącza. W strefie nagrzewanej ciepłem łuku następuje rozszerzanie się materiału (rozpychanie gorącego materiału w chłodnej osnowie). Powoduje to spęczenie plastyczne materiału. W obszarze spadku temperatury (w pewnej odległości od spoiny) następuje reakcja odwrotna, kurczenie się odkształconego plastycznie metalu. Spęczenie w strefie przy spoinie uniemożliwia powrót do kształtu początkowego, w rezultacie po ochłodzeniu następuje wygięcie. Gdy naprężenia wewnętrzne przekroczą wartości granicy plastyczności następuje pęknięcie materiału. Inaczej mówiąc szybkie nagrzanie i chłodzenie powoduje mechaniczne oddziaływanie pomiędzy różnymi obszarami złącza spawanego [72]. Proces ten jest dodatkowo intensyfikowany przez zachodzące przemiany fazowe (przemiany w stanie stałym w strefie wpływu ciepła). W określonych obszarach złącza spawanego mogą wystąpić zmiany wymiarów i kształtu elementów konstrukcyjnych, wynikające z rozszerzania lub kurczenia się materiału spawanego i spoiny. Odkształcenia te mogą mieć charakter podłużny, poprzeczny lub kątowy. Przyczyną odkształceń wzdłużnych jest skurcz spoiny oraz skurcz materiału sąsiadującego w kierunku długości złącza spawanego [73]. Odkształcenia katowe występują we wszystkich typach połączeń i spoin. Są one wywołane nierównomiernym skurczem poprzecznym spoiny na jej grubości oraz skurczem metalu sąsiadującego ze spoiną. Miarą odkształcenia katowego jest kąt β , który jest kątem załamania płaszczyzny podstawy. Metodę wyznaczania tego kąta za pomocą metod numerycznych i sieci neuronowych opisują m.in. autorzy pracy [74]. Suma występujących skurczy w poprzek i wzdłuż spoiny powoduje wystąpienie różnych deformacji, które przedstawiono na Rys. 36. Skurcz na grubości ze względu na wprowadzanie nieznaczących zmian jest w tym przypadku pominięty.



Rys. 36. Rodzaje skurczu spawalniczego i deformacji spawalniczych [75]

Bazując na powyższych informacjach można poprawnie wywnioskować, że wartości skurczu zależą od właściwości materiału podstawowego, objętości stopionego metalu oraz poziomu przegrzania stref w pobliżu linii wtopienia. Podstawowe parametry mające wpływ na poziom deformacji to:

- rodzaj materiału podstawowego i jego wymiary,
- konfiguracja połączenia (rodzaj złącza, sposób ukosowania, usztywnienie konstrukcji),
- rodzaj metody spawania, energia liniowa procesu,
- ilość wprowadzanego materiału dodatkowego podczas spawania.

3.2 Przewidywanie naprężeń – symulacje

Projektowanie konstrukcji w przemyśle lotniczym odbywa się z wykorzystaniem systemów komputerowych. Począwszy od typowych narzędzi konstruktorskich do modelowania 2D/3D (single-user), skończywszy na wirtualnej bazie danych do zarządzania wszystkimi podzespołami wchodzącymi w skład danego silnika (multi-user), uwzględniając rysunki poszczególnych elementów, numery wydania – konfiguracje silnika, a także zarządzanie poddostawcami wykonującymi dane części.

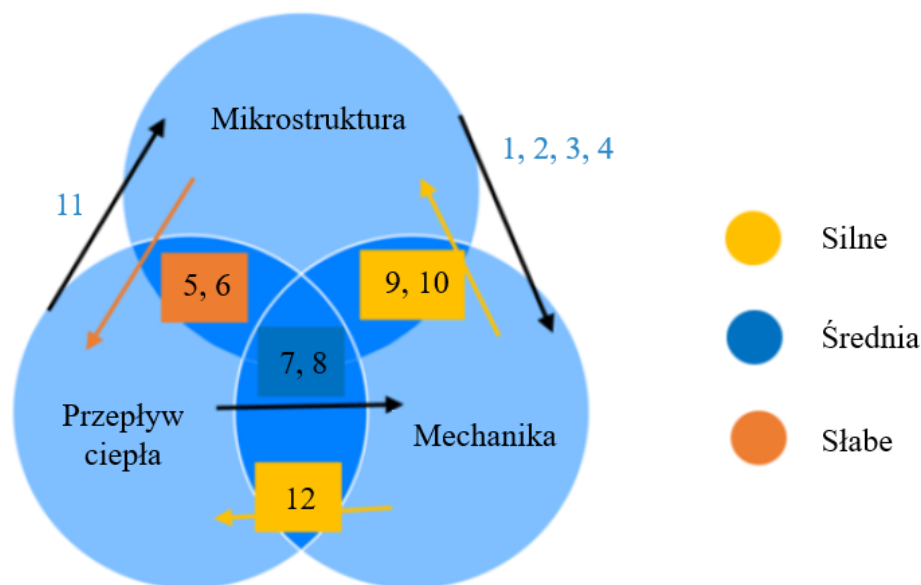
Duży postęp metod numerycznych jest widoczny także w dziedzinie wirtualnej symulacji warunków pracy danej części, oraz analizy wytrzymałościowej. Postęp metod numerycznych

stał się głównym inicjatorem badań nad modelami symulacyjnymi procesów wytwarzania, w tym spawania, obejmujących szerokie spektrum procesów fizycznych i termicznych zachodzących w materiałach konstrukcyjnych [76]. Obecnie dostępnych jest wiele rodzajów metod elementów skończonych MES (Finite Element Method - FEM), obejmujących symulacje części w zakresie sprężystym, oraz uwzględniających odkształcenia plastyczne. Symulacja numeryczna jest jednym z nowoczesnych narzędzi przewidywania naprężeń i odkształceń spawalniczych. W literaturze technicznej donoszą badania nad wykorzystaniem różnych programów do modelowania rozkładów naprężeń i odkształceń spawalniczych, takich jak SYSWELD [77-79], ANSYS [80-82], ABAQUS [83, 84] czy AUTODESK CFD [85].

Do symulacji procesu spawania, niezbędne jest odpowiednie oprogramowanie uwzględniające odkształcenia plastyczne - deformacje, przemiany strukturalne, itd. Obecnie na rynku dostępne są oprogramowania, umożliwiające symulację procesów cieplnych takich jak spawanie i obróbka cieplna. Do dokładnej symulacji, poza oprogramowaniem wymagane jest także posiadanie danych materiałowych uwzględniające charakterystykę współczynników fizyczno-mechanicznych w zakresie temperatur dla jakich przeprowadzana jest symulacja. Aby pozyskać takie dane, wymagana jest nie tylko duża wiedza, ale także dostęp do szerokiego zaplecza laboratoryjnego, skupiającego się na właściwościach mechanicznych i termo-metalurgicznych stosowanych materiałów [86].

Analiza numeryczna spawania musi uwzględniać trzy główne połączenia pola, które oddziałują na siebie, jak pokazano na Rys. 37. Relacje pomiędzy tymi polami wyjaśnia następująca sekwencja [87-89]:

1. Naprężenia termiczne wywołane zmianami mikrostrukturalnymi.
2. Zachowanie sprężyste/plastyczne.
3. Transformacja fazowa powodująca zmiany objętościowe.
4. Zmiany mikrostruktury i towarzyszące naprężenia plastyczne.
5. Mikrostruktura materiału może wpływać na właściwości termiczne.
6. Transformacja fazowa powoduje powstanie ciepła utajonego.
7. Wpływ deformacji na termiczny stan brzegowy.
8. Naprężenia plastyczne i sprężyste mogą wpływać na wytwarzanie ciepła.
9. Deformacje wynikają z ewolucji mikrostruktury.
10. Na przemiany fazowe wpływa naprężenie.
11. Cykle termiczne mają bezpośredni związek ze strukturą.
12. Odkształcenia powstają na skutek zmian temperatury.



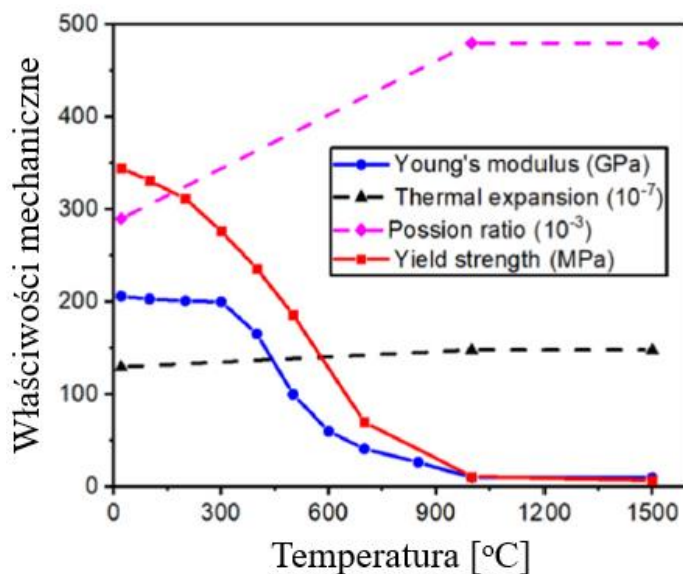
Rys. 37. Zależności w symulacjach spawania [87]

W firmie MB Aerospace Rzeszów, w której wykonywane są komponenty to silników lotniczych, w większości przypadków zastosowano spoiny obwodowe wykonywane automatycznie metodą TIG. Najczęściej spotykane są złącza doczołowe, elementów o grubościach w zakresie 0,5-2 mm.

Autorzy pracy [69] wykonali analizę formowania naprężeń podczas spawania obwodowego TIG elementów cienkościennych. W swojej pracy opracowali termoplastyczno-sprężysty numeryczny model 3D do przewidywania rozkładu naprężeń szczątkowych metodą MES. Mimo iż wyników tej pracy nie można przełożyć bezpośrednio na analizowany w tej pracy przypadek (ze względu na zastosowanie innego materiału, wymiarów złącza oraz innych warunków spawania) to można przywołać ogólne zasady wykonania symulacji i powstawania naprężeń na zbliżonym przypadku. Autorzy wykonali symulację spawania rur ze stali SUS304 (stali nierdzewnej stosowanej w przemyśle medycznym, spożywczym, elektronicznym), o grubości 3 mm – znacznie większej grubości niż stosowane połączenia w przemyśle lotniczym. Zbudowaną siatkę MES (FEM) połączenia rurowego przedstawia Rys. 38, widoczne jest zastosowanie stosunkowo drobnej siatki w odległości 10 mm po obu stronach linii środkowej spoiny (WL). Właściwości termofizyczne zależne od temperatury przedstawiono na Rys. 39.



Rys. 38. Symulacja spawania obwodowego TIG: A) MES (FEM) model [69]

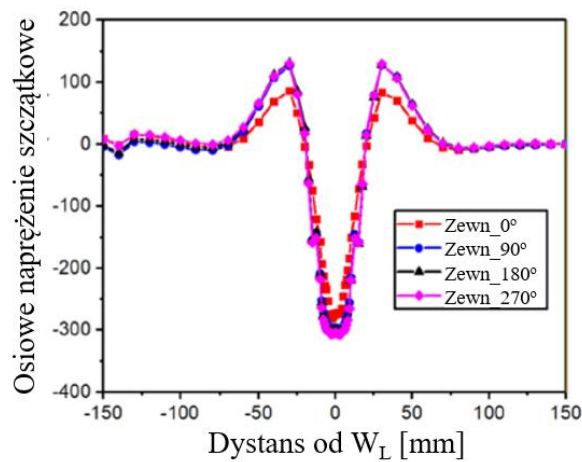


Rys. 39. Symulacja spawania obwodowego TIG: właściwości stali niskowęglowej AH36 [69]

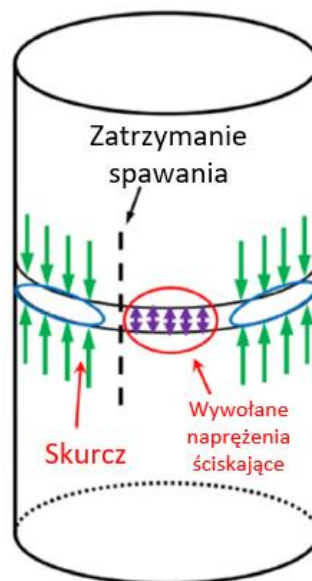
W przypadku materiału spoiny tylko granica plastyczności jest większa niż materiału podstawowego. Pozostałe właściwości są takie same jak materiału bazowego [69]. Zmiany osiowych naprężeń szczątkowych na zewnętrznej powierzchni rur w miejscach o kątach 0° , 90° , 180° i 270° przedstawia Rys. 40.

Po drugim cyklu nagrzewania (zakończenie spoiny) i po chłodzeniu, końcowe osiowe naprężenie szczątkowe powierzchni wewnętrznej przed położeniem zatrzymania spoiny staje

się dużym naprężeniem ściskającym w wyniku redystrybucji naprężeń szczątkowych spawania i równowagi naprężeń wewnętrznych, jak pokazano na Rys. 41 [69].



Rys. 40. Symulacja spawania obwodowego TIG: Osiowe naprężenia szczątkowe na zewnętrznej powierzchni rur [69]



Rys. 41. Symulacja spawania obwodowego TIG: Charakterystyka końcowego osiowego naprężenia szczątkowego w pobliżu pozycji zatrzymania spoiny [69]

3.3 Metody redukcji deformacji

Obecnie znane są ogólne zasady redukcji deformacji po spawaniu, jednak żadne z nich nie są w stanie całkowicie wyeliminować deformacji. Nie wszystkie metody można wykorzystać w branży lotniczej.

Podstawowe metody zmniejszenia naprężeń wewnętrznych i w efekcie deformacji detalu przedstawiono poniżej:

- a) Zmniejszenie energii liniowej spawania [90]

$$E = \frac{U \cdot I}{v} \left[\frac{kJ}{mm} \right] \quad (4)$$

Energię liniową spawania można powiązać z ilością wprowadzonego ciepła Q , stosując umowny współczynnik sprawności cieplnej procesu spawania η [90]. Zmniejszenie energii liniowej powoduje spadek ilości ciepła wprowadzonego do miejsca spawania, w efekcie czego zmniejszy się gradient temperatur. Ogrzewanie i chłodzenie musi przebiegać powoli, aby uniknąć dużych różnic temperatur pomiędzy powierzchnią a wnętrzem elementu. W przeciwnym razie powiązane naprężenia termiczne mogą powodować pęknięcia i uniemożliwiać pożądaną redukcję naprężeń szczątkowych w wyniku generowania nowych naprężeń szczątkowych [91]. Zmniejszyć energię spawania można za pomocą zmniejszenia napięcia-natężenia prądu, oraz zwiększając prędkość procesu spawania, zwracając uwagę na efekt końcowy jaki zostanie uzyskany po zmianie parametrów spawania. Zbyt mała energia liniowa może spowodować braki pełnego przetopu, natomiast zbyt duża energia liniowa zwiększy SWC, może być przyczyną powstania niezgodności spawalniczych (pęcherzy, podtopień).

- b) Zmniejszenie objętości spoiny

Zmniejszając objętość spoiny zmniejszamy objętość materiału jaki zostanie stopiony, a w efekcie zmniejszamy skurcz, który towarzyszy procesowi krzepnięcia spoiny. Ostatecznie mniejszy skurcz spoiny wywoła mniejsze naprężenia wewnętrzne, a to przełoży się na zmniejszenie deformacji części. Objętość spoiny możemy zmniejszyć poprzez zmianę kształtu ukosowania złącza i zmniejszając szczelinę pomiędzy łączonymi detalami, oraz zmniejszając ilość materiału dodatkowego do spawania.

- c) Zmiana sekwencji spawania

Spawanie na przemian z obu stron osi obojętnej przekroju, jeżeli możliwe może zminimalizować deformacje detalu, poprzez wyrównanie naprężeń, wypadkowa równa 0. W efekcie w materiale będą nadal występowały naprężenia wewnętrzne, lecz ich wypadkowa równa 0 nie spowoduje deformacji części (aby siły skurczu od wykonanych spoin ciągle się równoważyły wokół osi obojętnej przekroju sekcji) [92].

- d) Obróbka cieplna przed i po spawaniu

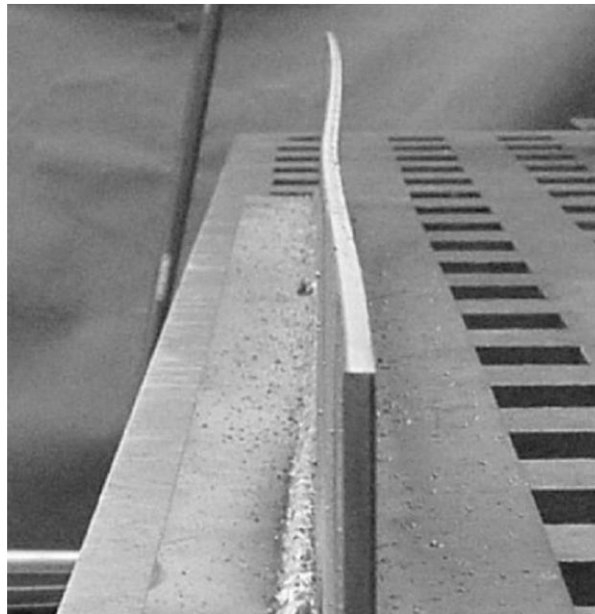
Zwiększając temperaturę materiału przed spawaniem zwiększamy jego plastyczność (zdolność do odkształceń). W efekcie materiał jest zdolny do odkształceń w okolicach spoiny, które w warunkach bez wstępnego podgrzewania mogły by przekroczyć granicę plastyczności i spowodować pękanie materiału.

e) Usztywnienie konstrukcji

Usztywnienie konstrukcji zablokuje możliwość odkształceń metalu (relaksacji naprężeń). W efekcie usztywnienia można zredukować deformacje, jednak naprężenia wewnętrzne nadal będą występowały. Jeżeli wartość naprężeń wewnętrznych będzie zbyt duża może to doprowadzić do powstania pęknięć, których przyczyną będzie zbyt duże usztywnienie konstrukcji.

4. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA I TEZA PRACY

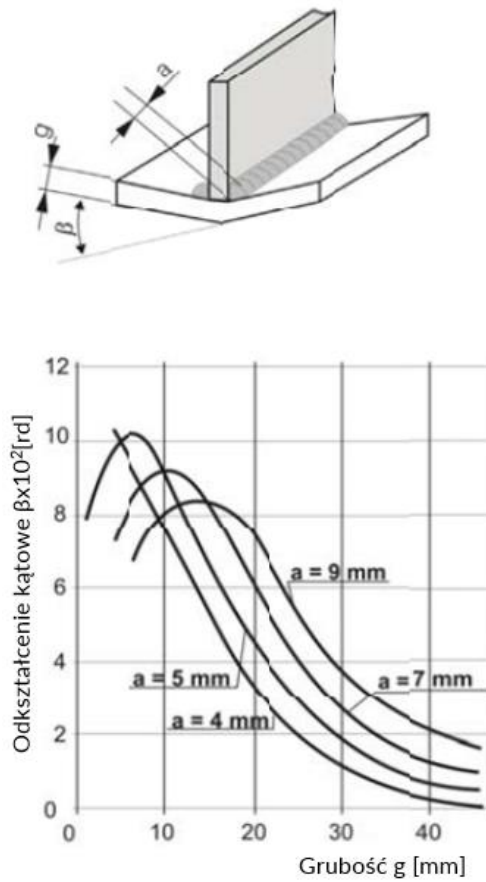
Deformacje i naprężenia spawalnicze zawsze towarzyszą procesowi spawania. Ich wpływ na jakość złącza spawanego jest różny i zależy od wielu czynników, jednak zawsze deformacje i naprężenia są zjawiskiem niepożądanym. Znaczne deformacje obserwuje się podczas spawania długich, grubych elementów konstrukcji, gdzie efekt odkształcenia kąтового i zmiany położenia końcowego elementu spawanego są wyraźne. Dla przykładu spawanie kształtownika grubości kilku milimetrów i długości kilku metrów, może spowodować przesunięcie końca kształtownika nawet o kilkanaście centymetrów, co znacznie utrudnia montaż konstrukcji. Na Rys. 42 przedstawiono efekt deformacji złącza ze spoiną pachwinową.



Rys. 42. Wygięcie usztywnienia po zespawaniu, próbka szepiana wstępnie [93]

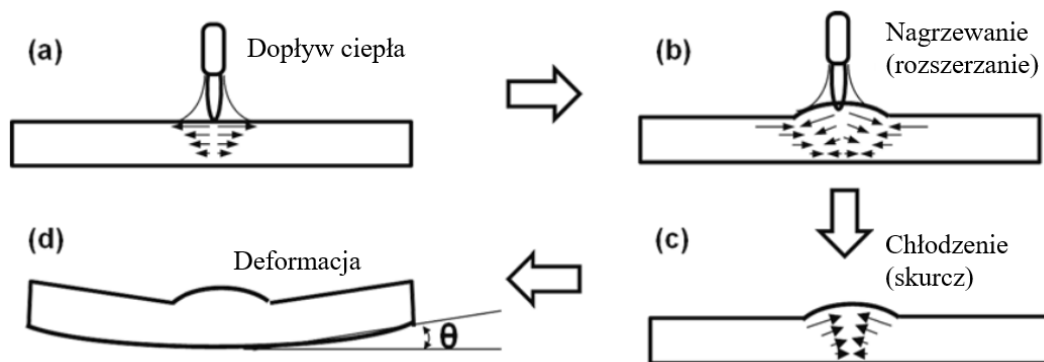
Problem deformacji spawalniczych jest różny w zależności od branży przemysłu. Podejście do deformacji przemysłu stoczniowego definiuje się w zupełnie inny sposób niż na przykład w branży medycznej czy lotniczej. Dla przykładu na Rys. 43 przedstawiono nomogram do określenia deformacji kątowych stali po spawaniu, w zależności od grubości materiału i wielkości spoiny, która wykorzystywana jest w konstrukcji kadłuba statku. Z rysunku tego można wywnioskować, że dla stałego rozmiaru spoiny, im mniejsza grubość materiału podstawowego tym większe są deformacje kątowe. Nomogram w zasadzie nie definiuje żadnych wartości dla grubości materiału spawanego poniżej 2 mm. Jest to związane

z tym, że dla przemysłu stocznioowego deformacje otrzymane w wyniku spawania materiału o grubości poniżej 2 mm będą tak małe, że ich wpływ na konstrukcję jako całość będzie znikomy.



Rys. 43. Nomogram do określania zniekształcenia kątowego β [94]

Schemat powstania deformacji przedstawiono na Rys. 44.



Rys. 44. Algorytm deformacji spawalniczej [95]

Chociaż deformacji spawalniczych nie można wyeliminować, badania nad tym zagadnieniem doprowadziły do opracowania różnych sposobów redukcji tych deformacji, z których można skorzystać na etapie opracowania procesu technologicznego spawania, jako działanie prewencyjne (zapobiegawcze, redukujące poziom odkształceń na gotowym produkcie) oraz działanie na etapie produkcji po wykonaniu spawania (usuwanie naprężeń spawalniczych, zmniejszenie deformacji).

Redukcję naprężeń oraz deformacji na etapie opracowania procesu technologicznego spawania można uzyskać dzięki:

- minimalizacji rozmiaru spoiny [96],
- wysokiej jakości elementów łączonych (dopasowaniu, przygotowaniu krawędzi),
- zastosowaniu spawania przerywanego [97],
- zastosowaniu odpowiedniej metody spawania [98],
- zastosowaniu odpowiedniego oprzyrządowania [99],
- opracowaniu odpowiednich parametrów technologicznych spawania,
- opracowaniu sposobu i kolejności układania spoiny, np. krokowo wstecz [100],
- zastosowaniu deformacji wstępnej [101].

W przypadku działań podejmowanych na etapie produkcji po spawaniu, deformacje można zredukować lub usunąć poprzez:

- prostowanie,
- podgrzewanie wstępne [102],
- odprężanie przez zastosowanie obróbki cieplnej [103],
- odprężenie mechaniczne (wibracyjne).

Każda branża korzystająca z technologii spawalniczych stosuje inne metody radzenia sobie z naprężeniami i deformacjami spawalniczymi. Ze względu na różnorodność i specyfikę konstrukcji i złączy spawanych nie można przyjąć powyższych wytycznych jako uniwersalne do każdego zastosowania. Inaczej przygotowany zostanie proces spawania urządzeń medycznych (łączenie materiałów o grubości poniżej 1 mm), a inaczej proces spawania ramy samochodowej, który był przedmiotem pracy [104].

Badania prowadzone przez Osaka University Japan wykazały, że można skutecznie zredukować naprężenia spawalnicze w powstające w procesie spawania takich konstrukcji jak zbiorniki ciśnieniowe lub usztywnione konstrukcje nośne blach o grubościach powyżej

5 mm, które stosowane np. w produkcji suwnic. Tego rodzaju konstrukcje są znacznie popularniejsze od detali lotniczych, a wymagania im stawiane różnią się od wymagań stawianych silnikom lotniczym, których komponenty wytwarzane są z nowoczesnych materiałów jak nadstopy niklu o grubościach od 0,5 mm do 2,5 mm. Rozwój nadstopów polegał głównie na chemicznych i procesowych innowacjach, a jego główną siłą napędową był i jest nadal przemysł lotniczy i energetyczny. Typowe zastosowanie to łopatki turbinowe dla gorących stref silników odrzutowych i turbin gazowych. Większość metod wskazywanych przez Osaka University nie jest możliwa do wykorzystania w produkcji lotniczej, między innymi ze względu na ograniczenia konstrukcyjne oraz brak wiedzy na temat oddziaływania zastosowanej metody na trwałość połączenia w trakcie pracy silnika.

Autorzy pracy [105] podkreślają, że naprężenia i deformacje spawalnicze komponentów stosowanych w przemyśle lotniczym są istotnym kryterium oceny ich jakości. Jednak w zastosowanych przez nich metodach redukcji odkształceń spawalniczych, weryfikacja każdego rozwiązania następuje dopiero na etapie produkcji. Wprowadzanie zmian na etapie produkcji znacząco wpływa na koszty uruchomienia. Bywa również, że na tym etapie zmiany te często są niemożliwe do zastosowania.

Z kolei autorzy pracy [64] w obszerny sposób zajmowali się naprężeniami i deformacjami spawalniczymi w doczołowych złączach spawanych cienkich blach wytwarzanych metodą TIG, wykorzystując także symulację numeryczną. Metody termosprężysto-plastyczne MES są stosowane do modelowania termicznego i mechanicznego zachowania się płyty podczas jej spawania. Wyniki analizy MES odkształceń spawalniczych są porównywane z istniejącymi przewidywaniami doświadczalnymi i empirycznymi. Wykazano, że prędkość spawania i grubość blachy mają znaczny wpływ na naprężenia i odkształcenia spawalnicze. Jednak z uwagi na zastosowany materiał (stal niskostopowa), wyników tych badań nie można wykorzystać do analizy naprężeń i deformacji komponentów stosowanych w budowie silnika lotniczego, które wykonane są ze stali wysokostopowych lub stopów niklu.

Wpływ naprężeń wewnętrznych i deformacji, widoczny przy spawaniu cienkościennych materiałów, stanowi szczególnie problem w przypadku produkcji podzespołów silników lotniczych w firmie MB Aerospace, gdzie wymagana jest bardzo wysoka jakość połączeń spawanych oraz dokładność wymiarowa gotowego produktu, który powstaje z połączenia elementów o grubościach najczęściej mieszczących się w zakresie 0,5-1,5 mm. Wydawać by się mogło, że dla tak cienkich elementów deformacje są nieznaczne i nie powinny mieć wpływu na montaż silnika. Jednak w praktyce dla elementów konstrukcyjnych silników

lotniczych deformacje rzędu 0,1 mm mają często duże znaczenie, zwłaszcza w aspekcie możliwości wykorzystania ich do montażu.

Aby dokładniej zidentyfikować i zbadać deformacje cienkościennych komponentów lotniczych ze stali wysokostopowej lub ze stopów niklu wytwarzanych w firmie MB Aerospace, obok weryfikacji parametrów technologicznych procesu spawania, należy uwzględnić inne aspekty procesu spawania, takie jak na przykład dobór i opracowanie odpowiedniego oprzyrządowania spawalniczego, dopasowanie elementów łączonych, czy obróbka cieplna gotowych złączy spawanych. Analiza deformacji spawalniczych od samego początku, a więc od etapu przygotowania podzespołu do spawania aż do etapu konstrukcji spawanej po obróbce cieplnej, pozwala na pełne wykorzystanie sposobów i metod zapewniających ich redukcję w gotowym wyrobie. W firmie MB Aerospace będzie to dotyczyło cienkościennych komponentów, wykonanych ze stali 17-4PH i ze stopu Inconel 718, stosowanych w budowie silników lotniczych.

Przedstawiona analiza literatury oraz wyniki wstępnych badań własnych były podstawą do sformułowania następującej tezy pracy:

Opracowanie technologii spawania cienkościennych komponentów wykonanych ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718, opartej o nowe rozwiązanie konstrukcyjne oprzyrządowania spawalniczego oraz dobór parametrów technologicznych automatycznego spawania metodą TIG wraz z zastosowaną obróbką cieplną po procesie spawania, zapewni minimalizację ich deformacji spawalniczych oraz obniży koszty i podniesie jakość prac związanych z montażem silnika lotniczego.

Utylitarny i wdrożeniowy charakter niniejszej pracy to zmniejszenie deformacji części wytwarzanych w MB Aerospace, a tym samym poprawa jakości komponentów stosowanych w budowie silników lotniczych, poprzez zwiększenie dokładności ich wykonania i obniżenie kosztów ich produkcji.

5. BADANIA WŁASNE

5.1 Cel i program badań

Dla udowodnienia przyjętej tezy pracy zdefiniowano następujące cele naukowe:

- określenie wpływu oprzyrządowania, parametrów automatycznego spawania metodą TIG oraz zabiegu obróbki cieplnej na deformacje spawalnicze cienkościennych elementów ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718 stosowanych w budowie silników lotniczych,
- określenie wpływu parametrów technologicznych automatycznego spawania metodą TIG na mikrostrukturę i właściwości użytkowe złączy spawanych cienkościennych elementów ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718.

Celem użytecznym pracy było opracowanie metody redukcji deformacji spawalniczych złączy spawanych wytwarzanych w firmie MB Aerospace, uwzględniającej rozwiązanie konstrukcyjne oprzyrządowania, parametry technologiczne spawania metodą TIG oraz obróbkę cieplną cienkościennych elementów silników lotniczych, celem obniżenia kosztów produkcji poprzez zmniejszenie ryzyka wystąpienia niezgodności wymiarowych na etapie obróbki mechanicznej części, a także zmniejszenie czasu obróbki mechanicznej.

Dla realizacji celów przyjęto następujący plan badawczy:

- dobór materiału na złącza spawane w aspekcie zastosowania na cienkościennie części lotnicze oraz zdefiniowanie kształtu i wymiarów złączy próbnych ze stali 17-4PH i ze stopu Inconel 718,
- opracowanie i przygotowanie stanowiska badawczego do spawania automatycznego metodą TIG, w tym zaprojektowanie i wykonanie oprzyrządowania spawalniczego do wykonania cienkościennych próbnych złączy spawanych ze stali 17-4PH i ze stopu Inconel 718, ukierunkowanego na minimalizację deformacji i odkształceń spawalniczych.
- wykonanie próbnych złączy spawanych ze stali 17-4PH i ze stopu Inconel 718 oraz określenie wpływu parametrów technologicznych spawania metodą TIG (energii liniowej) na ich deformacje spawalnicze, opracowanie metodyki analizy deformacji spawalniczych,
- ocena jakości próbnych złączy spawanych ze stali 17-4PH i ze stopu Inconel 718 z wykorzystaniem badań nieniszczących,
- opracowanie i wykonanie obróbki cieplnej wybranych cienkościennych złączy spawanych ze stali 17-4PH i ze stopu Inconel 718, zgodnie z procedurami stosowanymi w procesie wytwarzania części lotniczych.

- badania metalograficzne cienkościennych próbnich złączy spawanych ze stali 17-4PH i ze stopu Inconel 718, ocena mikrostruktury i składu chemicznego obszaru złącza spawanego.
- badania wybranych właściwości użytkowych cienkościennych próbnich złączy spawanych ze stali 17-4PH i ze stopu Inconel 718.

5.2 Dobór materiału i kształtu próbek

Głównymi materiałami spawanymi w MB Aerospace Rzeszów, stosowanymi na elementy silników lotniczych, są stale nierdzewne utwardzane wydzieleniowo oraz stopy niklu. Z tych dwóch grup materiałowych wytypowano stal 17-4 PH oraz stop Inconel 718.

Stal 17-4PH wykorzystuje się do budowy elementów zlokalizowanych w tak zwanej sekcji zimnej silnika. Materiał ten charakteryzuje się dobrą wytrzymałością i odpornością na korozję w środowisku nie przekraczającym 316 °C oraz bardzo dobrą spawalnością.

Stop Inconel 718 charakteryzuje się wysoką odpornością korozyjną, dużą wytrzymałością (odpornością na pełzanie w temperaturach do 700°C) i bardzo dobrą spawalnością, włączając w to odporność na pękanie po spawaniu.

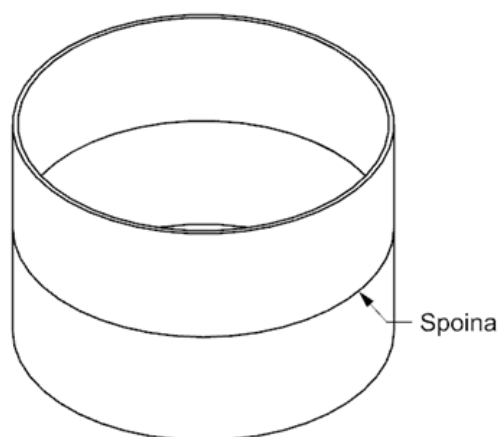
Dodatkowo w konfiguracji próbnich złączy spawanych uwzględniono, że około 75% połączeń spawanych w MB Aerospace Rzeszów to spoiny obwodowe, czołowe.

Grubości elementów spawanych metodą TIG, wchodzących w skład silnika lotniczego mieszają się w przedziale od 0,5 do 2 mm, przy czym najczęściej spawane są elementy o grubości około 1 mm.

Uwzględniając powyższe informacje przyjęto:

- materiał podstawowy: stal utwardzana wydzieleniowo 17-4 PH oraz stop Inconel 718,
- grubość materiału: 0,84- 0,94 mm,
- rodzaj połączenia: spoina obwodowa, złącze doczołowe

Kształt próbnego złącza spawanego przedstawiono na Rys. 45.



Rys. 45. Kształt próbnego złącza spawanego obwodowo

Proces przygotowania próbek do wykonania złącza próbnego obejmował:

- wycięcie pasa o wymiarach 50 x 472 mm (Rys. 46),



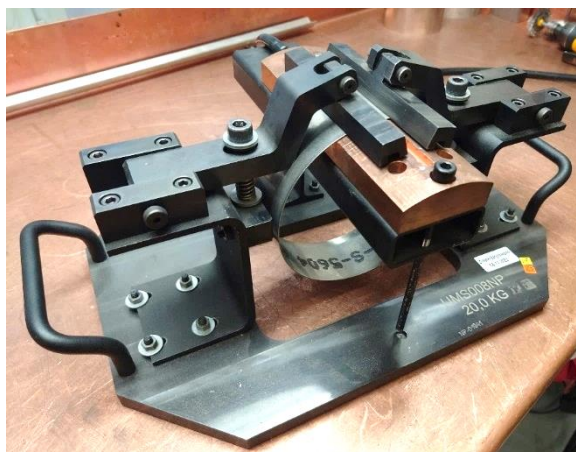
Rys. 46. Wycięte pasy blachy

- zwijanie blachy na średnicę 150 mm (Rys. 47),



Rys. 47. Walcarka do blachy (zwijarka)

- wykonanie spoiny poprzecznej (Rys. 48),



Rys. 48. Widok przyrządu do spawania wzdłużnego blach

- szlifowanie lica i grani spoiny poprzecznej (Rys. 49).



Rys. 49. Sposób mocowania blach w przyrządzie do spawania wzdłużnego

Oprzyrządowanie do wykonania spoiny wzdłużnej zapewnia atmosferę ochronną grani spoiny. Spoina poprzeczna łączy się ze spoiną obwodową, ma więc wpływ na jakość połączenia obwodowego. Z tego względu powinna ona spełniać takie same wymagania jakościowe jak spoina obwodowa. Przyrząd dzięki profilowanej podstawie (o średnicy wewnętrznej zwiniętej próbki) oraz dociskowi zewnętrznemu zapewnia odpowiednie ułożenie blach, gwarantujące brak ich przestawienia.

Widok blach zwiniętych i połączonych spoiną poprzeczną przedstawiono na Rys. 50.



Rys. 50. Widok próbki przygotowanej do wykonania próbnego złącza spawanego

5.3 Oprzyrządowanie i stanowisko do automatycznego spawania metodą TIG

Nowoopracowane stanowisko do automatycznego spawania metodą TIG przedstawiono na Rys. 51.



Rys. 51. Stanowisko do spawania automatycznego metodą TIG

Źródłem zasilania w metodzie TIG są urządzenia o charakterystyce stromo opadającej, lub stało prądowej, dające prąd stały (prostownik) lub przemienny (transformator albo prostownik generujący falę impulsów prostokątnych o zmiennej biegunowości) [106]. W nowo opracowanym stanowisku zastosowano źródło prądu, które umożliwia:

- spawanie prądem pulsacyjnym w zakresie 5-150 A, dokładność nastawy prądu spawania +/- 1A,
- kontrolę łuku AVC,
- kontrolę oscylacji uchwytu,
- sterowanie dodatkowymi urządzeniami (głowica uchwytu, obrotniki),
- dokładne programowanie cyklu spawania,
- gromadzenie parametrów procesu spawania w czasie rzeczywistym.

Warunki takie spełnia źródło prądu Polysoude P6 CW (Rys. 52). Źródło to ma wbudowany układ chłodzenia. Jest to precyzyjne źródło prądu inżektorowego, wyposażone w karty elektroniczne umożliwiające sterowanie urządzeniami peryferyjnymi.



Rys. 52. Źródło prądu Polysoude P6 [108, 109]

W tabeli 11 przedstawiono wybrane dane techniczne źródła prądu Polysoude P6 CW.

Tab. 11. Wybrane dane techniczne źródła prądu P6 [108]

Moc wejściowa	Trójfazowe + uziemienie 400/415 V ± 10% (Opcja: zestaw wielonapięciowy od 200 V do 480 V) 50 lub 60 Hz
Napięcie obwodu otwartego	100 V
Moc	14,5 kVA
Klasa izolacji	F
Klasa ochrony	IP 23S (ekran dotykowy zamknięty)
Standardowy prąd spawania	5 to 300A - stały lub impulsowy
Precyzja prądu spawania	± 1%
Programowalne ruchy	Obrót uchwyty: stały lub pulsacyjny Podajnik drutu: stały lub impulsowy / automatyczny zwijacz drutu AVC - automatyczna kontrola napięcia OSC - Kontrola oscylacji (opcja) Oś 0/+10 V do zastosowań zmechanizowanych Oś for -10/+10 V do zastosowań zmechanizowanych
Gazy kontrolowane	Gaz dyszy z zaworem bezpieczeństwa przepływu (gaz dodatkowy)
Chłodzenie źródła zasilania	Wymuszona wentylacja
Chłodzenie uchwyty TIG	Wbudowany układ chłodzenia wodą w obiegu zamkniętym z zaworem bezpieczeństwa przepływu
Wyświetlanie/ladowanie programu	Napięcie łuku, prąd spawania, położenie elektrody w stopniach kątowych, prędkość obrotowa i prędkość drutu
Archiwizacja/ladowanie programu	Karta pamięci USB
Wymiary (dl. x szer. x wys.)	500 x 700 x 750 mm 630 x 470 x 1110 mm (z opcją wielonapięciową)
Waga	90 kg
Standardy	EN 60974-1 and EN 60974-10

Źródło prądu Polysoude P6 CW posiada możliwość rejestracji parametrów spawania oraz wydruku raportu po wykonaniu spawania. Jest to średniej wielkości źródło prądu do spawania orbitalnego, generujące prąd do 300A, wyposażone w pilot zdalnego sterowania oraz możliwość programowania bezpośrednio na ekranie dotykowym lub zdalnie „offline”. Zaprojektowane do obsługi kilku dodatkowych osi, które można programować i sterować. Zwykle osie te przypisuje się przepływowi gazu osłonowego, natężeniu prądu spawania i częstości impulsów, prędkości przesuwu głowicy spawalniczej, operacjom podawania drutu oraz kontroli i oscylacji napięcia łuku.

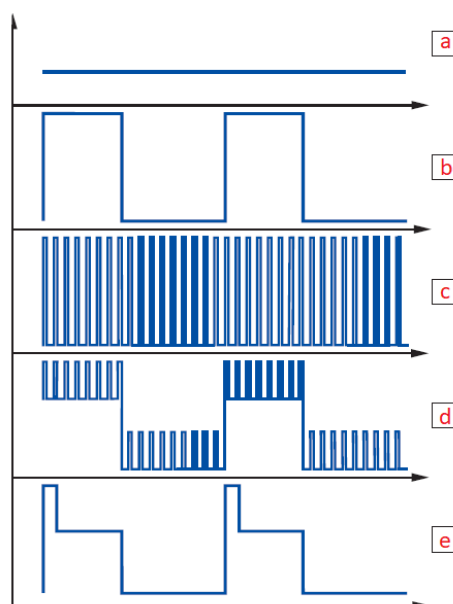
Poniżej opisano sposób działania i programowania w urządzeniu Polysoude P6 CW takich parametrów jak [108, 109]:

- natężenie prądu, którego schemat sterowania przedstawiono na Rys. 53



Rys. 53. Funkcje sterowania prądem na tablicy zasilacza Polysoude P6 CW [109]

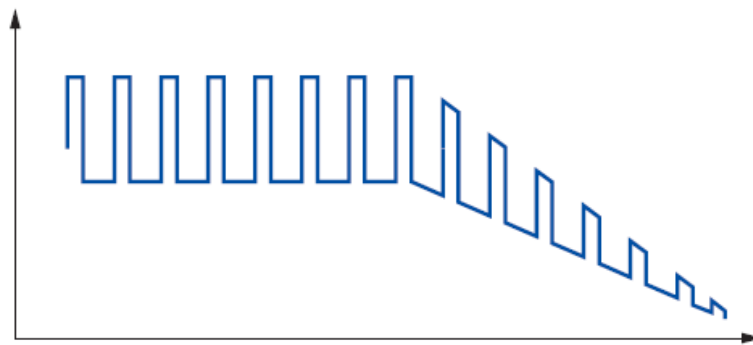
- zajarzanie łuku, które według producenta następuje w efekcie wytworzenia wysokiego napięcia 10 kV w czasie 2 mikrosekund przy częstotliwości 50 Hz. Kolumna gazu osłonowego między elektrodą a materiałem spawanym zostaje zjonizowana i nabiera właściwości przewodzących. W rezultacie zajarza się łuk i zaczyna płynąć prąd spawania. Możliwe jest także zajarzenie łuku za pomocą funkcji tzw. Lift arc. W tym przypadku uchwyt spawalniczy przesuwa się w stronę przedmiotu spawanego aż elektroda wolframowa dotknie jego powierzchni. Następnie jest cofany (podnoszony). W tym samym momencie aplikowane jest napięcie i zajarzany jest łuk elektryczny
- prąd spawania który występuje w pięciu wariantach (Rys. 54):



Rys. 54. Rodzaje prądów spawania [108]

- prąd bez impulsowy (brak zmian w natężeniu prądu)
- pulsacja termiczna (maksymalna częstotliwość pulsacji termicznej wynosi 10 Hz)

- c) szybki prąd pulsacyjny (prąd pulsuje ze zwiększoną częstotliwością od 500 Hz do 10 kHz)
- d) prąd impulsowy termo szybki (kombinacja pulsacji termicznej i pulsacji szybkiej)
- e) prąd pulsacyjny z monopulsami (prąd pulsacyjny nakłada się szczyt intensywności na początku każdego impulsu, co powoduje zwiększone ciśnienie łuku na jeziorku spawalniczym)
- wygaszenie łuku (downslope), które pozwala uniknąć krateru na końcu spoiny, poprzez stopniowe zmniejszanie wartości natężenia prądu (Rys. 55)



Rys. 55. Schemat działania funkcji wygaszania łuku (downslope) [108]

- prędkość spawania, której schemat sterowania przedstawiono na Rys. 56. Podczas spawania element spawany musi obracać się względem nieruchomej głowicy uchwytu TIG ze stałą żądaną prędkością. Źródło prądu posiada możliwość kontroli prędkości liniowej spawania w zakresie 50-200 mm/min.

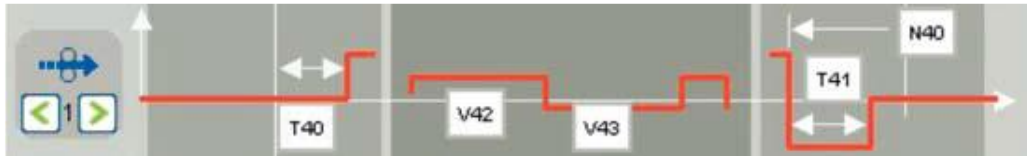


Rys. 56. Schematyczne przedstawienie funkcji obrotu uchwytu spawalniczego (stołu) [108]

Możliwe jest zaprogramowanie różnych prędkości podczas prądu podstawowego i impulsowego. Zwykle, podobnie jak w przypadku spawania impulsowego skokowego, przy wysokim poziomie prądu następuje zatrzymanie obrotów ($V = 0$ mm/min), natomiast w okresie prądu bazowego uchwyt spawalniczy przesuwają się do przodu. Osiągnięta dokładność prędkości wynosi 1% zaprogramowanej wartości. Standardowy sprzęt spawalniczy Polysoude może być obsługiwany za pomocą emiterów impulsów lub

enkoderów obrotomierza. Impulsy te przetwarzane są również przez układ sterujący źródła prądu w celu rozpoznania rzeczywistego położenia uchwytu względem punktu startu, co sprawia, że programowanie cyklu spawania może odbywać się w stopniach kątowych, a nie w przedziałach czasowych (jeden obrót uchwytu TIG zawsze obejmuje 360° na przejście, niezależnie od liniowej prędkości spawania i średnicy detalu)

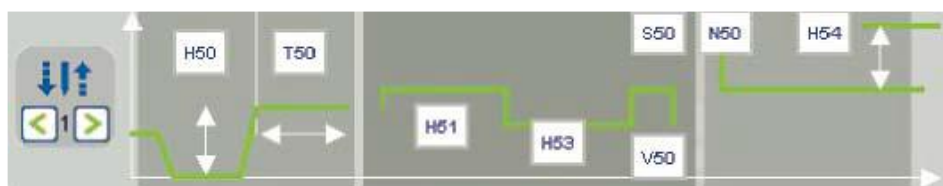
- sterowanie prędkością podawania materiału dodatkowego przedstawione na Rys. 57



Rys. 57. Schemat programowania prędkości podawania materiału dodatkowego [108]

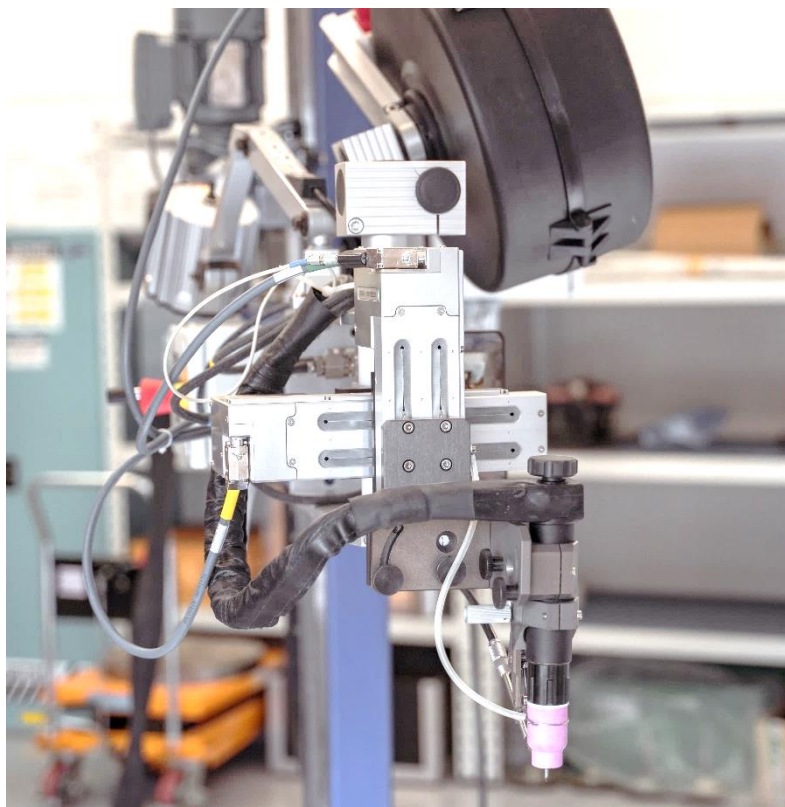
Źródło prądu do spawania orbitalnego jest przystosowane do sterowania różnymi typami podajników drutu. Prędkości podawania drutu mieszczą się w zakresie od 1 do 8000 mm/min. Impulsy podawania drutu można zsynchronizować z impulsami prądu spawania. Na koniec spawania funkcja cofania drutu pozwala na zmianę kierunku podawania drutu. Koniec drutu jest cofany o kilka milimetrów, co pozwala uniknąć tworzenia się kulki na zakończeniu drutu lub, co gorsza, utknięcia drutu w spoinie

- sterowanie wysokością elektrody AVC (Arc Voltage Control), czyli długości łuku. Schemat programowania tej funkcji przedstawiono na rysunku 58. Kontrola długości łuku jest realizowana przez układ krzyżowy zamontowany przy głowicy uchwytu (Rys. 59)



Rys. 58. Schemat programowania funkcji kontroli wysokości elektrody AVC [108]

- programowalna odległość elektrody od detalu spawanego. Położenie spawalniczego, oprócz sterowania AVC, można określić na podstawie zaprogramowanej funkcji odległości elektrody od przedmiotu obrabianego. W tym przypadku uchwyt przesuwa się za pomocą zmotoryzowanego suwaka na wybraną odległość w mm do żądanej wysokości



Rys. 59. Układ krzyżowy pozwalający na kontrolę wysokości elektrody

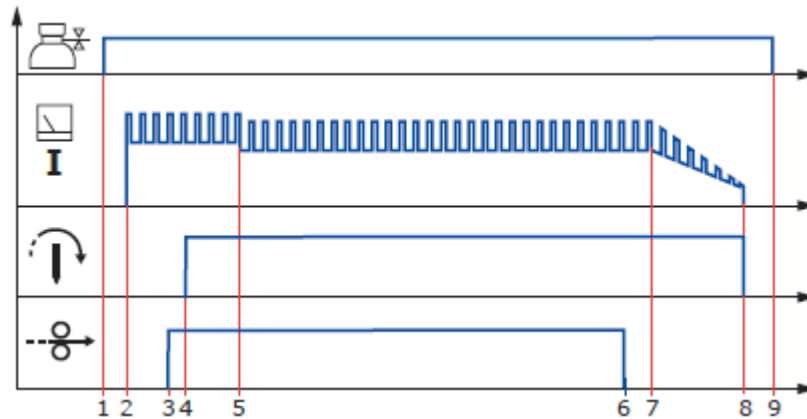
Źródło Polysoude P6 CW pozwala na zaawansowane programowanie przebiegu spawania obwodowego, na dotykowym ekranie w dedykowanej aplikacji. Programować można:

- zawór gazu osłonowego,
- natężenie prądu (prąd pulsacyjny, czasy i wartości natężenia),
- prędkość obrotową (prędkość spawania),
- podawanie drutu,
- wysokość uchwytu (AVC),
- oscylację poziomą uchwytu

Na Rys. 60 przedstawiono przykład programu standardowego cyklu spawania z drutem dodatkowym, bez AVC i oscylacji.

Drugim elementem stanowiska do spawania jest dwuosiowy obrotnik (Rys. 61), o dopuszczalnej ładowności 500 kg oraz średnicy stołu 1 m.

Pierwsza oś, odpowiadająca za pochylenie kątowe stołu, sterowana jest niezależnie od programu spawalniczego, za pomocą pilota i silnika elektrycznego. Kąt pochylenia zostaje ustawiony na zadanej wartości przed uruchomieniem spawania.



- 1 Rozpoczęcie cyklu spawania (uruchamiane przyciskiem Start na panelu sterowania)
- 1 do 2 Wyływ gazu osłonowego w zaprogramowanym czasie wyływu wstępnego przed zajarzeniem łuku
- 2 Zajarzenie łuku i początek pulsacyjnego prądu spawania. Zegar zostaje wyzerowany
- 2 do 3 Opóźnienie podawania drutu
- 2 do 4 Opóźnienie obrotu
- 3 Rozpoczęcie podawania drutu*
- 4 Start obrotów * (początkowa pozycja uchwytu ustawiona jest na pozycję zerową cyklu spawania)
- 5 Rozpoczęcie nowego sektora, w którym zmieniany jest prąd spawania
- 6 Koniec podawania drutu* (i cofania drutu, jeśli zaprogramowano). Koniec podawania drutu jest umieszczony w odległości ok. 360°
- 7 Początek opadania prądu spawania przed ostatecznym wyłączeniem łuku. Spadek jest ustawiony na kącie 360° + 5° do 10° zakładki w celu ponownego stopienia początku szwu spawalniczego oraz aby zapewnić idealne połączenie na końcu spoiny
- 7 do 8 Czas opadania prądu spawania, aby zakończyć spoinę bez pęknięć i tworzenia kraterów
- 8 Zgaszenie łuku i zatrzymanie obrotu
- 8 do 9 Okres wyływu gazu po spawaniu, chroniącego strefę spawania detalu, aż do osiągnięcia dostatecznie niskiej temperatury, aby chronić detal i gorącą elektrodę wolframową przed tlenem atmosferycznym.
- 9 Zatrzymanie gazu osłonowego i zakończenie cyklu spawania.

* - w zależności od ustawień programu spawania, wartości mogą występować w innych kolejnościach

Rys. 60. Przykład programu spawania, bez materiału dodatkowego, AVC i oscylacji [108]

Wartość kąta pochylenia stołu sprawdzana jest przy użyciu poziomiccy cyfrowej (Rys. 62). Domyślnie położenie blatu stołu ustawia się na 90° względem poziomu.

Druga oś stołu odpowiada za obrót detalu podczas wykonywania spawania z odpowiednią prędkością. Oś sterowana jest w pełni ze źródła prądu oraz opcjonalnie z pilota umieszczonego przy stanowisku.



Rys. 61. Stół obrotowy, dwuosiowy o nośności 500 kg



Rys. 62. Pomiar wartości kąta pochylenia stołu obrotnika

Zasadniczym elementem stanowiska do automatycznego spawania metodą TIG jest nowo opracowane oprzyrządowanie spawalnicze. W projekcie rozwiązania konstrukcyjnego tego oprzyrządowania, z uwagi na powtarzalność procesu spawania, uwzględniono:

- powtarzalne mocowanie na stole obrotowym dzięki centrującej wkładce,
- powtarzalne mocowanie złączy próbnych w przyrządzie, uzyskane za pomocą ograniczników,
- mocowanie dwóch elementów spawanych względem siebie, tak by zminimalizować do zera przestawienie tych elementów,
- osłonę grani spoiny gazem osłonowym podczas spawania.

Oprzyrządowanie wykonano w firmie MB Aerospace z uwzględnieniem powyższych założeń oraz dodatkowych wymagań wynikających ze specyfikacji technicznych dotyczących oprzyrządowania do spawania w przemyśle lotniczym, przeznaczonego do spawania stali nierdzewnych i stopów niklu.

Materiały użyte do wykonania oprzyrządowania zostały dobrane zgodnie z wewnętrznymi praktykami, z uwzględnieniem ich właściwości wytrzymałościowych.

Podczas projektowania oprzyrządowania spawalniczego zwrócono uwagę na możliwości swobodnego kurczenia się próbnego złącza spawanego. Jak wspomniano w rozdziale 3, w spoinie występują naprężenia w trzech kierunkach: wzdłuż spoiny, w jej kierunku poprzecznym oraz w kierunku grubości materiału. Skurcz w kierunku grubości materiału jest pomijany ze względu na mały wpływ na detal spawany. W procesie projektowania oprzyrządowania spawalniczego analizowano trzy warianty/ścieżki rozwiązania konstrukcyjnego.

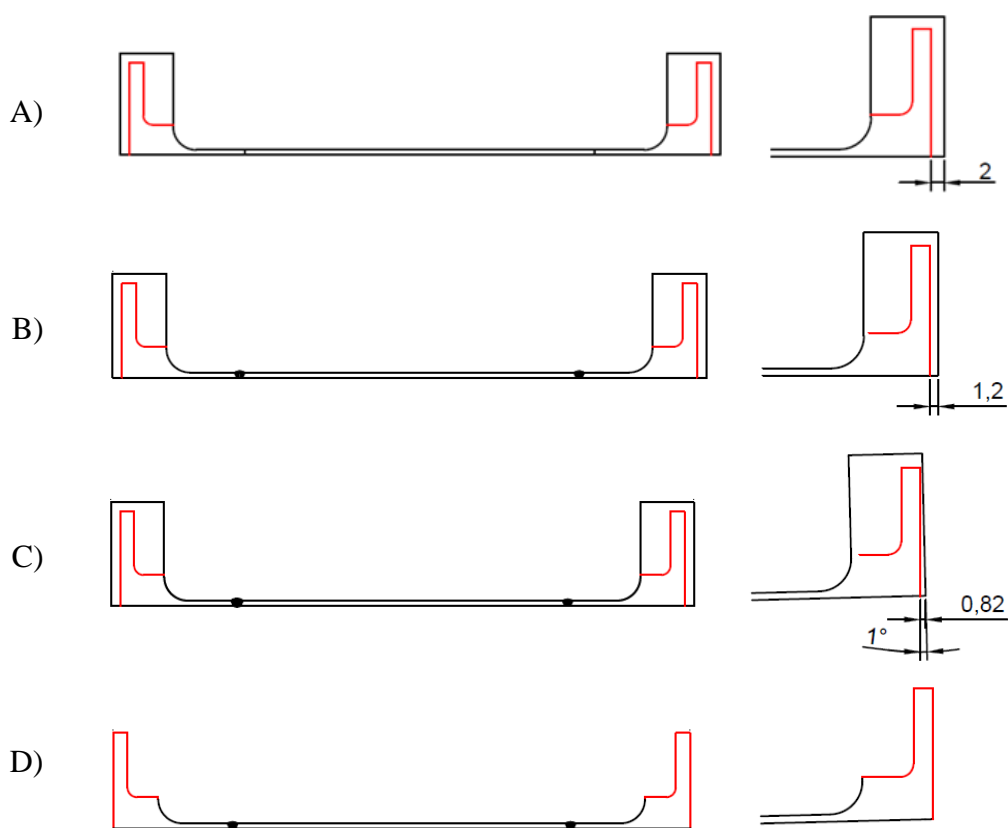
W wariantcie pierwszym detal w przyrządzie jest pozbawiony możliwości przemieszczania się - ograniczenie stopni swobody (podczas spawania, element jest usztywniony, skurcz jest ograniczony). Zaletą tego rozwiązania jest możliwość uzyskania niewielkiego skurczu po spawaniu (stabilność wymiarowa na etapie po spawaniu). Natomiast wadą tego rozwiązania jest występowanie wysokich wartości naprężeń szczątkowych pozostałych w detalu spawanym, co w efekcie znacznie zwiększa ryzyko pęknięć oraz może zwiększyć deformacje detalu po obróbce cieplnej.

W drugim wariantcie detal w przyrządzie jest częściowo pozbawiony możliwości przemieszczania się – ograniczenie wybranych stopni swobody (podczas spawania element jest usztywniony w założonym kierunku, kierunek skurczu jest zaplanowany). Takie rozwiązanie pozwala na skurcz materiału spawanego w pożądanym kierunku, dzięki temu naprężenia szczątkowe pozostające w materiale są mniejsze niż w przypadku wariantu pierwszego.

W ostatnim, trzecim wariantcie detal w przyrządzie może swobodnie przemieszczać się podczas spawania. Projektując oprzyrządowanie tą ścieżką, detal podczas spawania i po jego zakończeniu kurczy i deformuje się swobodnie. Takie rozwiązanie pozwala na minimalizację naprężeń szczytkowych, jednak wiąże się ze wzrostem wartości deformacji i utrudnioną kontrolą kierunku ich powstawania.

Na podstawie analizy powyższych wariantów zdecydowano się zaprojektować oprzyrządowanie wg drugiej ścieżki, tj. ograniczono możliwość skurczu na długości spoiny (skurcz wzłużny), poprzez zastosowanie podkładki pod złączeniem spawanym. Dopuszczono możliwość skurczu poprzecznego.

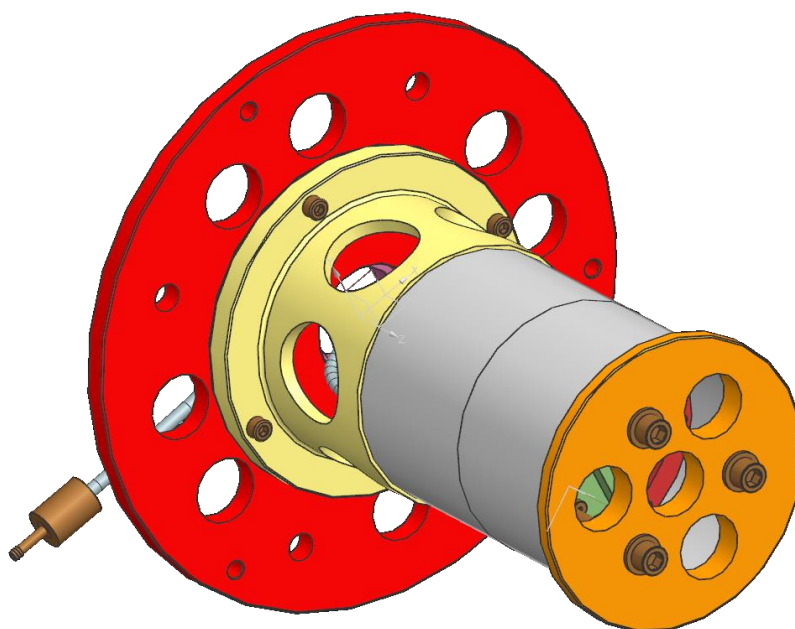
Skurcz poprzeczny można zniwelować poprzez zastosowanie nadatku materiału, który na etapie obróbki mechanicznej jest usuwany. Schematyczny sposób zniwelowania skurczu poprzecznego przedstawiono na Rys. 63.



Rys. 63. Zmiana szerokości części spawanej na różnych etapach produkcji: A – szerokość części przed spawaniem, B - szerokość części po spawaniu, C – szerokość części po obróbce cieplnej, D – szerokość części po obróbce mechanicznej (linią czerwoną oznaczono ostateczny kształt do uzyskania). Wartości poglądowe

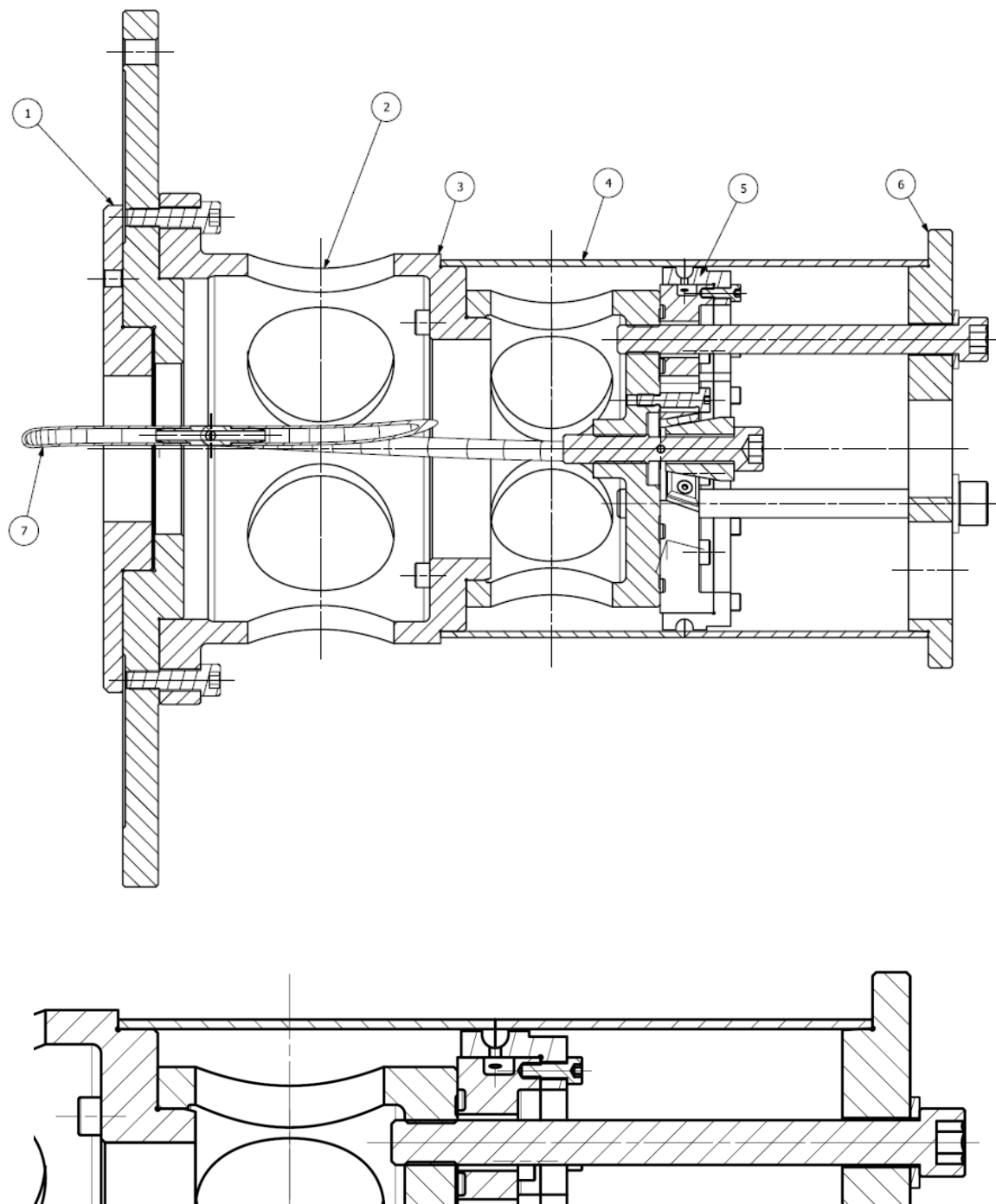
Na Rys. 63 A przedstawiono wymiary części składającej się z dwóch pierścieni (lewy i prawy) połączonych doczołowo z blachą po obwodzie przed rozpoczęciem procesu spawania. Na Rys. 63 B przedstawiono ten sam detal po spawaniu – szerokość części B będzie mniejsza od A, ze względu na skurcz poprzeczny i wzdłużny spoin. Rys. 63 C przedstawia ten sam detal po obróbce cieplnej, która ma wpływ na wymiary części (szerokość C), natomiast Rys. 63 D przedstawia detal po wykonanej obróbce mechanicznej – końcowy wymiar D.

Efektom prac projektowych, uwzględniających przedstawione powyżej kryteria i koncepcje, było wykonanie dokumentacji rysunkowej oprzyrządowania spawalniczego (Rys. 64 i Rys. 65).



Rys. 64. Widok konstrukcji przyrządu do spawania próbek bazowanie prawej krawędzi złącza próbnego, 7 – przewody doprowadzające gaz osłonowy

Jak przedstawiono na Rys. 65, w podstawie przyrządu znajduje się wkładka centrująca, dzięki której przyrząd jest bazowany w osi obrotowej stołu spawalniczego (obrotownika). Pozwala to zminimalizować zmiany długości łuku podczas spawania (nie uwzględniając funkcji AVC źródła prądu). Do podstawy przyrządu zamontowany został dystans, co zapewniło dostęp uchwytu do miejsca spawania, bez ryzyka kolizji ze stołem obrotowym. Na dystansie został zamontowany główny element przyrządu, a więc bazowanie złącza próbnego (lewej i prawej krawędzi) oraz miedziana podkładka centrująca, do której został doprowadzony gaz osłonowy w celu osłony grani podczas spawania.



Rys. 65. Przekrój przyrządu do spawania złączy próbnych, 1 – podstawa centrująca, 2 – dystans, 3 – bazowanie lewej krawędzi złącza próbnego, 4 – złącze próbne, 5 – podkładka miedziana, 6 – dekiel

Widok oprzyrządowania spawalniczego zamontowanego na obrotniku przedstawia Rys. 66.



Rys. 66. Widok przyrządu na obrotniku, wraz z zamontowanym złączem próbnym

5.4 Wykonanie próbnych złączy spawanych

Spośród czynników wpływających na deformacje spawalnicze, na podstawie studium literatury oraz doświadczenia w spawaniu detali wchodzących w skład silników lotniczych, wybrano te czynniki, które mają największy wpływ na deformację części i naprężenia. Są to:

- rodzaj procesu (spawanie ręczne lub automatyczne),
- energia liniowa,
- zastosowanie materiału dodatkowego.

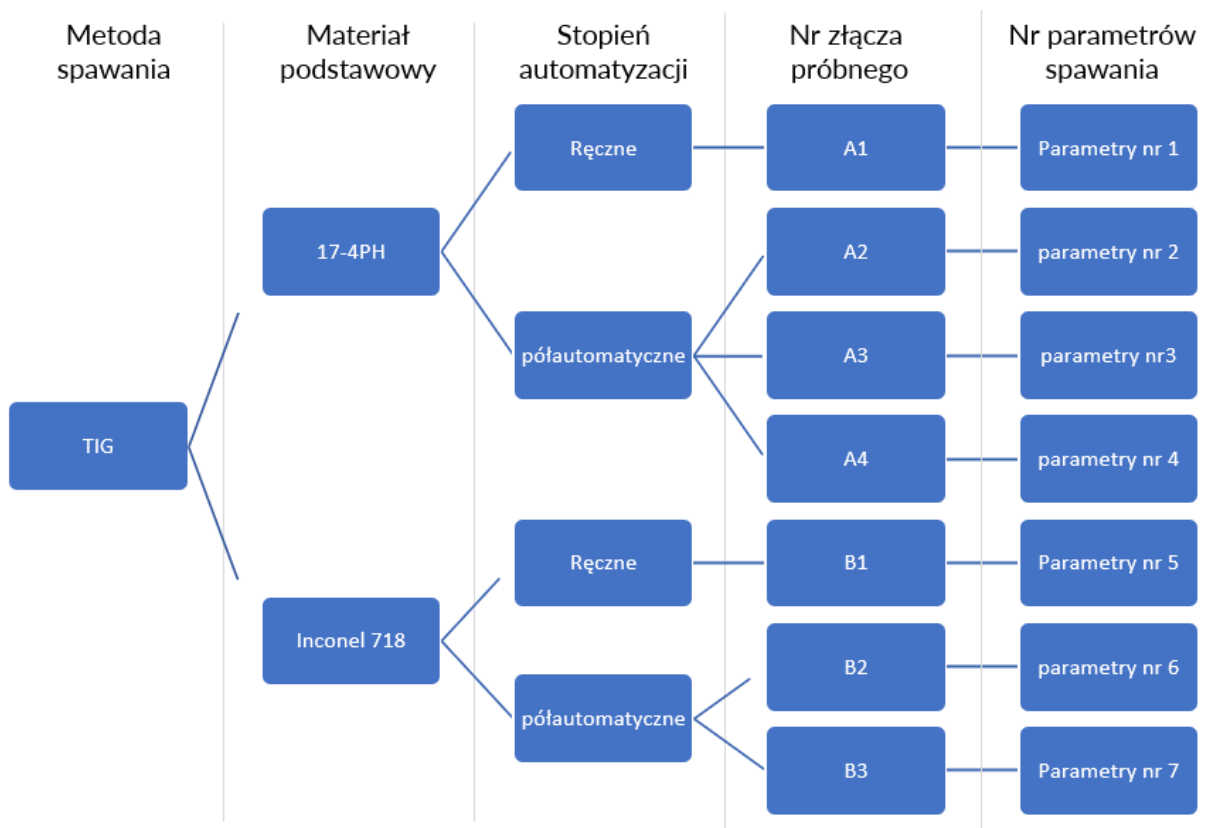
Dla złączy próbnych z materiału 17-4PH wykonano (Rys. 67):

- złącze próbne A.1 - spawanie ręczne wg parametrów 1,
- złącze próbne A.2 - spawanie automatyczne wg parametrów 2,
- złącze próbne A.3 - spawanie automatyczne wg parametrów 3,
- złącze próbne A.4 - spawanie automatyczne wg parametrów 4.

Dla próbek z materiału Inconel 718 wykonano (Rys. 65):

- złącze próbne B.1 - spawanie ręczne wg parametrów 5,
- złącze próbne B.2 - spawanie automatyczne wg parametrów 6,

- złącze próbne B.3 - spawanie automatyczne wg parametrów 7.

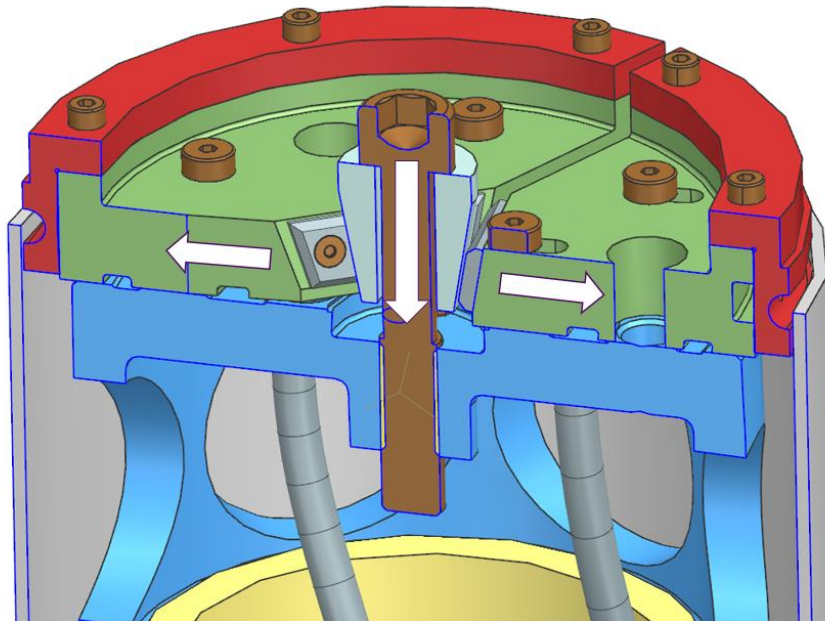


Rys. 67. Konfiguracja próbnych złączy spawanych

Wykonanie złączy próbnych rozpoczęto od montażu szepionych elementów w przyrządzie spawalniczym. Odpowiednie ustawienie elementów względem siebie przed spawaniem jest pierwszym krokiem ku poprawie deformacji części po spawaniu. Właściwe ustawienie pozwala na uzyskanie symetrycznej spoiny i równomierne rozłożenie naprężeń wzdłuż złącza spawanego. Dwie połówki złącza próbnego zostały ustawione w przyrządzie względem siebie w taki sposób, aby uzyskać najmniejsze możliwe przesunięcie elementów przed spawaniem. Podkładka miedziana od wewnętrznej strony jest ruchoma i przesuwa się w kierunku zewnętrznym, pozwalając na wycentrowanie dwóch spawanych materiałów względem siebie oraz na redukcję przesunięcia spawanych elementów. Sposób działania podkładki miedzianej przedstawiono na Rys. 68. Wkręcanie centralnej śruby powoduje przesunięcie stożka w dół i w efekcie rozepchanie na zewnątrz podkładek.

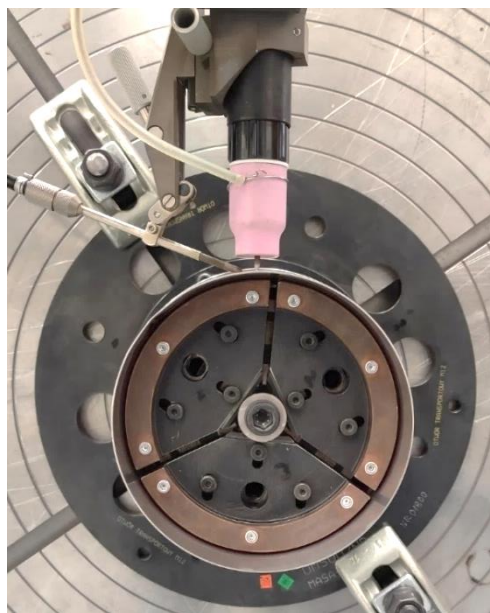
Podczas montażu zwrócono uwagę także na uzyskanie jak najmniejszej wartości szczeliny pomiędzy łączonymi elementami wzdłuż całej długości połączenia. Do uzyskania

takiej szczeliny wykorzystano dekiel dokręcany śrubami. Pozwala to na dociśnięcie blach złącza, by zmniejszyć szczeliny pomiędzy materiałami (pozycja 6 na Rys. 65).

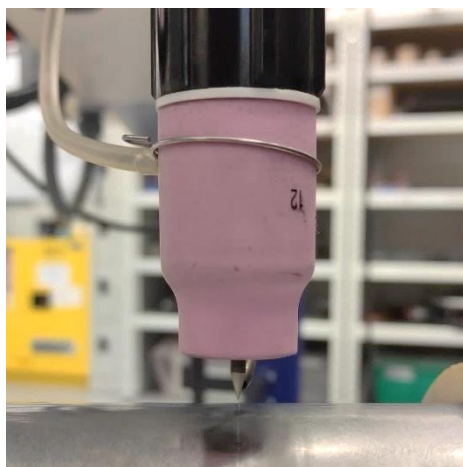


Rys. 68. Przyrząd spawalniczy - mechanizm rozsuwania podkładki miedzianej (niektóre elementy przyrządu zostały ukryte)

Po odpowiednim zamontowaniu dwóch połówek złącza próbnego ustawiono uchwyt spawalniczy w centralnym położeniu nad osią rowka spoiny (Rys. 69, Rys. 70). Wysokość uchwytu spawalniczego nad materiałem spawanym ustawiana jest automatycznie przez źródło prądu na zadaną wartość.



Rys. 69. Ustawienie uchwytu spawalniczego względem złącza próbnego oraz widok mechanizmu rozsuwania podkładki miedzianej



Rys. 70. Ustawienie uchwyty spawalniczego nad osią rowka spawalniczego do wykonania spoin szepnych

Dla tak zamontowanego elementu spawanego, zostały wykonane spoiny szepne. Odległość pomiędzy punktami to 50 mm. Spoiny szepne zostały wykonane bez materiału dodatkowego. Wykonanie spoin szepnych umożliwia demontaż złącza próbnego z przyrządu i wykonanie niezbędnych pomiarów przed spawaniem. Spoiny szepne dla złączy ze stali nierdzewnej 17-4PH oraz ze stopu niklu Inconel 718 zostały wykonane przy użyciu parametrów, które przedstawiono w Tab. 12.

Tab. 12. Parametry wykonania spoin szepnych

Parametr	Wartość
Grubość materiału podstawowego [mm]:	0,9
Średnica złącza próbnego [mm]:	150
Rodzaj połączenia:	Doczołowe
Metoda spawania	TIG automatyczne
Pozycja spawania	Podolna (1G)
Polaryzacja	DC -
Rodzaj gazu osłonowego	Argon (99,999%)
Rodzaj dyszy gazowej:	12
Wymiary dyszy [mm]:	długość 47, średnica wewnętrzna 19
Natężenie przepływu gazu na uchwyt [L/min]:	17-18
Natężenie przepływu gazu na grań [L/min]:	9-10
Czas napełniania grani przed spawaniem [min]:	2
Typ elektrody wolframowej:	WC20
Średnica elektrody [mm]:	3,2
Kąt ostrzenia [°]:	30
Wystawanie elektrody [mm]:	10
Gaz osłonowy	
Czas wyprzedzenia [sek] T10:	5,0

c.d. Tab. 12

Czas opóźnienia [sek] T11:	8,0
Natężenie prądu (zakres)	
Prąd zajarzenia [A] I20:	5,0
Start wygaszenia [st] N20:	360
Czas wygaszania [sec] T25:	3,0
Prąd wyłączenia [A] I25:	5,0
Natężenie prądu (wysoki puls) [A] I22:	88,0
Natężenie prądu (niski puls) [A] I23:	12,0
Czas trwania wysokiego pulsu [ms] T22:	75,0
Czas trwania niskiego pulsu [ms] T23:	2500
Obrót stołu	
Czas opóźnienia obrotu [sek] T30:	0,0
Prędkość obrotowa [mm/min] V32:	260
Układ AVC	
Wysokość [mm] H50:	1,0
AVC opóźnienie [sek] T50:	2,0
Wygazanie [°] N50:	14
Wygazanie, wysokość [mm] H54:	3,0
Napięcie [V] H52:	9,5
Czas narastania [sek] T51:	0,0
Prędkość uchwytu AVC [mm/min] V50:	150
Czułość S50:	10
Amplituda pozioma [mm] A62:	0,0

Widok złącza próbnego po wykonaniu spoin szepnych przedstawiono na Rys. 71. Na tym etapie zostały wykonane pomiary profilu, oraz szerokości złącza. Sposób wykonania pomiarów został opisany w rozdziale 5.5

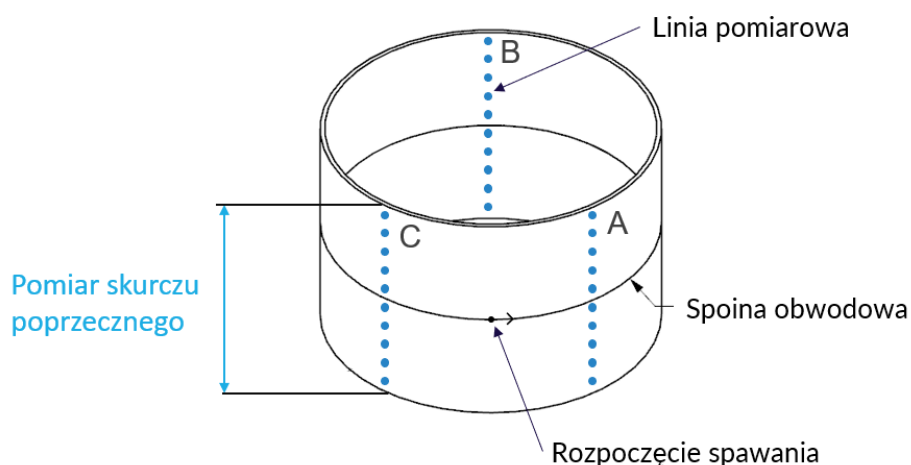


Rys. 71. Widok złącza próbnego przed spawaniem

Po wykonaniu szepiania, złącze próbne zdemontowano z przyrządu spawalniczego w celu wykonania pomiarów. Zmierzono wysokość każdego złącza na płycie grafitowej, z wykorzystaniem wysokościomierza Mitutoyo model HDS-H30C (570-302). Na Rys. 72 przedstawiono stanowisko pomiarowe oraz sposób pomiaru złącza. Każde złącze zmierzono wzdłuż linii pomiarowych oznaczonych jako A, B i C, które rozmieszczone były w równych odstępach na obwodzie (co 120°), z założeniem, że linia pomiarowa A to pierwsza linia pomiarowa po rozpoczęciu spawania. Rozpoczęcie spawania znajduje się w połowie pomiędzy liniami pomiarowymi C i A. Schematyczne określenie linii pomiarowych przedstawiono na Rys. 73.



Rys. 72. Sposób pomiaru wysokości złącza próbnego



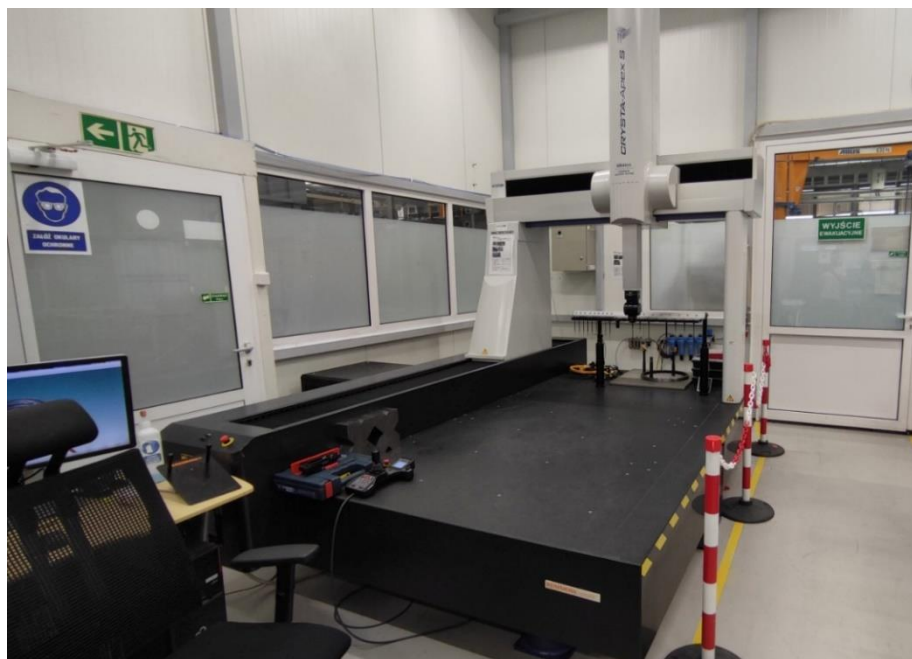
Rys. 73. Schematyczne przedstawienie lokalizacji linii pomiarowych A, B, C na złączu próbnym

Dla każdego złącza linie pomiarowe zostały trwale oznaczone pisakiem grawerskim. Dzięki temu pomiary na różnych etapach wytwarzania złączy zostały wykonywane w tych samych przekrojach. Wyniki pomiarów wysokości złączy przedstawiono w Tab. 13

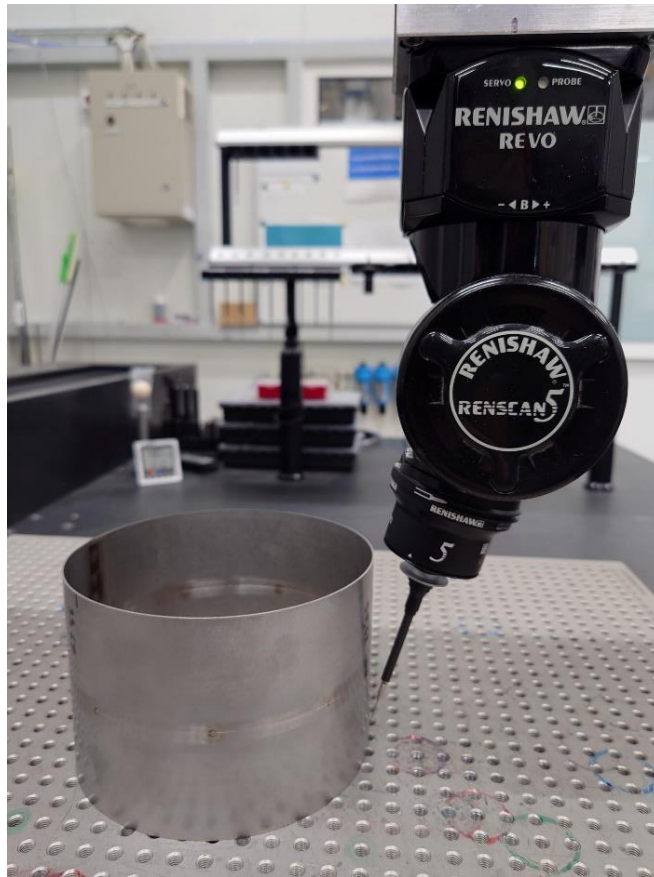
Tab. 13. Wysokość złączy próbnych po szepianiu, przed spawaniem

Oznaczenie złącza	A, mm	B, mm	C, mm	Średnia, mm
A1	99,63	99,61	99,68	99,64
A2	99,77	99,71	99,74	99,74
A3	100,06	100,18	100,06	100,1
A4	99,86	99,89	99,94	99,90
B1	99,61	99,62	99,6	99,61
B2	99,45	99,4	99,59	99,48
B3	99,52	99,51	99,61	99,55

Następnie na złączach próbnych po ich szepianiu (przed spawaniem) wykonano pomiar profilu złącza, analogicznie w liniach pomiarowych A, B, C. Pomiar profilu został wykonany na maszynie pomiarowej Mitutoyo Crysta-Apex S122010. Maszyna pomiarowa CMM została przedstawiona na Rys. 74. Sposób pomiaru złącza po szepianiu został przedstawiony na Rys. 75. Pomiar został wykonany głowicą Revo 1 z modulem RSP 2. Końcówka pomiarowa 0,7 mm została zamontowana na trzpieniu RSH-175.



Rys. 74. Maszyna pomiarowa Mitutoyo Crysta-Apex S122010



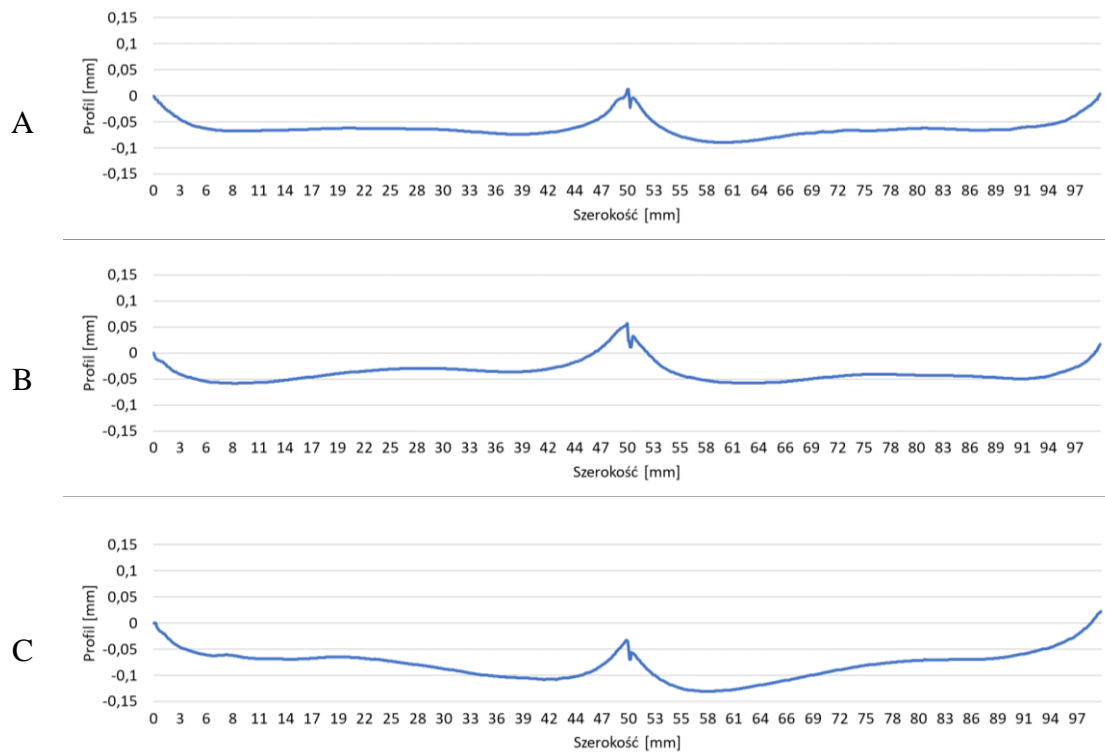
Rys. 75. Pomiar profilu próbki po szepianiu głowicą Revo

Dla każdego złącza próbnego został wykorzystany ten sam program pomiarowy. Pomiar wykonano mierząc każde złącze od dołu ku górze w linii pomiarowych A, B i C (Rys. 73). Na długości złącza (tj. około 100 mm), dla każdej linii pomiarowej zaprogramowano i zmierzono 1000 punktów pomiarowych. Odległość między punktami pomiarowymi wynosi 0,1 mm. Rezultatem pomiarów CMM są dokładne profile blach na przekrojach poprzecznych A, B, C (łącznie 3000 punktów pomiarowych dla każdego złącza próbnego).

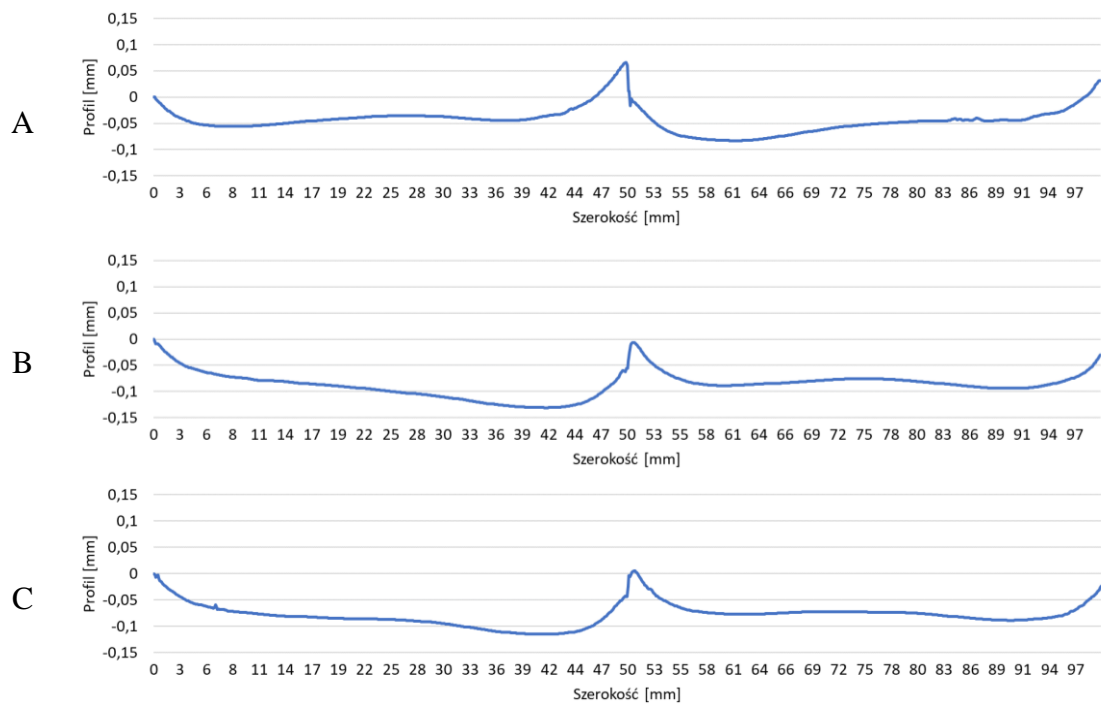
Na Rys. 76-82 przedstawiono profile złączy po szepianiu (przed spawaniem).

Kolejny etap pracy to wykonanie spoin czołowych. Parametry spawania ręcznego przedstawiono w Tab. 14, natomiast parametry spawania automatycznego w Tab. 15.

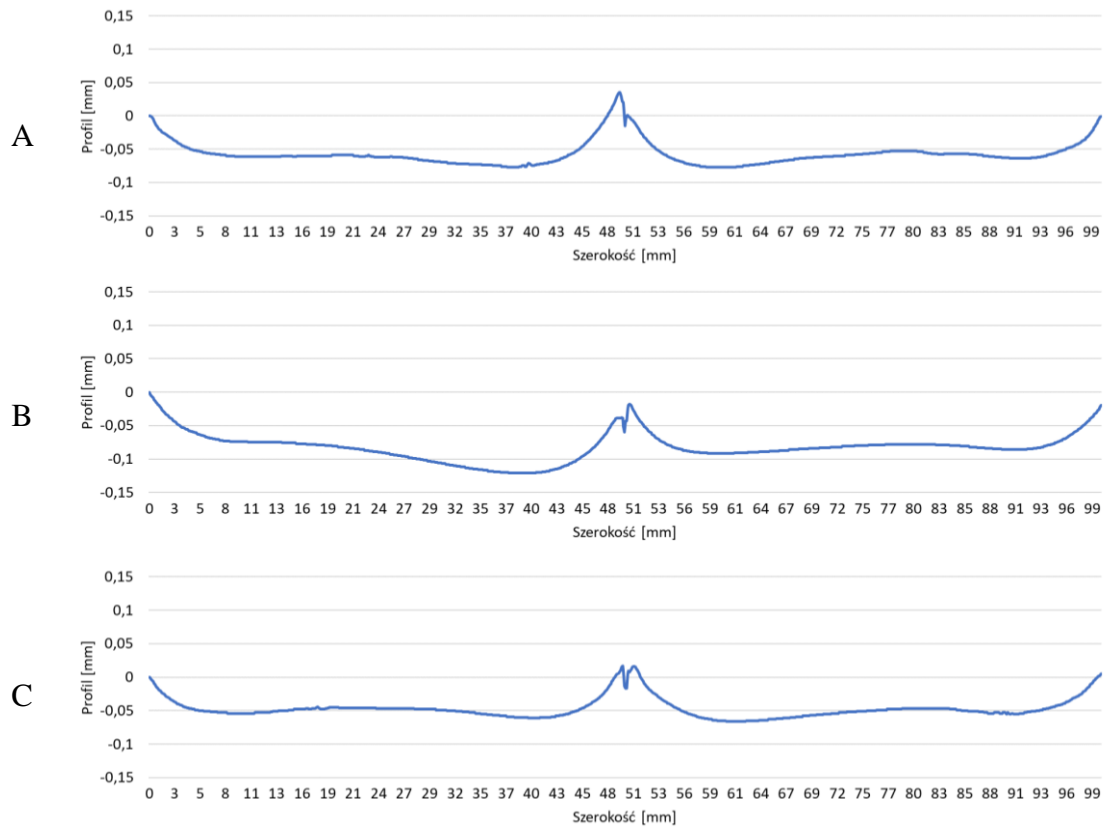
Widok gotowych próbnich złączy spawanych przedstawiono na Rys. 83-89.



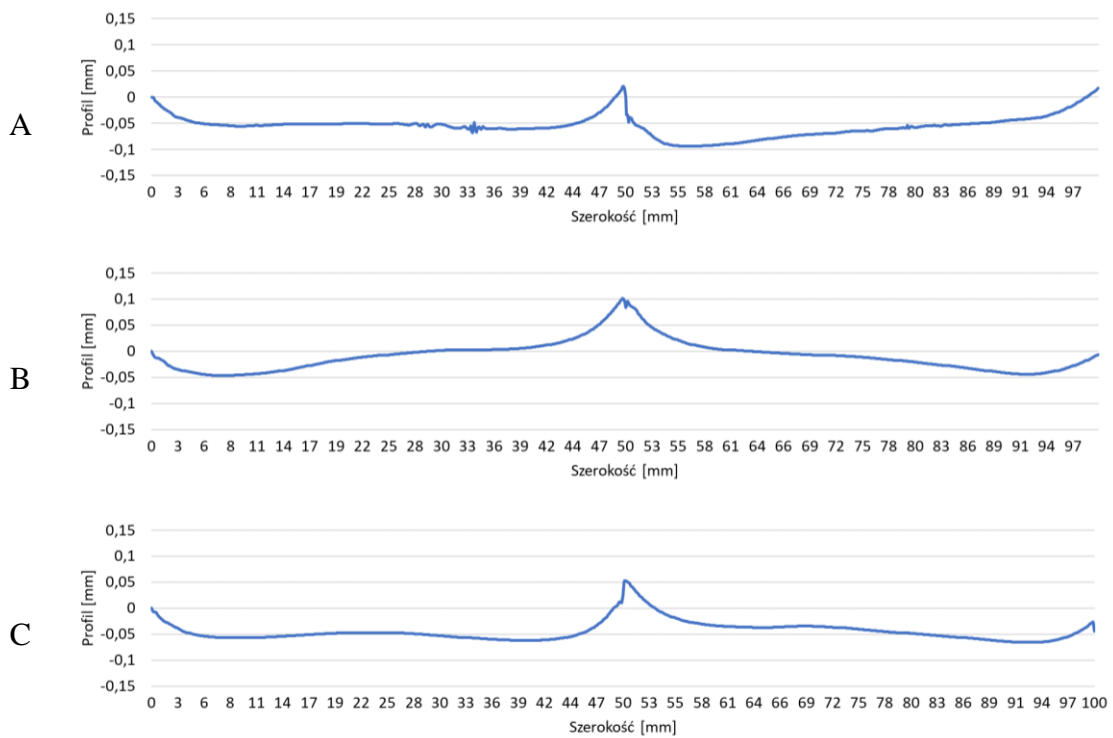
Rys. 76. Profile złącza próbnego A.1 na liniach pomiarowych A, B, C przed spawaniem



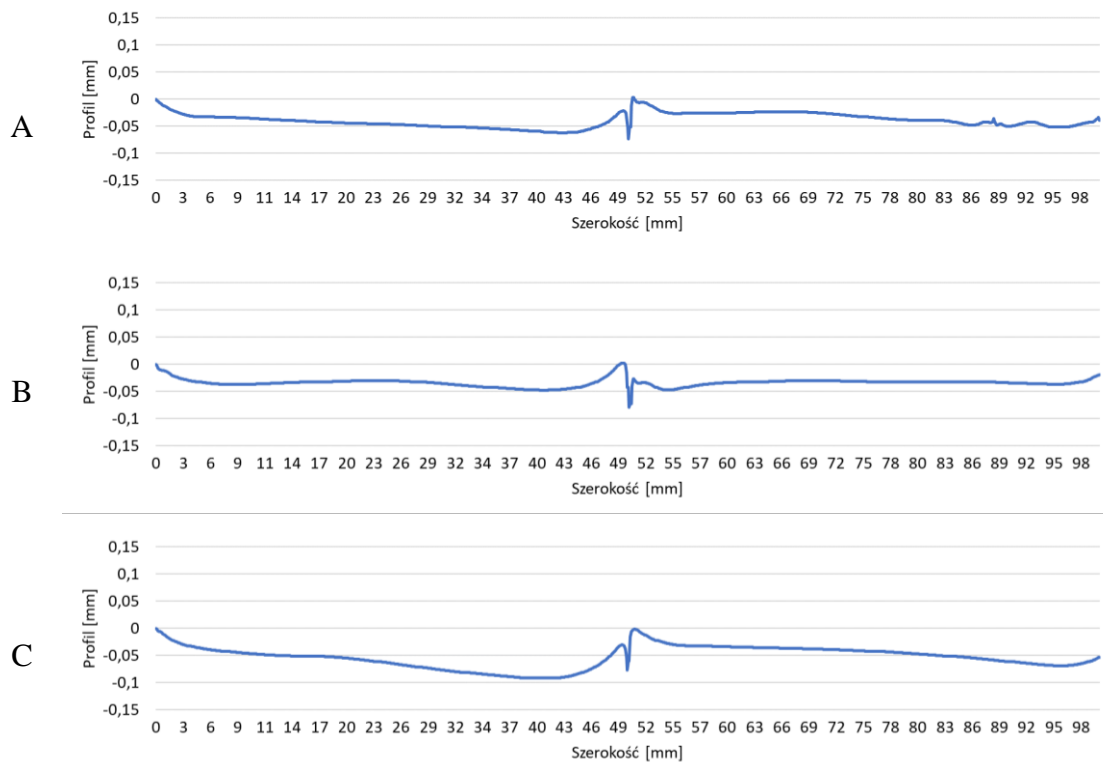
Rys. 77. Profile złącza próbnego A.2 na liniach pomiarowych A, B, C przed spawaniem



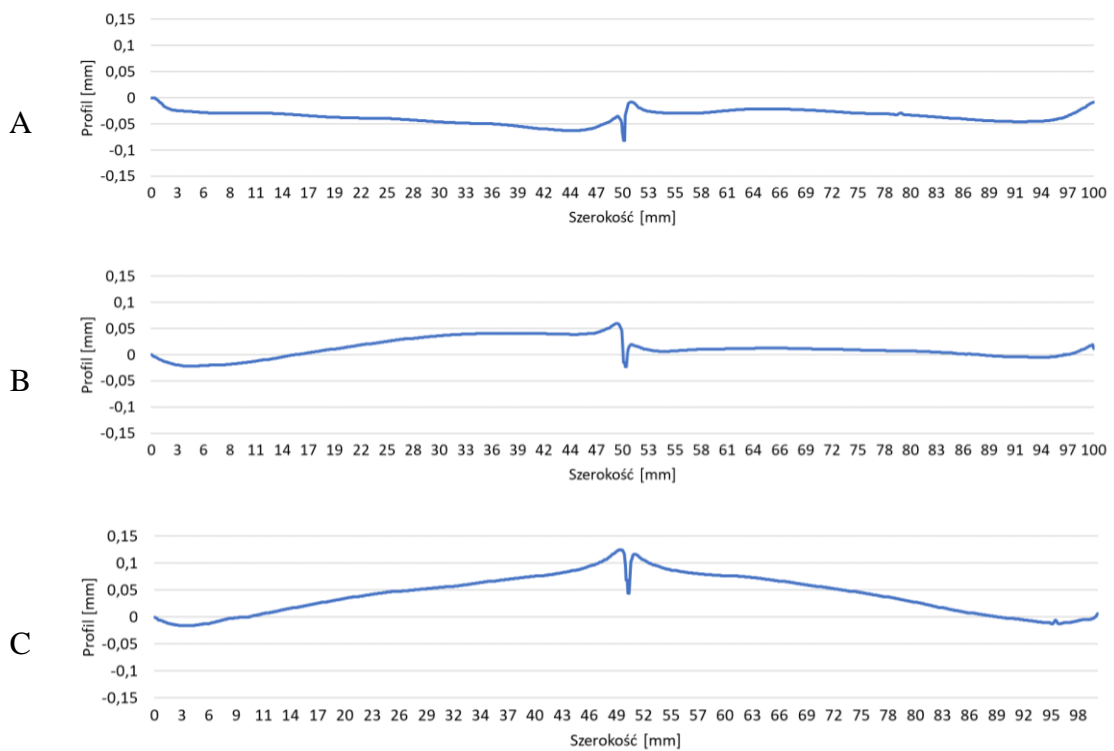
Rys. 78. Profile złącza próbnego A.3 na liniach pomiarowych A, B, C przed spawaniem



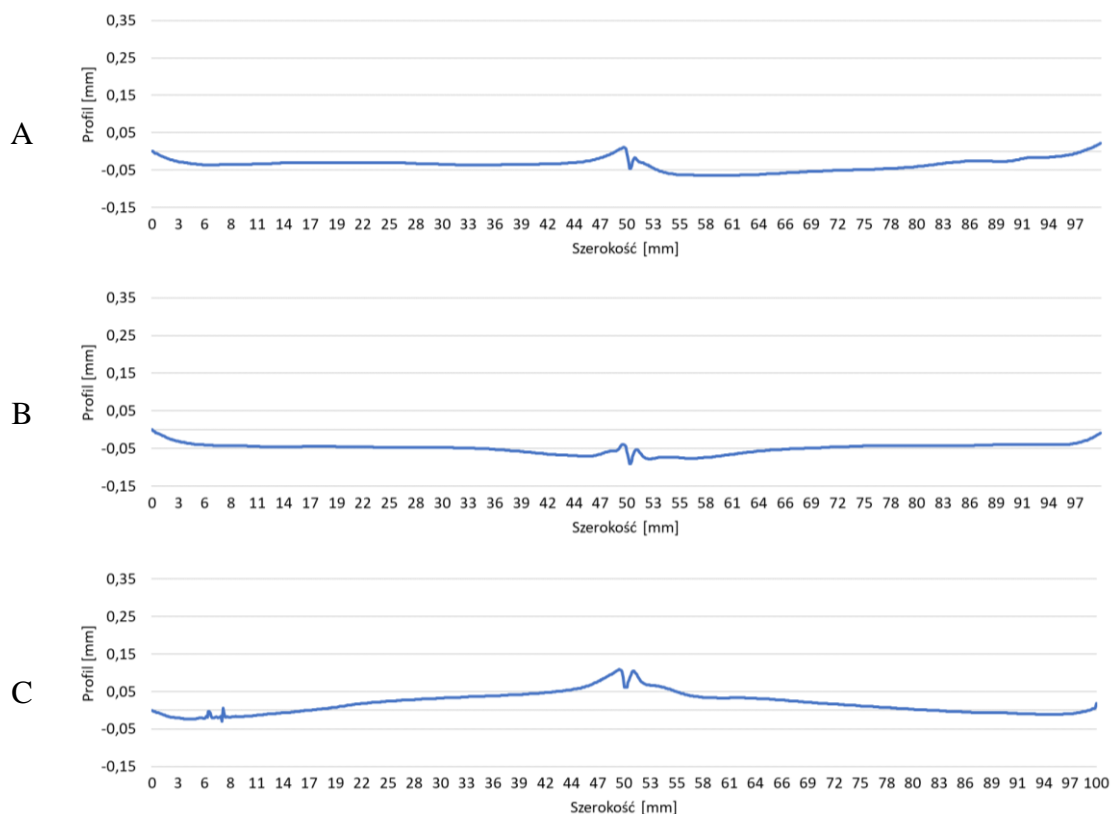
Rys. 79. Profile złącza próbnego A.4 na liniach pomiarowych A, B, C przed spawaniem



Rys. 80. Profile złącza próbnego B1 na liniach pomiarowych A, B, C przed spawaniem



Rys. 81. Profil złącza próbnego B.2 na liniach pomiarowych A, B, C przed spawaniem



Rys. 82. Profile złącza próbnego B.3 na liniach pomiarowych A, B, C przed spawaniem

Tab. 14. Parametry spawania ręcznego TIG

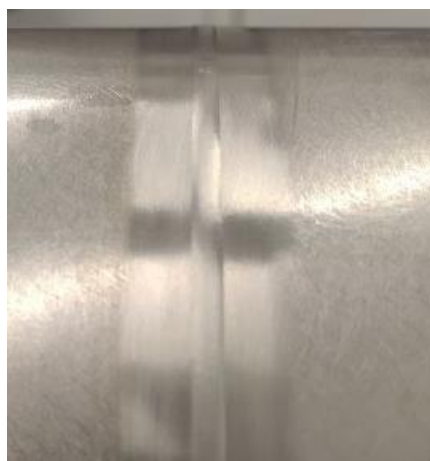
Parametry spawania:	A.1	B.1
Grubość materiału podstawowego [mm]:	0,9	
Średnica złącza próbnego [mm]:	150	
Rodzaj połączenia:	Czołowe	
Pozycja spawania	Podolna (1G)	
Polaryzacja	DC -	
Rodzaj materiału dodatkowego:	AMS5825	AMS5832
Średnica materiału dodatkowego [mm]:	0,9	
Rodzaj gazu osłonowego	Argon (99,999%)	
Rodzaj dyszy gazowej:	6L	
Wymiary dyszy [mm]:	długość 35, średnica wewnętrzna 9,6	
Natężenie przepływu gazu na uchwyt [L/min]:	9-10	
Natężenie przepływu gazu na grań [L/min]:	9-10	
Czas napełniania grani przed spawaniem [min]:	2	
Typ elektrody wolframowej:	WC20	
Średnica elektrody:	1,6	
Kąt ostrzenia [°]:	30	
Wystawianie elektrody [mm]:	6	
Natężenie prądu spawania [A]:	30-40	
Parametry pulsu:	Bez pulsacji	
Prędkość spawania [mm/min]:	130-170	

Tab. 15. Parametry spawania automatycznego TIG

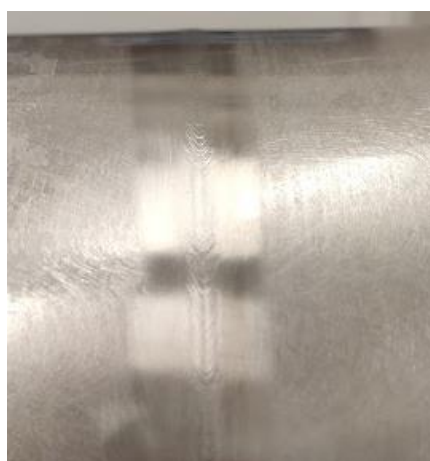
Parametry spawania	Oznaczenie złącza spawanego				
	A.2	A.3	A.4	B.2	B.3
Grubość materiału podstawowego [mm]:	0,9				
Średnica złącza próbnego [mm]:	150				
Rodzaj połączenia:	Czołowe				
Pozycja spawania	Podolna (1G)				
Polaryzacja	DC -				
Rodzaj materiału dodatkowego:	AMS5825		brak	AMS5832	brak
Średnica materiału dodatkowego [mm]:	0,9		brak	0,9	brak
Rodzaj gazu osłonowego	Argon (99,999%)				
Rodzaj dyszy gazowej:	12				
Wymiary dyszy [mm]:	długość 47, średnica wewnętrzna 19				
Natężenie przepływu gazu na uchwyt [L/min]:	17-18				
Natężenie przepływu gazu na grań [L/min]:	9-10				
Czas napełniania grani przed spawaniem [min]:	2				
Typ elektrody wolframowej:	WC20				
Średnica elektrody:	3,2				
Kąt ostrzenia [°]:	30				
Wystawanie elektrody [mm]:	10				
Gaz osłonowy					
Czas wyprzedzenia [sek] T10:	4,0				
Czas opóźnienia [sek] T11:	8,0				
Parametry prądowe					
Prąd zajarzenia [A] I20:	15,0				
Start wygaszenia [°] N20:	361				
Czas wygaszania [sek] T25:	9,0				
Prąd wyłączenia [A] I25:	5,0				
Natężenie prądu (wysoki puls) [A] I22:	70,0	92,0	65,0	65,0	60
Natężenie prądu (niski puls) [A] I23:	17,0	27,0	17,0	12,0	12,0
Czas trwania wysokiego pulsu [ms] T22:	55,0				
Czas trwania niskiego pulsu [ms] T23:	115,0				
Podawanie drutu (materiału dodatkowego)					
Opóźnienie podawania [sec] T40:	0,2				
Czas narastania podawania [sec] T44:	0,0				
Prędkość podawania drutu [mm/min] V42:	170,0	170	0	250	0
Zatrzymanie drutu [st] N40:	363				
Cofnięcie drutu [sec] T41:	1,0				
Obrót stołu					
Czas opóźnienia obrotu [sec] T30:	0,1			0,3	
Prędkość obrotowa [mm/min] V32:	170,0	240	170,0		
Układ AVC					
Wysokość [mm] H50:	1,0				
AVC opóźnienie [sek] T50:	1,0				
Wygaszanie [stopnie] N50:	14				
Wygaszanie, wysokość [mm] H54:	3,0				
Napięcie [V] H52:	8,4				
Czas narastania [sec] T51:	0,0				
Prędkość uchwytu AVC [mm/min] V50:	120,0				
Czułość S50:	10,0				
Amplituda pozioma [mm] A62:	0,0				



Rys. 83. Widok złącza próbnego A.1, materiał stal nierdzewna 17-4PH



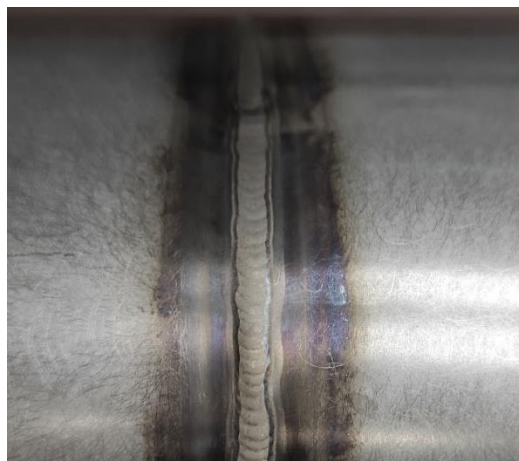
Rys. 84. Widok złącza próbnego A.2, materiał stal nierdzewna 17-4PH



Rys. 85. Widok złącza próbnego A.3, materiał stal nierdzewna 17-4PH



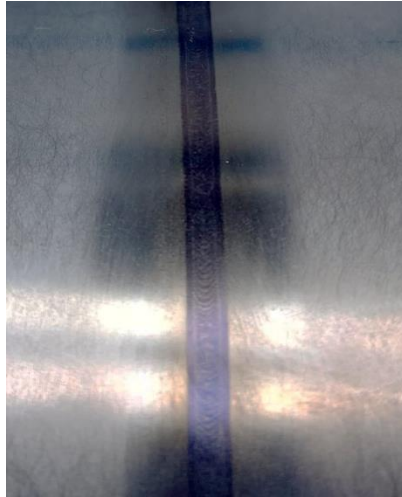
Rys. 86. Widok złącza próbnego A.4, materiał stal nierdzewna 17-4PH



Rys. 87. Widok złącza próbnego B.1, materiał Inconel 718



Rys. 88. Widok złącza próbnego B.2, materiał Inconel 718



Rys. 89. Widok złącza próbnego B.3, materiał Inconel 718

5.5 Pomiary złączy próbnych po spawaniu

Po spawaniu wykonano pomiary spoin. Każdą ze spoin zmierzono na cyfrowym projektorze profilowym Keyence serii IM (Rys. 90). Jest to precyzyjny system pomiarowy, zawierający komponenty optyczne o wysokiej precyzji. Operator umieszcza kontrolowaną część lub odcisk na stole montażowym i może zmierzyć do 99 wymiarów w ciągu zaledwie kilku sekund z dokładnością do $\pm 2 \mu\text{m}$. Pomiary przeprowadza się przy wykorzystaniu podświetlenia części (diaskopia) lub oświetlenia bezpośredniego (episkopia). Głowica pomiarowa IM-6225 wyposażona jest w urządzenie oświetlające, które znacznie zwiększa możliwości oświetlenia episkopowego, poszerzając tym samym spektrum pomiarowe o części wymagające specyficznych warunków oświetleniowych. Pomiar spoin polegał na wykonaniu odcisków spoin, wykorzystując do tego celu dwuskładnikową masę plastyczną o konsystencji plasteliny. Po wymieszaniu masy w proporcjach 1:1 nałożono masę na licu i grani spoiny. Po upływie 15 minut masę zdjęto i wykonano przekroje, które umieszczono na stole montażowym projektora. Na projektorze zmierzono wysokość i szerokość lica oraz grani.

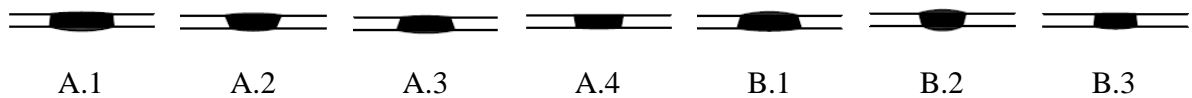
Wyniki pomiarów parametrów geometrycznych lica i grani spoin przedstawiono w Tab. 16. Schematyczny przekrój spoin, wykonany na podstawie wyników z Tab. 16 przedstawiono na Rys. 91.



Rys. 90. Cyfrowy projektor profilowy Keyence serii IM [19]

Tab. 16. Wyniki pomiaru geometrii spoin próbnych złączy spawanych

Oznaczenie złącza		A.1	A.2	A.3	A.4	B.1	B.2	B.3
Lico	szerokość, mm	4,28	3,84	3,4	3,4	3,91	3,26	2,8
	wysokość, mm	0,1	0,12	0,08	0,02	0,23	0,23	0,02
Grań	szerokość, mm	4,46	3,06	4,06	3,09	4,46	2,78	2,98
	wysokość, mm	0,29	0,15	0,20	0,06	0,17	0,31	0,15
Pole powierzchni przekroju poprzecznego spoiny [mm ²]:		5,09	3,72	4,07	3,07	4,86	3,79	2,95



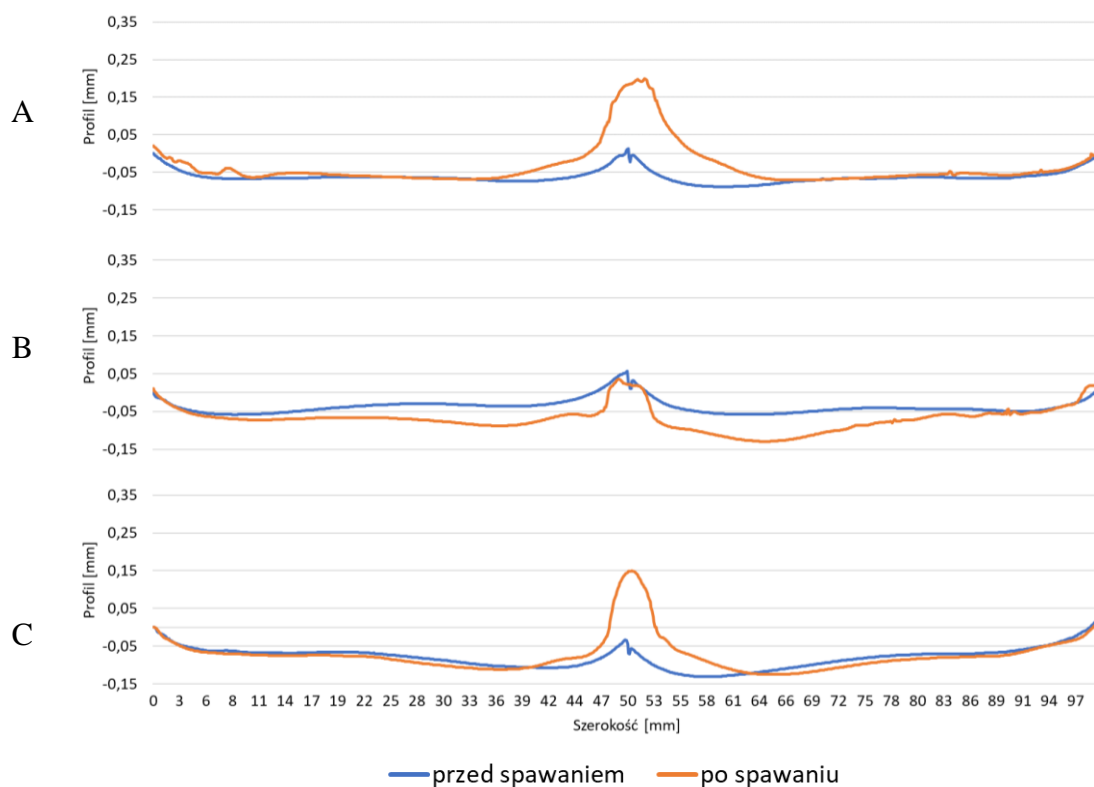
Rys. 91. Przekrój spoin, opracowany na podstawie wyników pomiaru spoin na projektorze cyfrowym

Następnie każde złącze zmierzono wysokościomierzem Mitutoyo. Pomiar wykonano analogicznie jak przed spawaniem, w tych samych miejscach. W Tab. 17 przedstawiono wyniki pomiarów wysokości złączy próbnych po spawaniu.

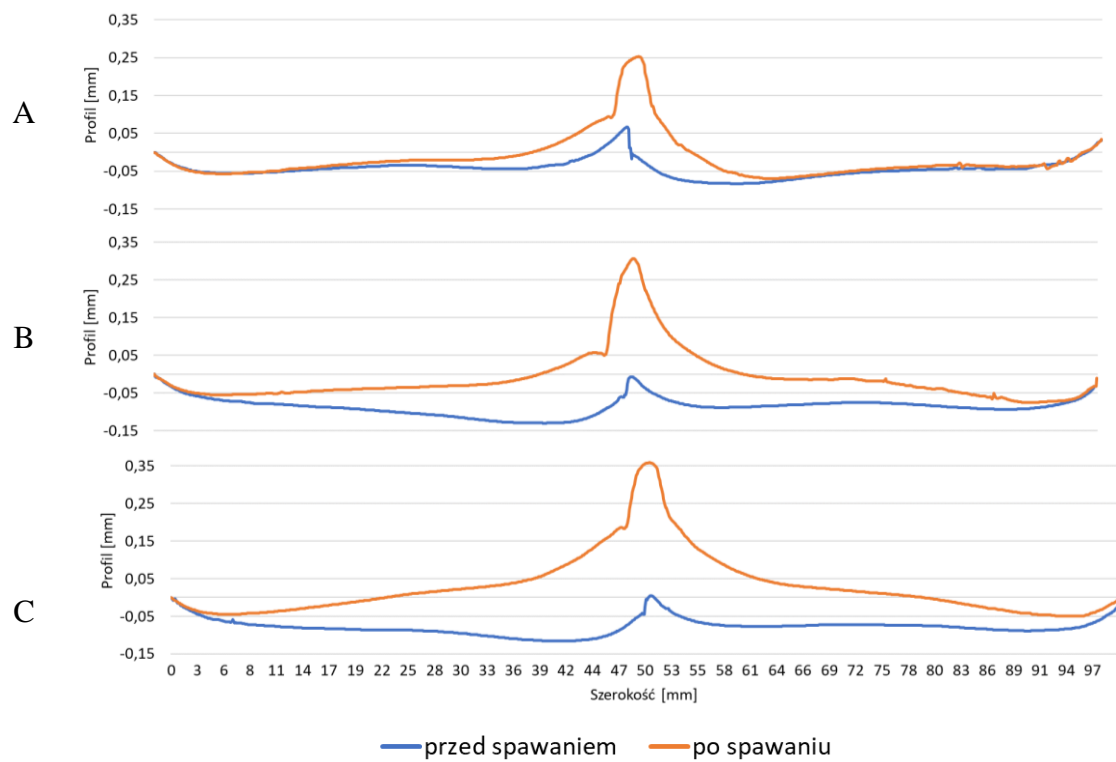
Tab. 17. Wysokość złączy po spawaniu, przed obróbką cieplną

Oznaczenie złącza	A, mm	B, mm	C, mm	Średnia, mm
A.1	99,26	99,28	99,27	99,27
A.2	99,38	99,37	99,4	99,38
A.3	99,65	99,75	99,67	99,69
A.4	99,47	99,5	99,56	99,51
B.1	99,3	99,31	99,24	99,28
B.2	99,15	99,15	99,32	99,21
B.3	99,19	99,2	99,26	99,22

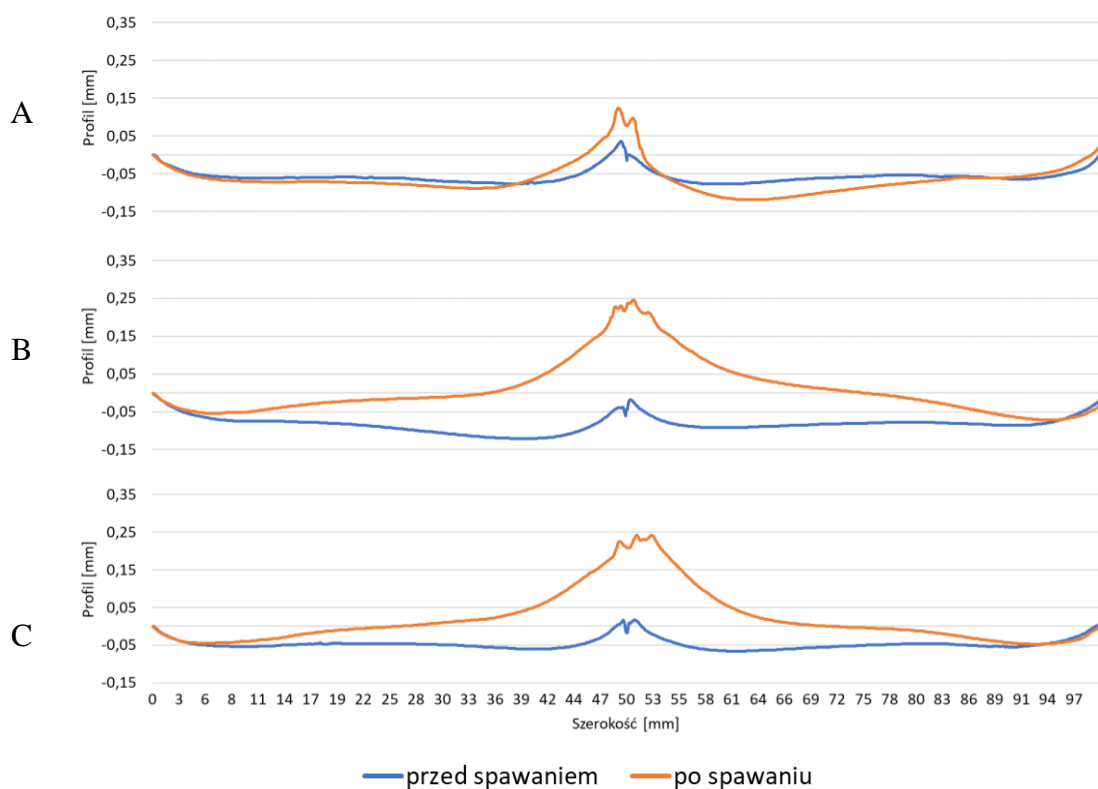
Kolejno, analogicznie jak przed spawaniem, dokonano pomiaru profilu próbnego złączy po spawaniu. Wyniki pomiaru profili po spawaniu przedstawiono na Rys. 92-98. Na wykresach tych uwzględniono również pomiar profilu przed spawaniem.



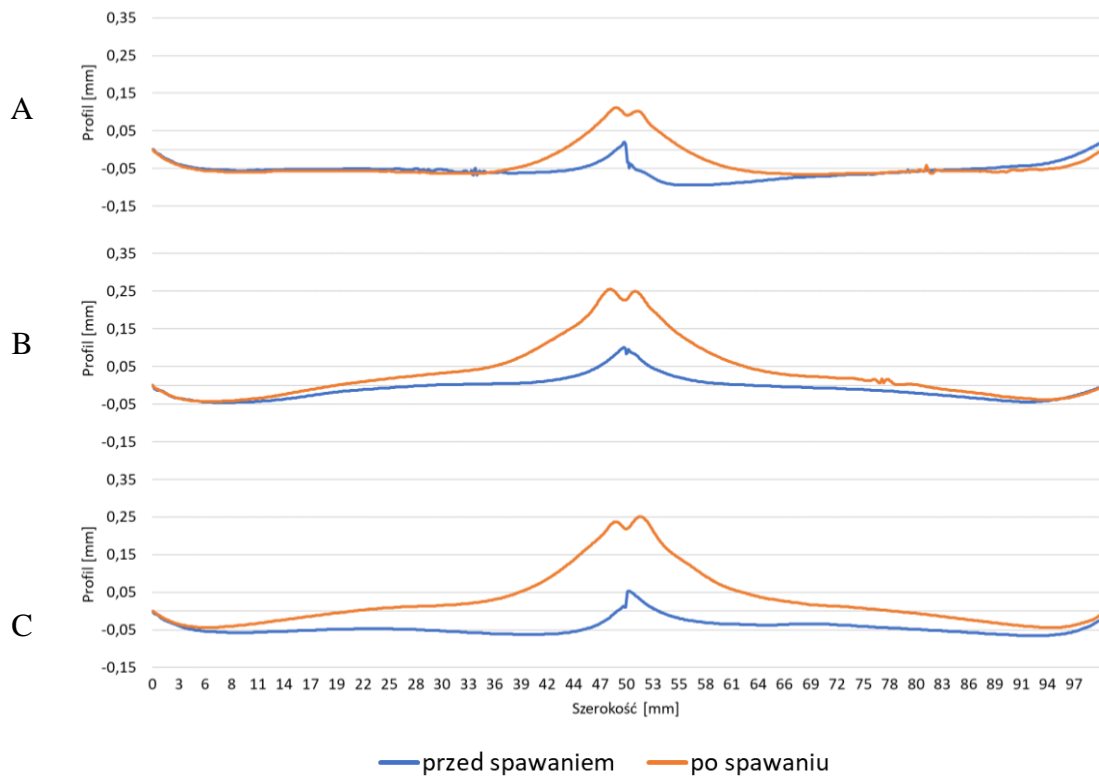
Rys. 92. Profile złącza próbnego A.1 na liniach pomiarowych A, B, C przed i po spawaniu



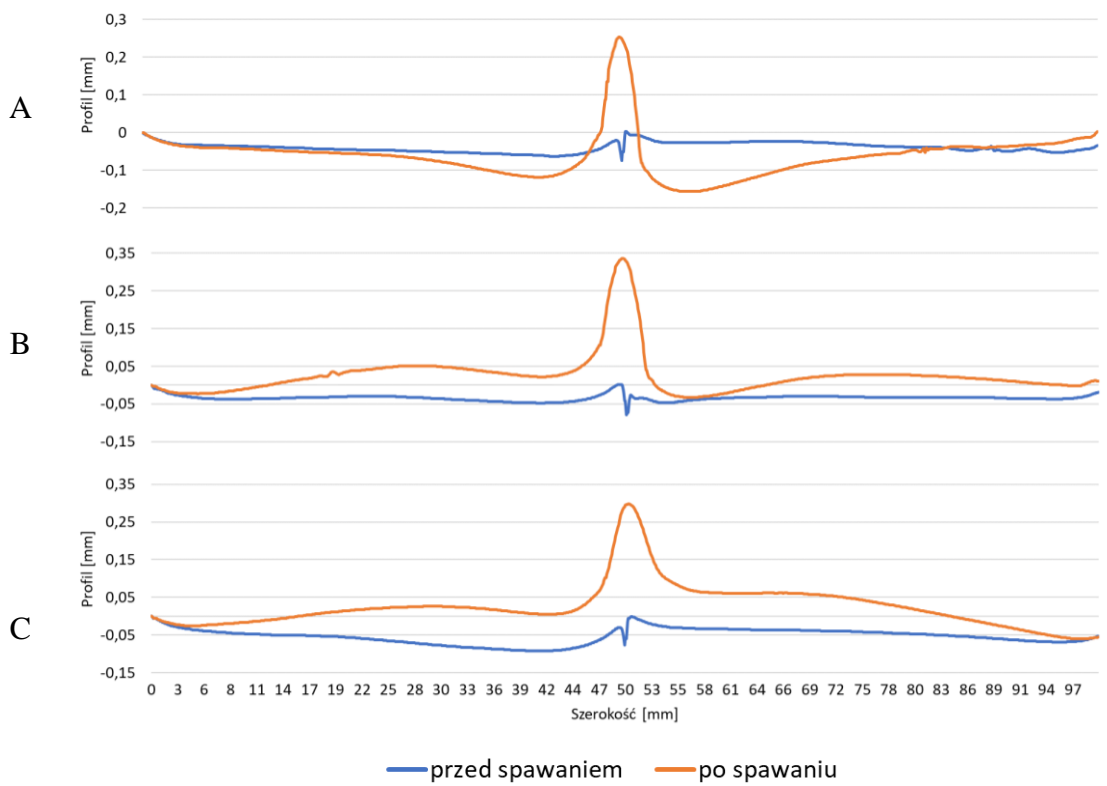
Rys. 93. Profile złącza próbnego A.2 na liniach pomiarowych A, B, C przed i po spawaniu



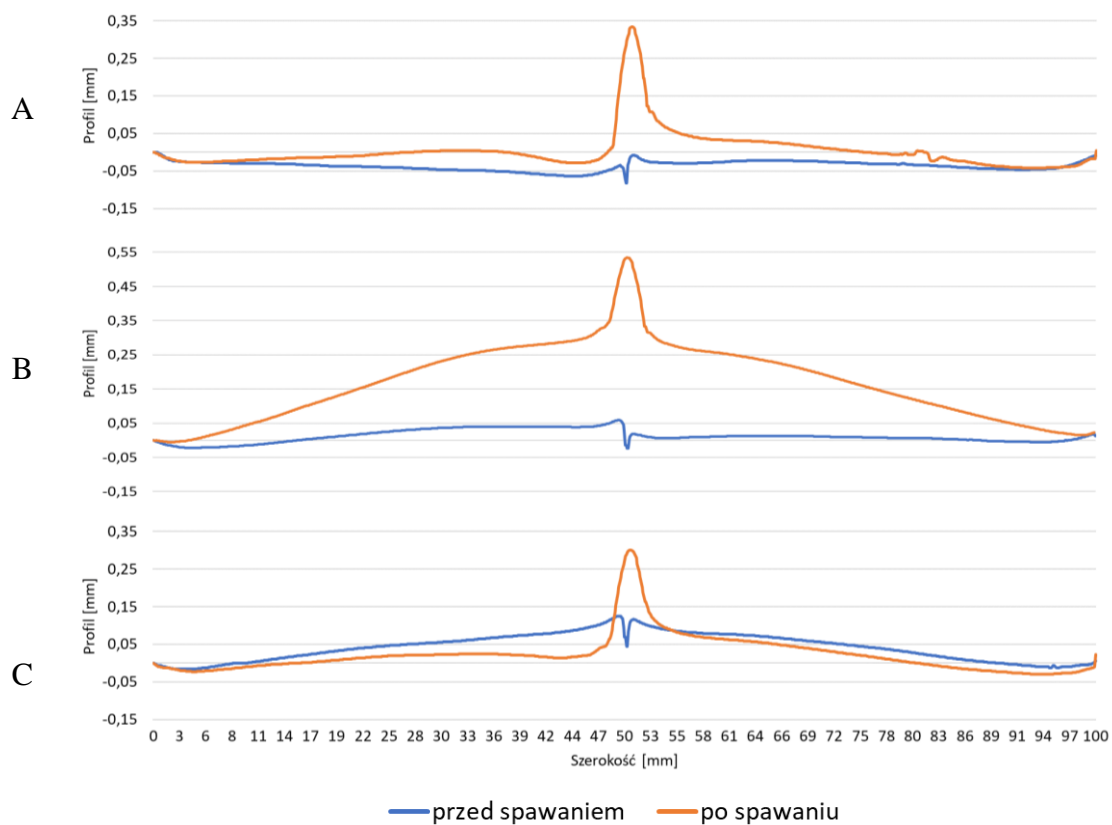
Rys. 94. Profile złącza próbnego A.3 na liniach pomiarowych A, B, C przed i po spawaniu



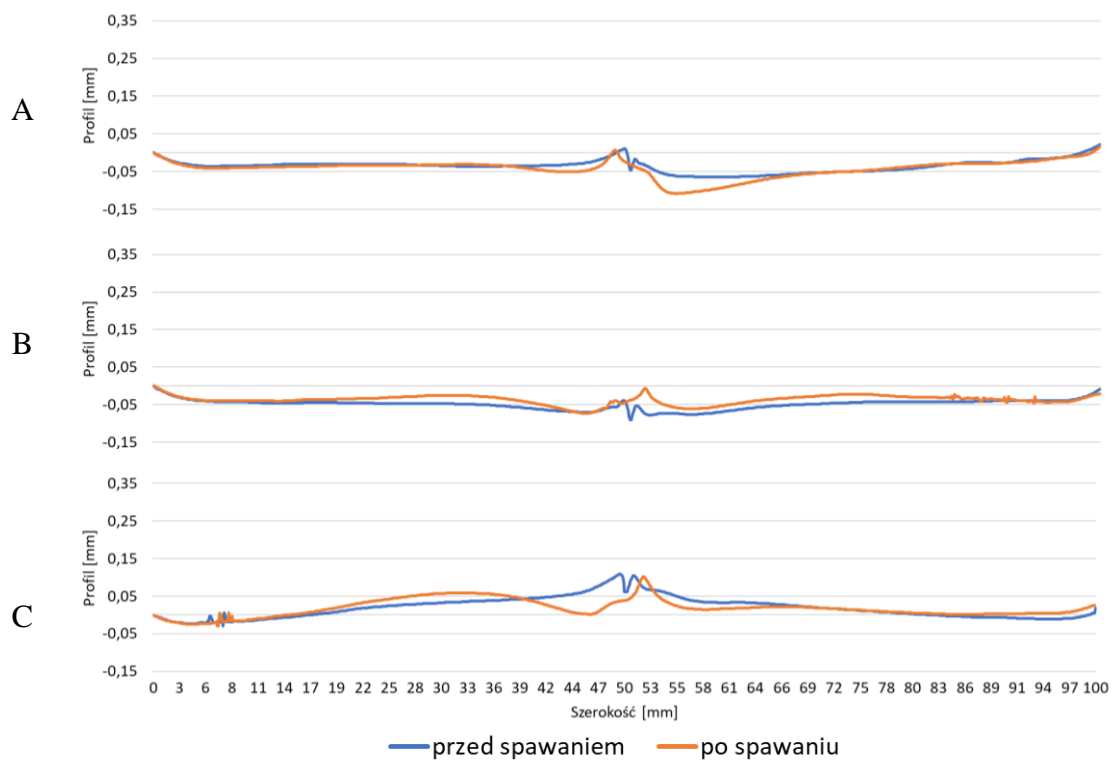
Rys. 95. Profile złącza próbnego A.4 na liniach pomiarowych A, B, C przed i po spawaniu



Rys. 96. Profile złącza próbnego B.1 na liniach pomiarowych A, B, C przed i po spawaniu



Rys. 97. Profile złącza próbnego B.2 na liniach pomiarowych A, B, C przed i po spawaniu



Rys. 98. Profil złącza próbnego B.3 na liniach pomiarowych A, B, C przed i po spawaniu

5.6 Badania nieniszczące próbných złączy spawanych

Badania nieniszczące złączy spawanych wykonano zgodnie ze standardami stosowanymi w seryjnej produkcji części lotniczych w firmie MB Aerospace. Wykonano kontrolę wizualną (VT) oraz kontrolę penetracyjną fluorescencyjną FPI (Fluorescent Penetrant Inspection).

Podczas kontroli, dla spoin czołowych przyjęto kryteria akceptacji zgodne z klasą A, specyfikacji AWS D17.1 [110]. Wybrane kryteria akceptacji oraz wyniki kontroli wizualnej przedstawiono w Tab. 18.

Tab. 18. Kryteria akceptacji kontroli wizualnej, oraz wyniki kontroli

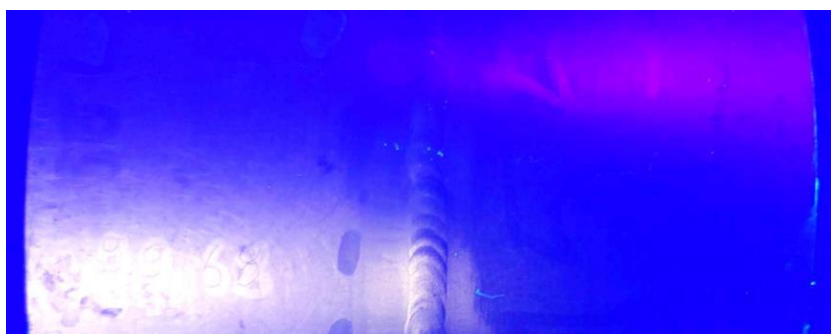
Wada	Kryteria akceptacji	Oznaczenie złącza próbnego						
		A.1	A.2	A.3	A.4	B.1	B.2	B.3
Pęknięcia	nie dopuszczalne	Nie stwierdzono						
Brak przetopu	nie dopuszczalne	Nie stwierdzono						
Brak wtopienia	nie dopuszczalne	Nie stwierdzono						
Porowatość powierzchni	max 0,29 mm	Nie stwierdzono						
Wtrącenia	max 0,29 mm	Nie stwierdzono						
Podcięcia	głębokość max 0,051 mm	Nie stwierdzono						
Wysokość lica	max 0,76 mm spoiny automatyczne	-	0,12	0,08	0,02	-	0,23	0,02
	max 0,9 mm spoiny ręczne	0,10	-	-	-	0,22	-	-
Wysokość grani	max 0,76 mm spoiny automatyczne	-	0,15	0,20	0,06	-	0,31	0,15
	max 0,9 mm spoiny ręczne	0,29	-	-	-	0,17	-	-
Wklęśnięcie lica, grani	max 0,13 mm	-	-	-	-	-	-	-
Przestawienie [mm]	przyjęto max 0,21	0,05-0,07	0,05-0,11	0,06-0,09	0,02-0,04	0-0,15	0,01-0,03	0,0-0,02
Krater	głębokość max 0,18 mm	0,1	-	-	-	-	-	-

Na podstawie wykonanych badań VT stwierdzono, że wszystkie złącza spełniają wymagania specyfikacji lotniczych dotyczących kontroli wizualnej.

Badania FPI zostały wykonane zgodnie ze standardami kontroli FPI stosowanymi w MB Aerospace, zgodnie z międzynarodową normą ASTM E1417 poziom 2 metoda A [111]. Przed kontrolą FPI złącza zostały poddane odłuszczeniu, w dedykowanych myjkach, w środku zatwierdzonym w branży lotniczej. Złącza po odłuszczeniu zostały zanurzone w penetrancie HM 406. Czas kontaktu penetrantu ze złączami próbnymi wyniósł 16-17 minut. Następnie złącza zostały zanurzone w wannie do wstępnego płukania przed myciem końcowym na czas 8-10 sekund. Kolejnym etapem badania było mycie złączy pod lampą UV, stosując natrysk

wody o temperaturze 14-18°C i ciśnieniu 0,275 MPa. Złącza były myte do momentu spłukania penetrantu z powierzchni. Czas płukania wyniósł 30-40 sek. Umyte złącza zostały wysuszone w suszarce komorowej w temperaturze 65°C. Na tak przygotowane złącza został nałożony suchy wywoływacz Sherwin D90G w postaci mgły proszkowej naniesionej pod ciśnieniem powietrza 0,1 MPa. Nadmiar wywoływacza został usunięty sprężonym powietrzem. Tak przygotowane złącza zostały poddane oględzinom w kabinie kontrolnej pod lampą UV o natężeniu promieniowania 2000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ na powierzchni złącza.

Kwalifikacja wskazań i kryteria akceptacji przyjęto zgodnie ze specyfikacją AWS D17.1 [110] dla klasy A. Zdjęcia powierzchni złączy próbnych podczas kontroli FPI przedstawiono na Rys. 99-105. W próbnym złączach występują wskazania punktowe zlokalizowane w materiale podstawowym, które mieszczą się w przyjętych kryteriach akceptacji. Żadne ze złączy nie ma wskazań na spoinach. Złącza próbne spełniają wymagania AWS D17.1 dla klasy A. Po wykonaniu kontroli, złącza zostały umyte w roztworze wodnym zgodnie z procedurami MB Aerospace, w celu usunięcia zastosowanego wywoływacza, oraz pozostałości innych materiałów używanych w kontroli.



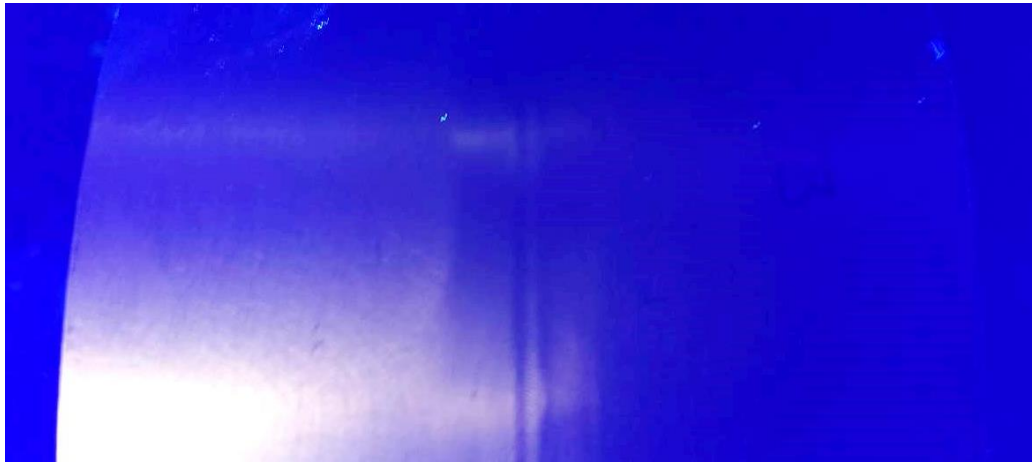
Rys. 99. Zdjęcie powierzchni złącza próbnego A.1 podczas kontroli FPI



Rys. 100. Zdjęcie powierzchni złącza próbnego A.2 podczas kontroli FPI



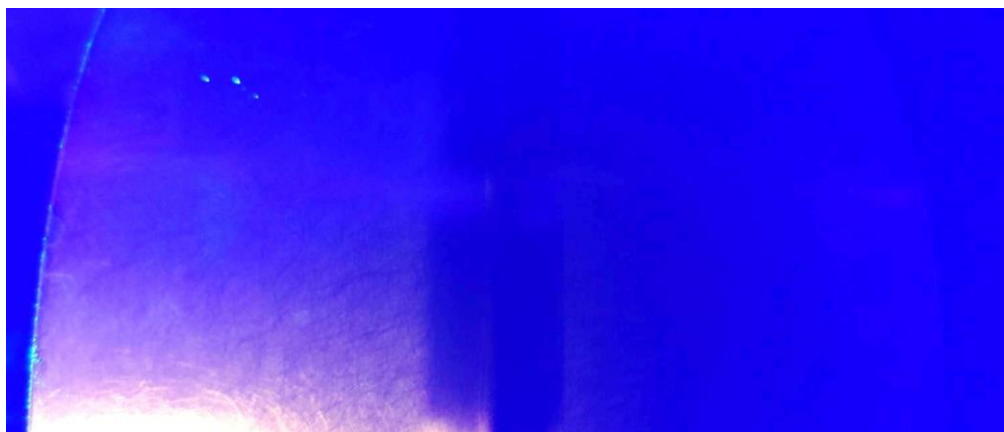
Rys. 101. Zdjęcie powierzchni złącza próbnego A.3 podczas kontroli FPI



Rys. 102. Zdjęcie powierzchni złącza próbnego A.4 podczas kontroli FPI



Rys. 103. Zdjęcie powierzchni złącza próbnego B.1 podczas kontroli FPI



Rys. 104. Zdjęcie powierzchni złącza próbnego B.2 podczas kontroli FPI



Rys. 105. Zdjęcie powierzchni złącza próbnego B.3 podczas kontroli FPI

5.7 Obróbka cieplna próbnych złączy spawanych

W procesie produkcyjnym części lotniczych, najczęściej po spawaniu wykonuje się obróbkę cieplną. Dla stali 17-4 PH oraz stopu Inconel 718 jest to utwardzanie wydzieleniowe.

Pierwszym etapem utwardzania wydzieleniowego jest przesycanie. Polega ono na podgrzewaniu materiału do temperatury powyżej linii rozpuszczalności, która dla stali 17-4PH wynosi około 980-1065°C. Złącza próbne reprezentujące części produkcyjne zostały poddane procesowi przesycania w temperaturach takich jak części produkcyjne. Przesycanie złączy z materiału 17-4 PH wykonano wg wymagań norm lotniczych z uwzględnieniem obróbki w temperaturze max 1052 °C (1925 F). Przesycanie materiału 17-4PH zgodnie z wymaganiami specyfikacji AMS należy wykonać w zakresie temperatur 1038 °C ± 14 °C. Dla stopu Inconel 718 przesycanie zgodnie z normą AMS należy wykonać w zakresie temperatur 941 to 996 °C w czasie uzależnionym od grubości materiału.

Po wykonaniu przesycania złącza poddano zabiegowi starzenia. Proces starzenia polega na podgrzewaniu materiału na ogół do temperatury w zakresie 480-640°C przez około 4 godziny.

Dokładne parametry procesu przesycania i starzenia próbnych złączy spawanych wykonanych ze stali 17-4PH oraz ze stopu Inconel 718 przedstawiono w Tab. 19 dla stali 17-4PH oraz w Tab. 20 dla stopu Inconel 718. Obróbkę cieplną złączy wykonano razem z detalami produkcyjnymi we wspólnym wsadzie w piecu.

Tab. 19. Proces przesycania złączy próbnych z materiału 17-4PH

Etap procesu	Typ procesu	Szybkość, °C/min	Temperatura, °C	Czas, min	Tolerancja wytrzymania °C
1	Grzanie w próżni	10	954	30	14
2	Grzanie w próżni	15	1049	5	8
3	Chłodzenie z piecem		954	1	14
4	Grzanie w próżni	3	954	30	14
5	Chłodzenie kontrolowane	20	420	0	6
6	Chłodzenie kontrolowane	10	60	5	-

Tab. 20. Proces przesycania złączy próbnych z materiału Inconel 718

Etap procesu	Typ procesu	Szybkość, °C/min	Temperatura °C	Czas min	Tolerancja wytrzymania °C
1	Grzanie w próżni	10	954	65	14
2	Chłodzenie kontrolowane	25	417	1	-
3	Chłodzenie z wentylatorem	-	50	5	-

Tab. 21. Parametry procesu starzenia złączy próbnych z materiału 17-4PH

Etap procesu	Typ procesu	Szybkość, °C/min	Temperatura, zadana °C	Czas, min	Tolerancja wytrzymania, °C
1	Grzanie w próżni	10,0	621	245	6
2	Chłodzenie z wentylatorem	-	50	2	-

Tab. 22. Proces starzenia złączy próbnych z materiału Inconel 718

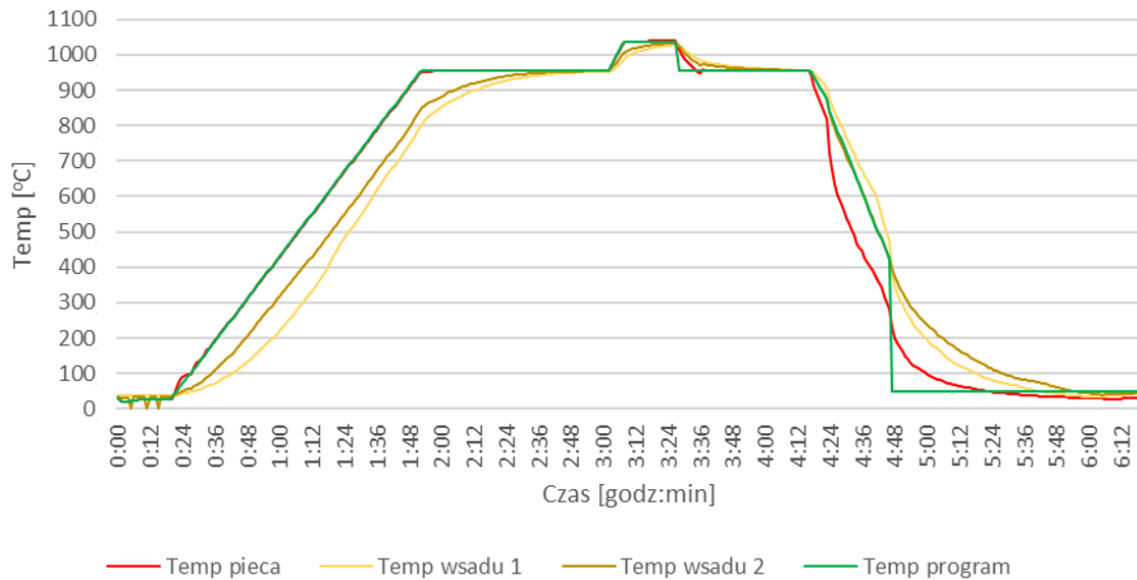
Etap procesu	Typ procesu	Szybkość, °C/min	Temperatura zadana, °C	Czas wytrzymania, min	Tolerancja wytrzymania, °C
1	Grzanie w próżni	10	760	300	14
2	Chłodzenie w próżni	-	640	1	-
3	Grzanie w próżni	10	649	65	14
4	Chłodzenie kontrolowane	25	530	1	-
5	Chłodzenie z wentylatorem	-	50	5	-

Przed wykonaniem obróbki cieplnej próbne złącza spawane zostały umyte w myjce natryskowej. Następnie złącza te umieszczono w piecu próżniowym wraz z detalem produkcyjnym. Do obróbki cieplnej wykorzystany został piec próżniowy Seco Warwick model 10.0VPT-4050/48HVN (Rys. 106), dostępny w jednym z oddziałów firmy MB Aerospace.

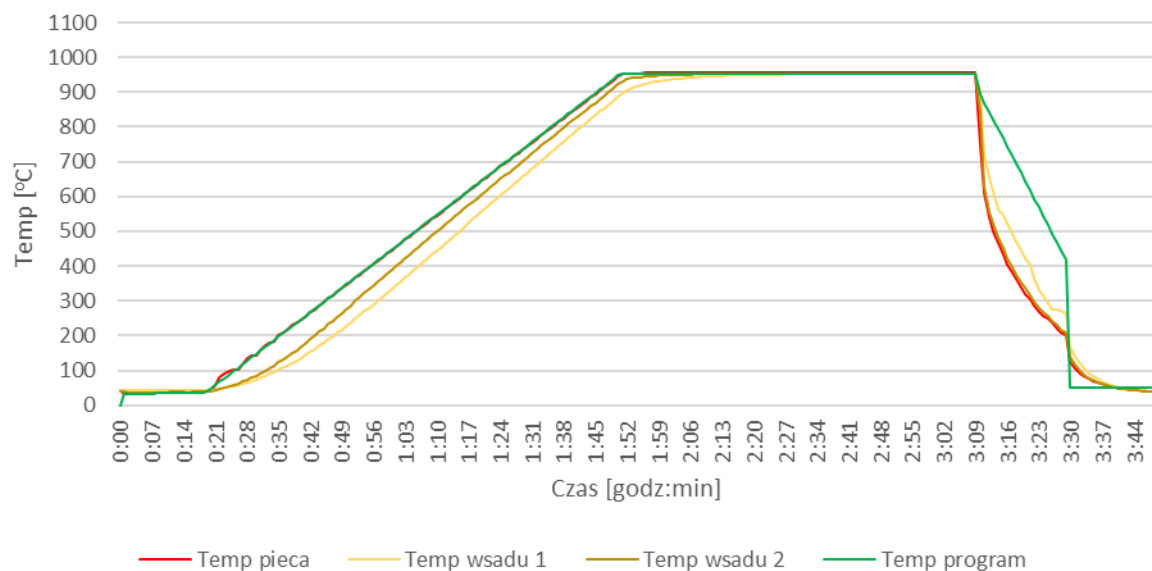


Rys. 106. Piec próżniowy Seco Warwick model 10.0VPT-4050/48HVN

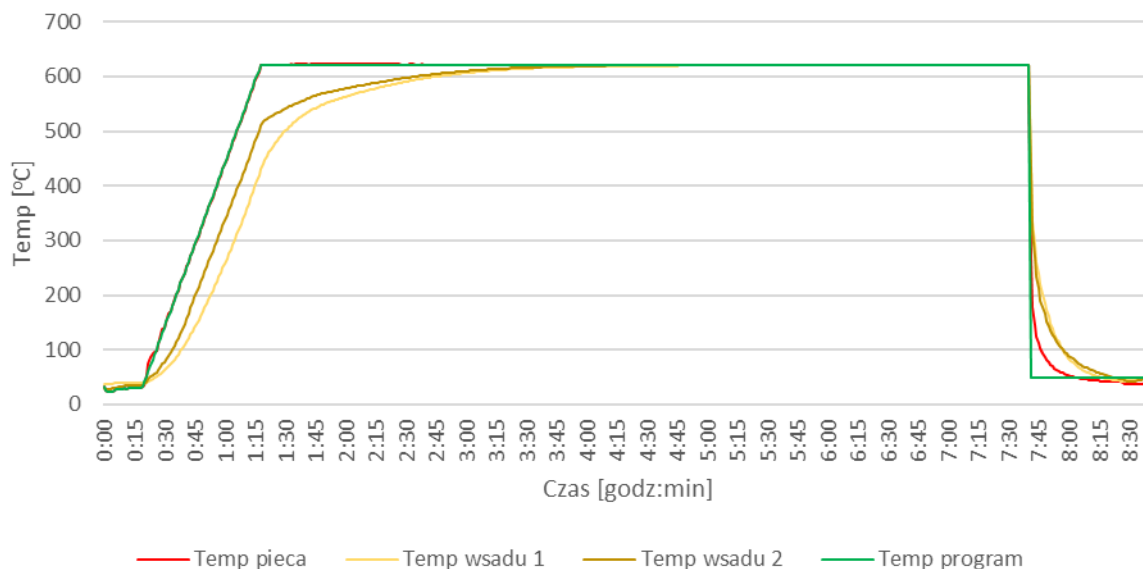
Do przygotowanego wsadu zamontowano termopary pomiarowe. Proces kontrolowany jest przez jedną termoparę tzw. wsadową. Następnie zmierzono punkt rosy według procedury wewnętrznej oraz wybrano program do danego etapu obróbki cieplnej. Po wykonaniu obróbki cieplnej rozładowano wsad oraz wykonano wykresy $T = f(t)$ (Rys. 107 - Rys. 110).



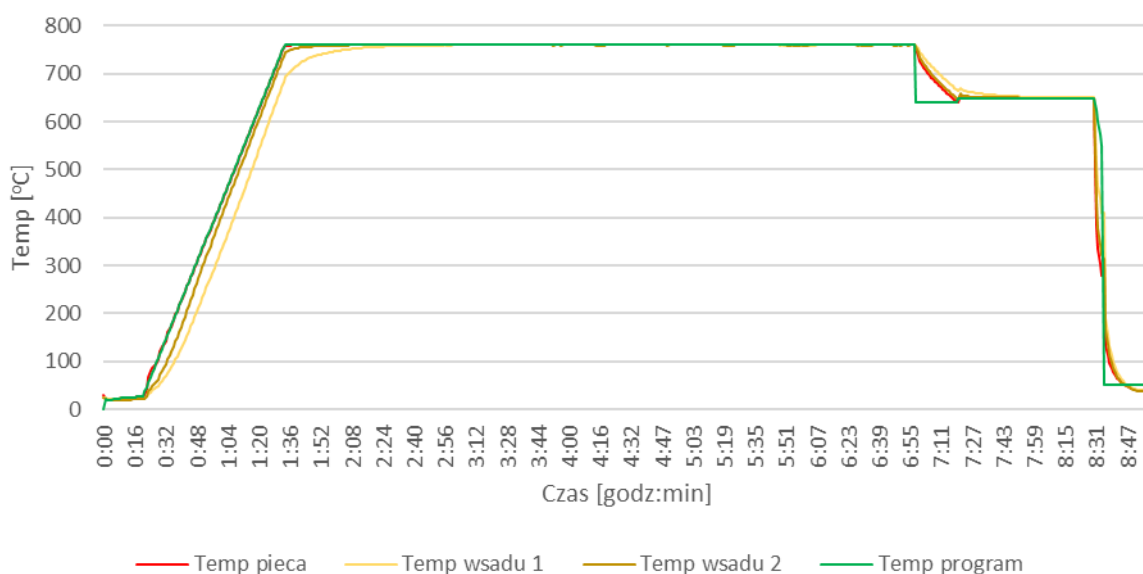
Rys. 107. Wykres $T = f(t)$ podczas przesycania złączy próbnych ze stali 17-4PH



Rys. 108. Wykres $T = f(t)$ podczas przesycania złączy próbnych z stopu Inconel 718



Rys. 109. Wykres $T = f(t)$ podczas starzenia złączy próbnych ze stali 17-4PH



Rys. 110. Wykres $T = f(t)$ podczas starzenia złączy próbnych z stopu Inconel 718

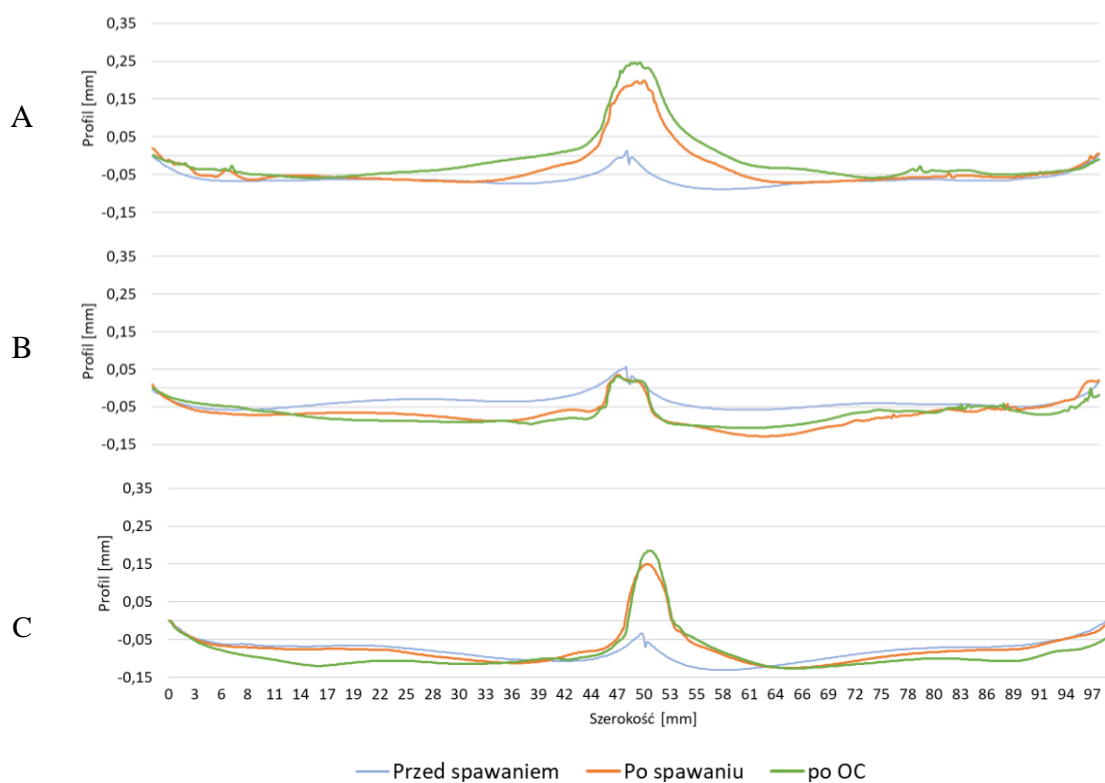
5.8 Pomiary próbnych złączy spawanych po obróbce cieplnej

Po obróbce cieplnej każde próbne złącze spawane poddano pomiarom z wykorzystaniem wysokościomierza, analogicznie jak przed i po spawaniu, w tych samych miejscach pomiarowych. W tabeli 23 przedstawiono wyniki pomiarów wysokości próbnych złączy spawanych po obróbce cieplnej.

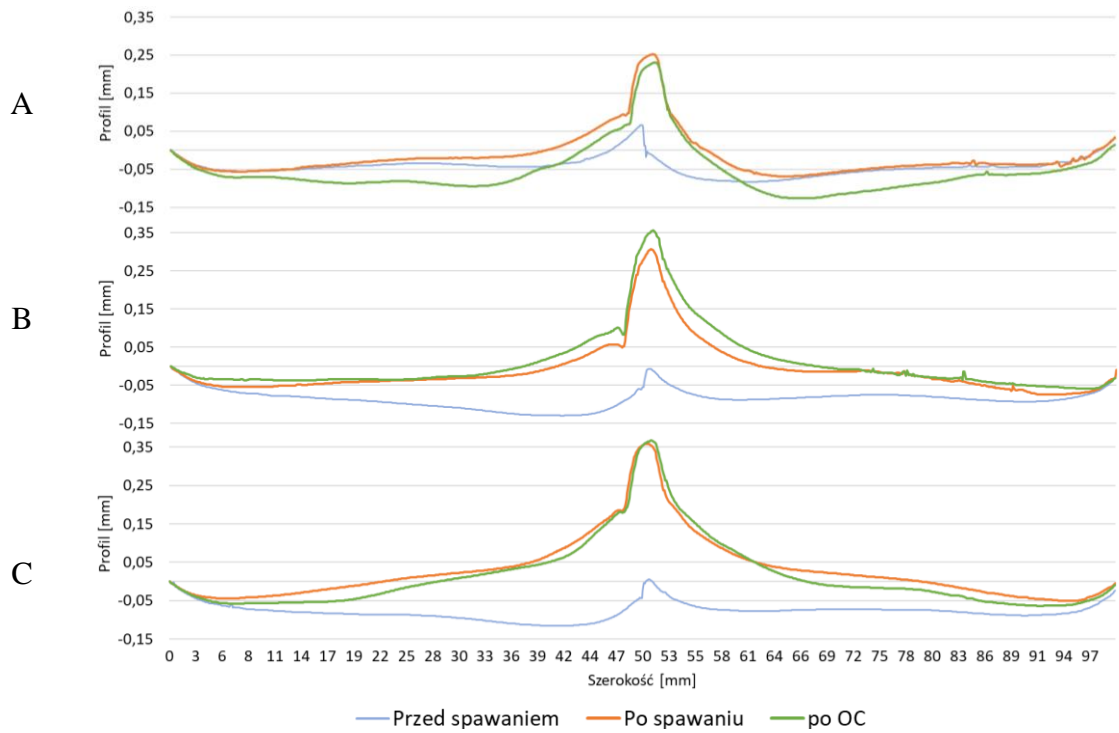
Tab. 23. Wysokość złączy próbnych po obróbce cieplnej

Oznaczenie złącza	A, mm	B, mm	C, mm	Średnia, mm
A.1	98,88	98,91	98,92	98,90
A.2	99,03	98,98	99,02	99,03
A.3	99,21	99,33	99,23	99,21
A.4	99,12	99,11	99,21	99,12
B.1	99,17	99,18	99,12	99,16
B.2	99,07	99,04	99,12	99,08
B.3	99,05	99,06	99,13	99,08

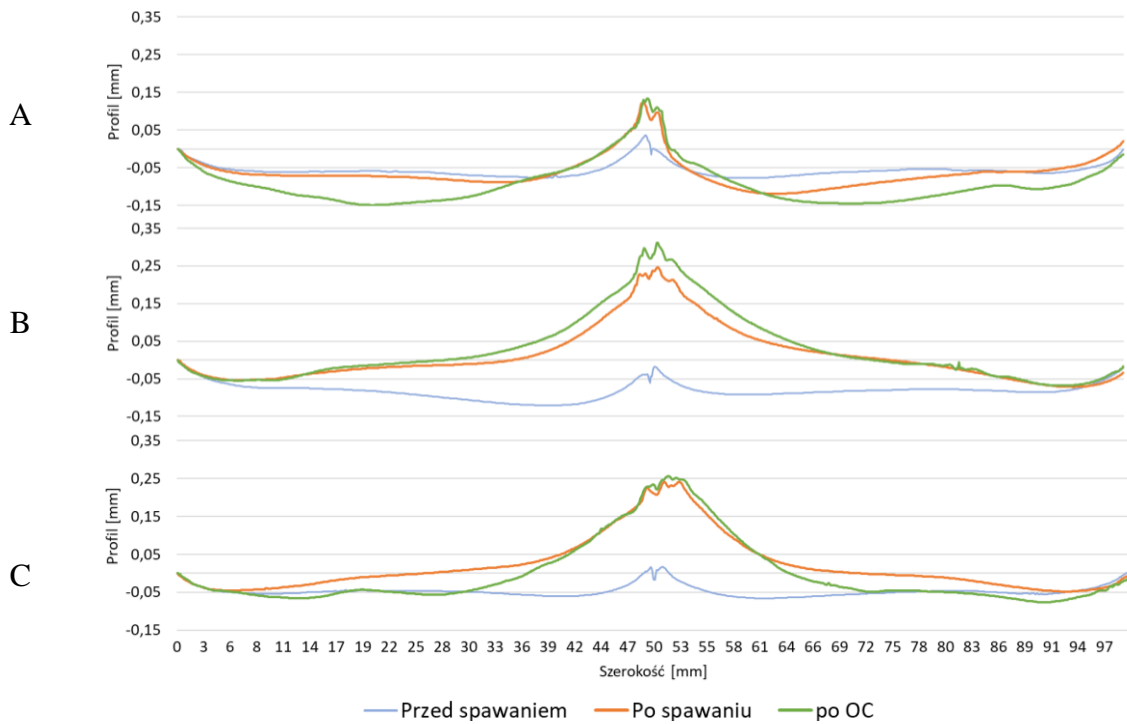
Następnie wykonano pomiary profilu próbnych złączy spawanych. Wykresy profili przed spawaniem, po spawaniu i po obróbce cieplnej przedstawiono na Rys. 111-117.



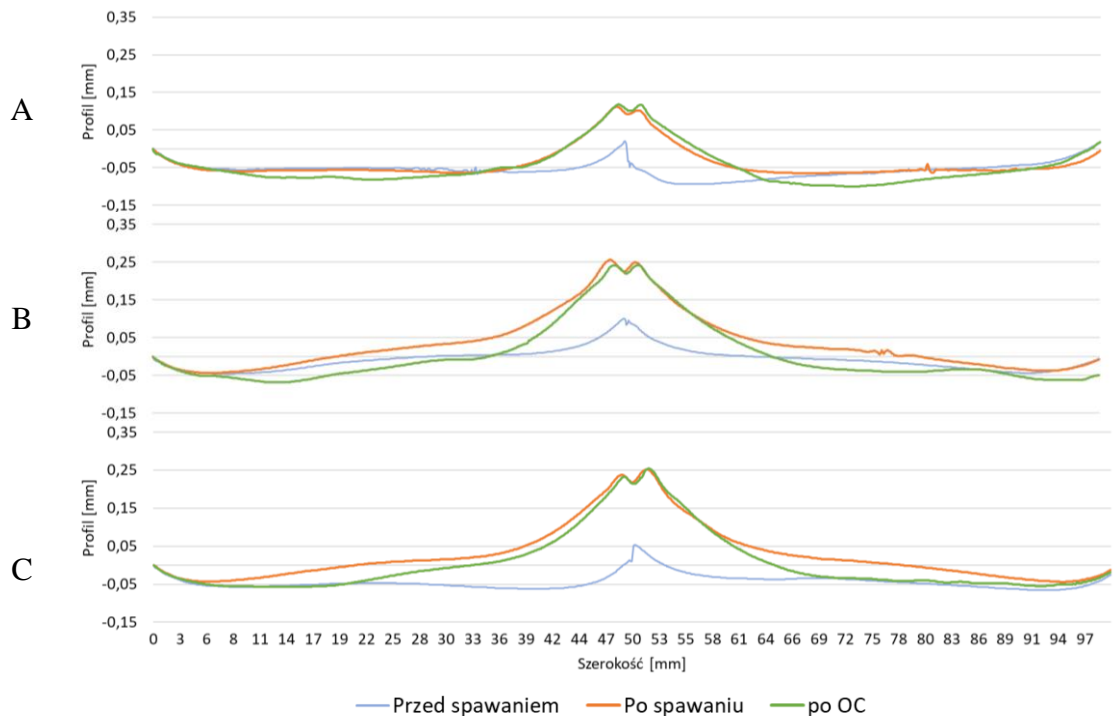
Rys. 111. Profile złącza próbnego A.1 na liniach pomiarowych A, B, C po obróbce cieplnej (z uwzględnieniem profili przed i po spawaniu)



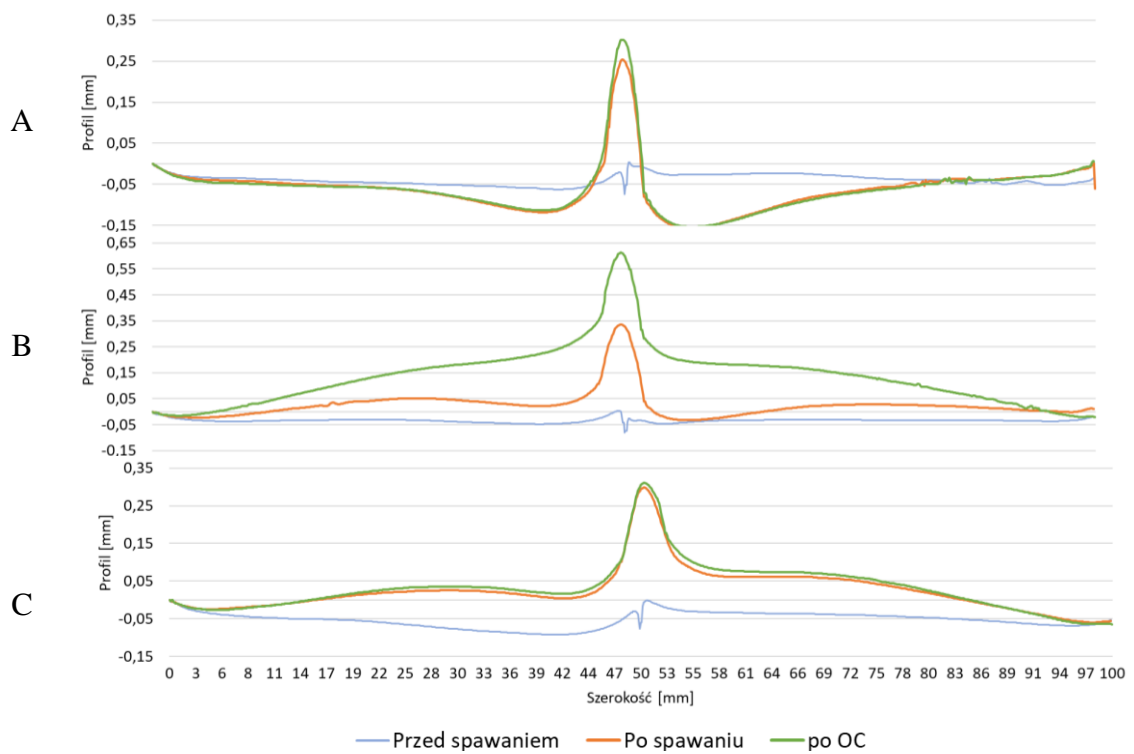
Rys. 112. Profile złącza próbnego A.2 na liniach pomiarowych A, B, C po obróbce cieplnej (z uwzględnieniem profili przed i po spawaniu)



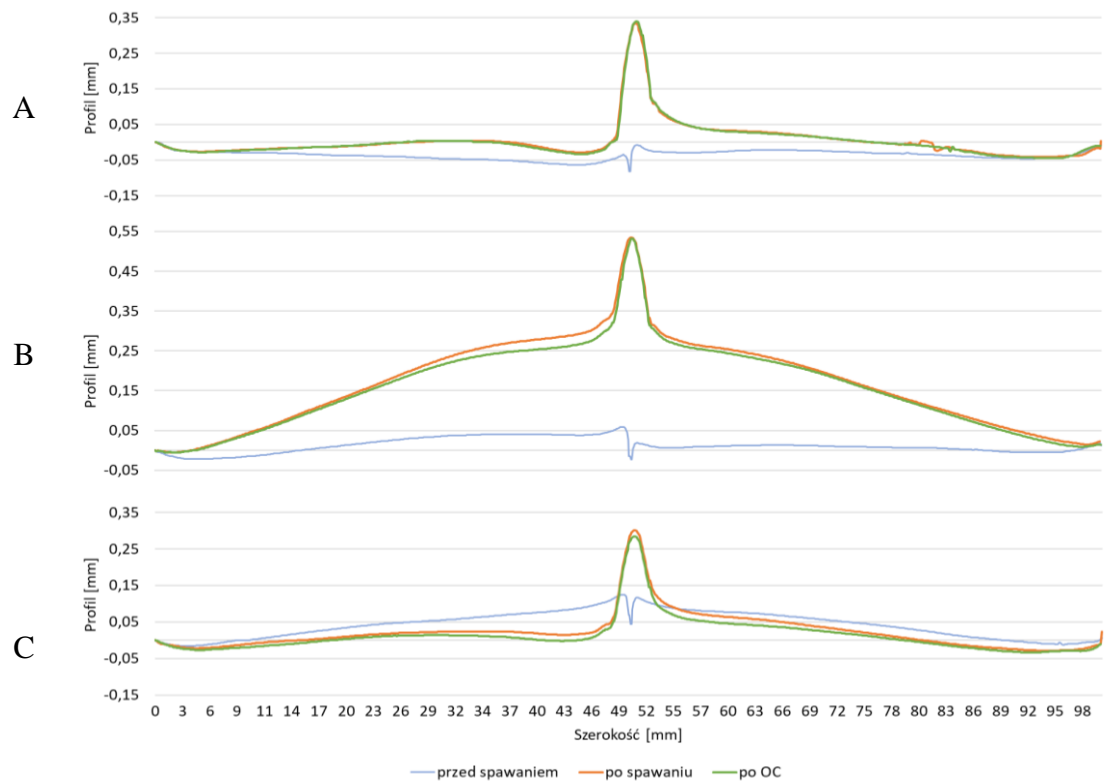
Rys. 113. Profile złącza próbnego A.3 na liniach pomiarowych A, B, C po obróbce cieplnej (z uwzględnieniem profili przed i po spawaniu)



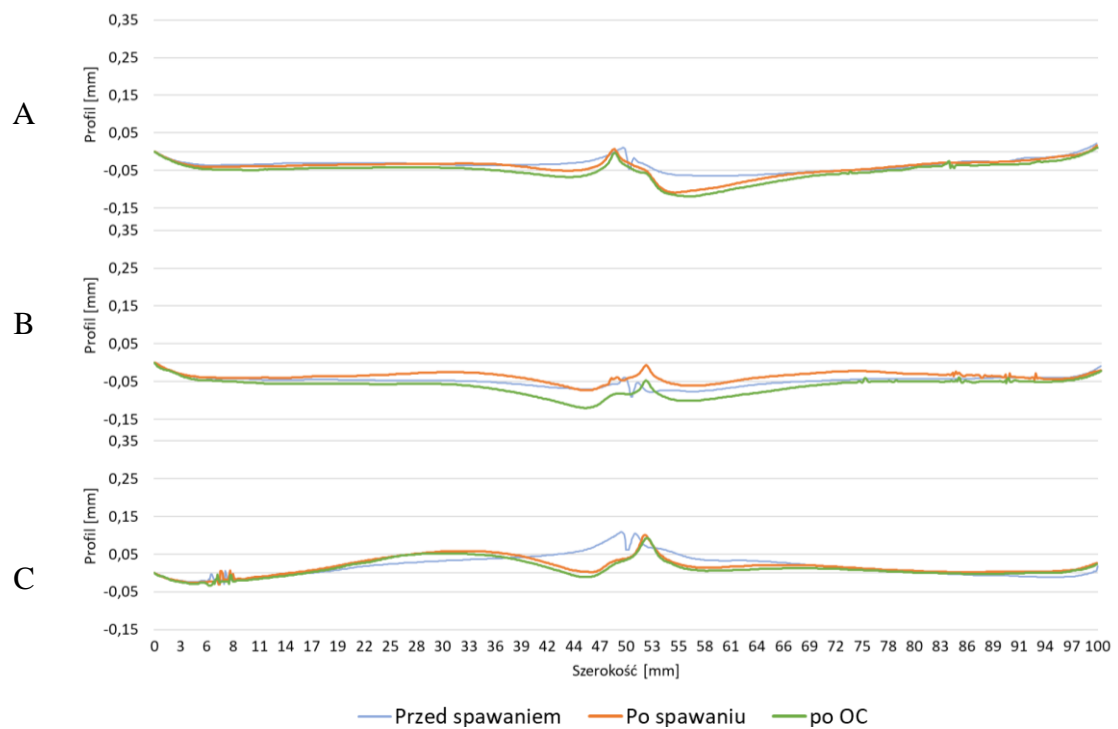
Rys. 114. Profile złącza próbnego A.4 na liniach pomiarowych A, B, C po obróbce cieplnej (z uwzględnieniem profili przed i po spawaniu)



Rys. 115. Profile złącza próbnego B.1 na liniach pomiarowych A, B, C po obróbce cieplnej (z uwzględnieniem profili przed i po spawaniu)



Rys. 116. Profile złącza próbnego B.2 na liniach pomiarowych A, B, C po obróbce cieplnej (z uwzględnieniem profili przed i po spawaniu)

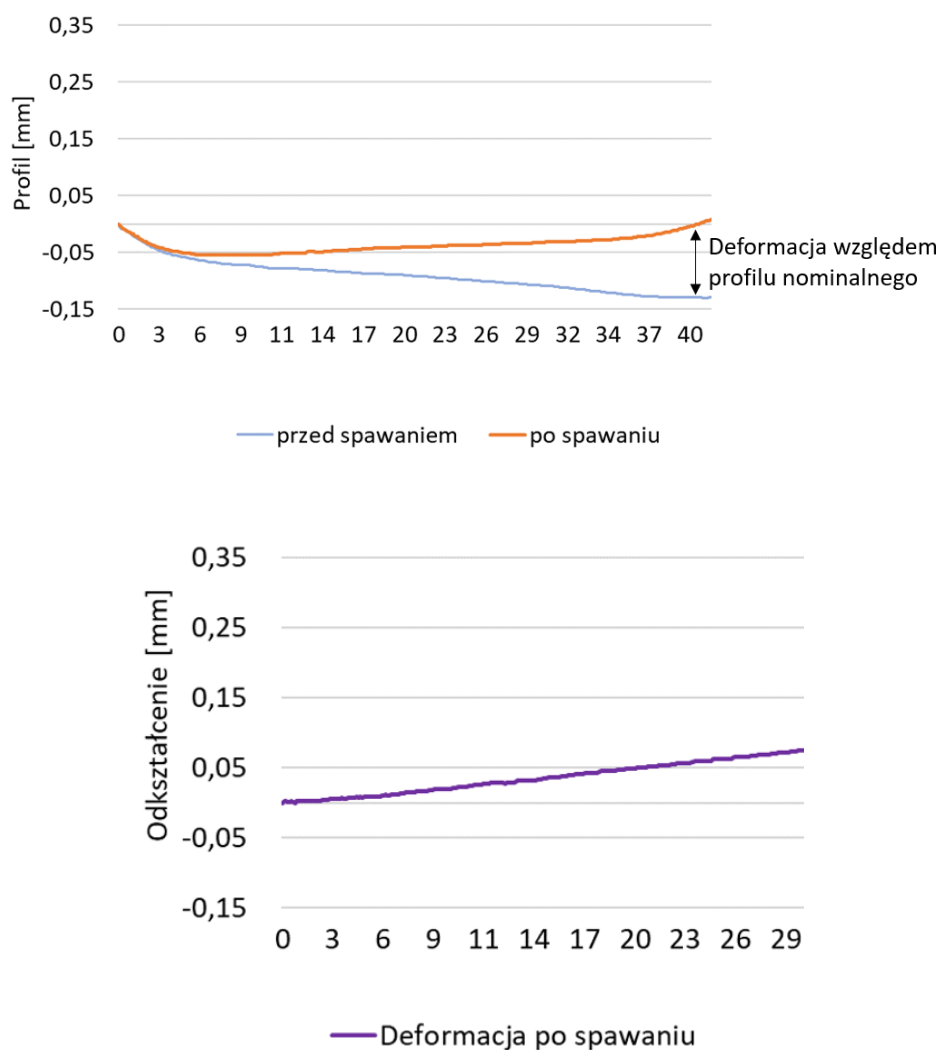


Rys. 117. Profile złącza próbnego B.3 na liniach pomiarowych A, B, C po obróbce cieplnej (z uwzględnieniem profili przed i po spawaniu)

5.9 Analiza deformacji spawalniczych próbnych złączy spawanych

5.9.1 Analiza stopnia odchylenia profilu od kształtu nominalnego

Aby przeanalizować stopień deformacji, którego miarą jest zmiana profilu po spawaniu, określono stopień odchylenia profilu od kształtu nominalnego (Rys. 118).



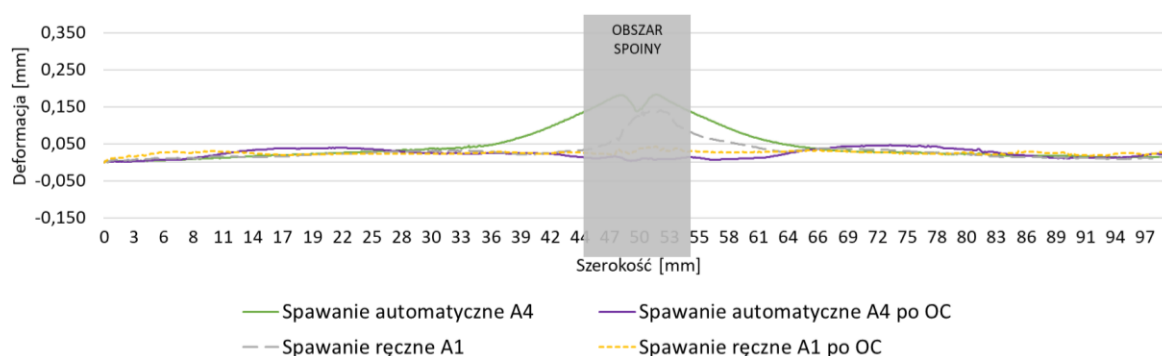
Rys. 118. Graficzne przedstawienie stopnia deformacji na przykładzie złącza próbnego A.2 w przekroju B po spawaniu

Za kształt nominalny przyjęto kształt złącza (profil) na wcześniejszym etapie wytwarzania. Dla złączy po spawaniu profil nominalny to profil mierzony w tym samym przekroju na etapie przed spawaniem. Dla złączy po obróbce cieplnej profil nominalny to profil mierzony w tym samym przekroju na etapie po spawaniu. Na tej podstawie określono stopień deformacji po spawaniu oraz stopień deformacji po obróbce cieplnej.

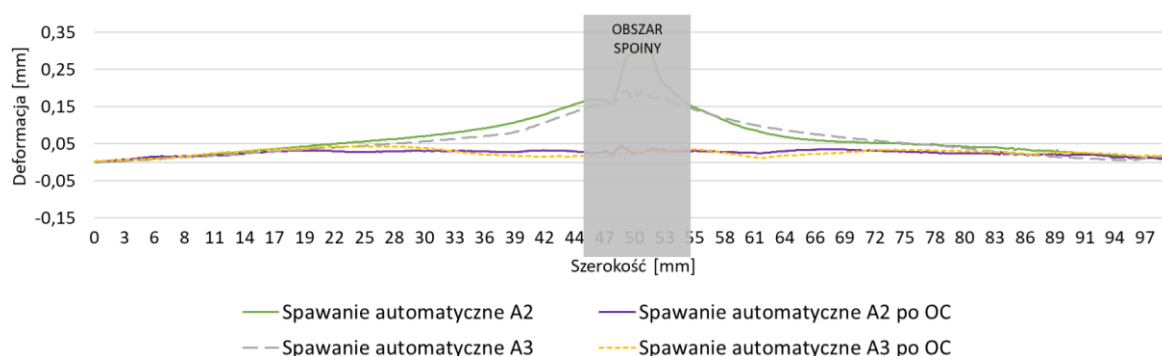
Analizując deformacje profili zgodnie z powyższym założeniem, wykonano szereg wykresów na podstawie wcześniej uzyskanych pomiarów profili.

Dla profili próbnych złączy spawanych obliczono średnie deformacje dla każdego złącza po spawaniu oraz po obróbce cieplnej. Określanie średniej deformacji polegało na obliczeniu wartości deformacji dla złącza we wszystkich 3 liniach pomiarowych A, B, C (jak na Rys. 118) a następnie obliczeniu wartości średniej dla tych przekroi. Obliczenia takie wykonano dla każdego złącza na etapie po spawaniu i po obróbce cieplnej.

Porównanie średnich deformacji próbnych złączy spawanych ze stali 17-4 PH (zmian profili) po spawaniu ręcznym i automatycznym przedstawiono na Rys. 119. Do porównania wykorzystano średni profil złącza spawanego automatycznie wg złącza próbnego A.4, natomiast dla spawania ręcznego wykorzystano złącze próbne A.1. Na wykresie szarym kolorem zaznaczono obszar spoiny (lico spoiny nie podlega analizie profilu), tak by ułatwić ocenę. Analogiczną analizę wykonano dla pozostałych złączy ze stali nierdzewnej 17-4PH tj. A2, oraz A3, spawanych automatycznie, które przedstawiono na Rys. 120.



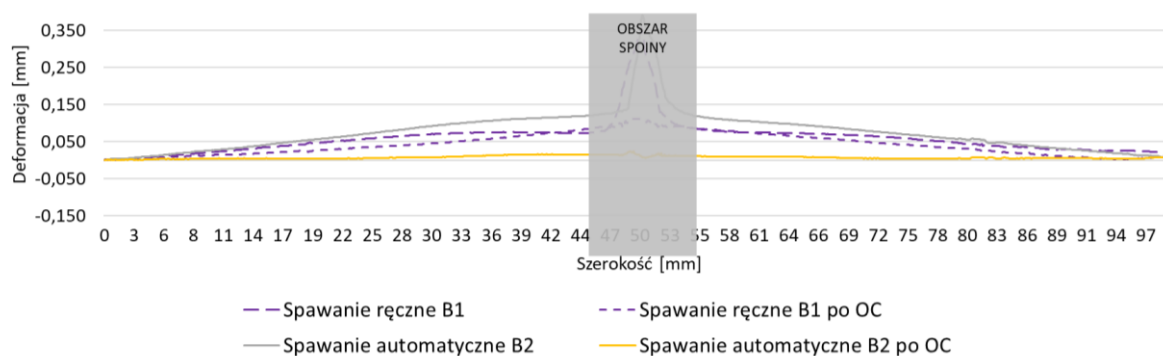
Rys. 119. Średnia wartość deformacji złącza ze stali 17-4PH spawanego ręcznie (złącze A.1) i automatycznie (złącze A.4), na etapie po spawaniu i po obróbce cieplnej



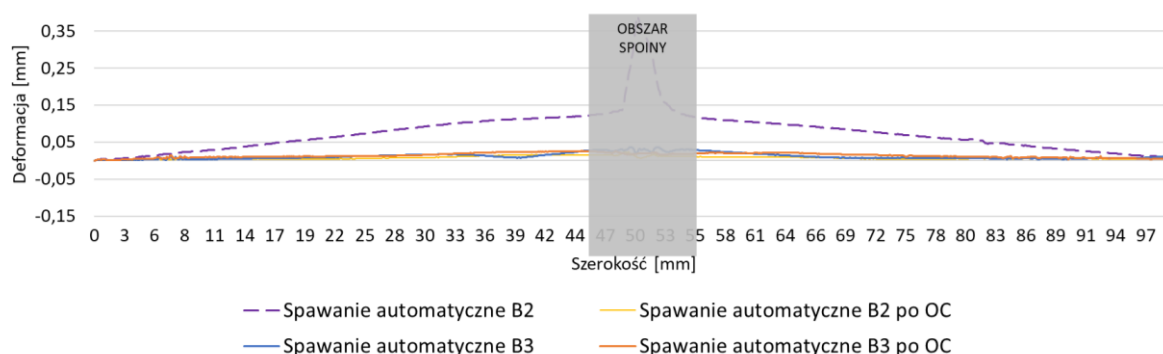
Rys. 120. Średnia wartość deformacji złącza ze stali 17-4PH spawanego automatycznie (złącze A.2) i automatycznie (złącze A.3), na etapie po spawaniu i po obróbce cieplnej

Analizując wykres na Rys. 119 można zauważyć, że średnia zmiana profilu po spawaniu jest mniejsza dla spawania ręcznego w obszarze SWC, natomiast poza obszarem SWC zmiany profilu dla spawania ręcznego i automatycznego są porównywalne. Po wykonaniu obróbki cieplnej, średnia deformacja profili uległa zmianie. Profil po spawaniu automatycznym zmienił się nieznacznie i równomiernie na całej długości, zaś profil złącza spawanego ręcznie po obróbce cieplnej uległ większym deformacjom w porównaniu do spawania automatycznego, głównie w obszarze SWC. Analizując wykres na Rys. 120 można stwierdzić, że średnie deformacje uzyskane po spawaniu wg konfiguracji A3 są nieznacznie mniejsze od średnich deformacji uzyskanych po spawaniu wg konfiguracji A2.

Analogiczną analizę wykonano dla złączy próbných ze stopu Inconel 718. Obliczono średnie wartości deformacji złączy po spawaniu oraz po obróbce cieplnej. Wyniki przedstawiono na Rys. 121 na przykładzie złącza B.2 dla spawania automatycznego oraz konfiguracji B.3 dla spawania ręcznego.



Rys. 121. Średnia wartość deformacji złącza ze stopu Inconel 718 spawanego ręcznie (złącze B.1) i automatycznie (złącze B.2), na etapie po spawaniu i po obróbce cieplnej



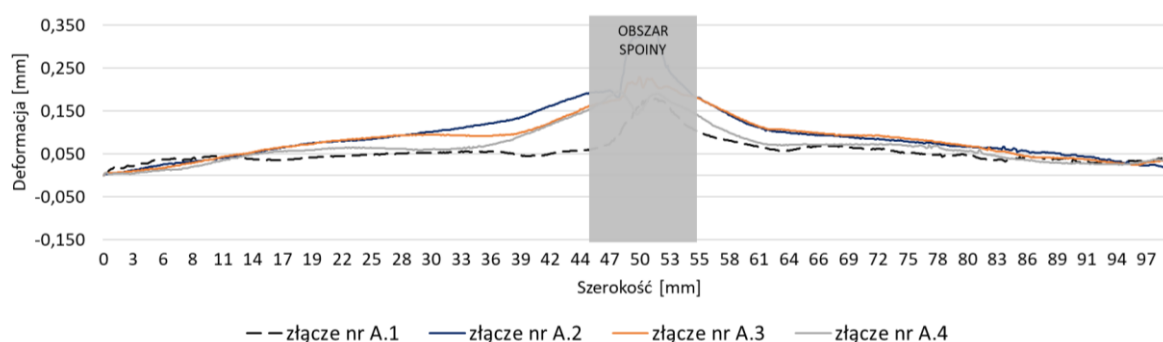
Rys. 122. Średnia wartość deformacji złącza ze stopu Inconel 718 spawanego automatycznie (złącze nr B.2) i automatycznie (złącze B.3), na etapie po spawaniu i po obróbce cieplnej

Na podstawie wykresu na Rys. 121 można stwierdzić, że średnia wartość deformacji (zmian profilu) po spawaniu automatycznym jest nieznacznie większa od deformacji dla spawania ręcznego dla warunków bezpośrednio po spawaniu. Po wykonaniu obróbki cieplnej średnia wartość deformacji złącza spawanego automatycznie wyniosła blisko 0, natomiast dla spawania ręcznego jest porównywalna z wartościami deformacji uzyskanych po spawaniu. Na podstawie rys 122, można potwierdzić że średni stopień deformacji po obróbce cieplnej dla złączy próbných wykonanych z Inconelu 718 spawanych automatycznie jest niewielki (bliski 0), oraz że deformacja dla złącza B3 po spawaniu jest nieznaczna, w porównaniu ze złączem konfiguracji B2.

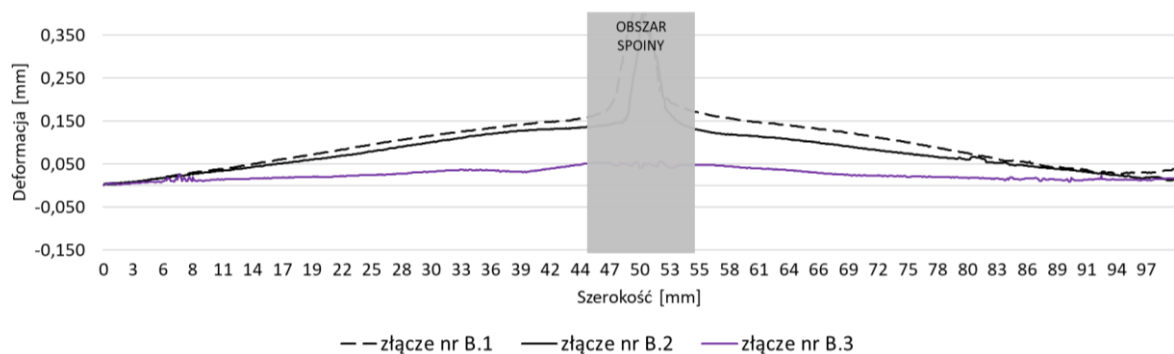
Następnie obliczono całkowite wartości deformacji dla każdej konfiguracji spawania. Całkowita wartość deformacji do suma wartości deformacji występujących po spawaniu i wartości deformacji występujących po obróbce cieplnej. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w formie wykresów, dla złączy wykonanych ze stali 17-4 PH na Rys. 123, a dla złączy wykonanych ze stopu Inconel 718 na Rys. 124.

Analizując wykres przedstawiony na Rys. 123, dotyczący deformacji złączy próbných ze stali 17-4 PH, wnioskować można że najmniejsze deformacje profilu uzyskano dla złącza próbnego A.1 (spawania ręcznego) i złącza A.4 (spawania automatycznego). Konfiguracje numer A.2 i A.3 charakteryzują się nieco większą zmiennością profilu.

Z kolei w przypadku stopu Inconel 718, najmniejsza wartość zmiany profilu wystąpiła podczas spawania złączy wg konfiguracji B.2. W przypadku tego materiału spawanie ręczne wprowadziło największe deformacje.



Rys. 123. Suma deformacji po spawaniu i obróbce cieplnej dla złączy próbných wykonanych ze stali 17-4 PH



Rys. 124. Suma deformacji po spawaniu i obróbce cieplnej dla złączy próbnych wykonanych ze stopu Inconel 718

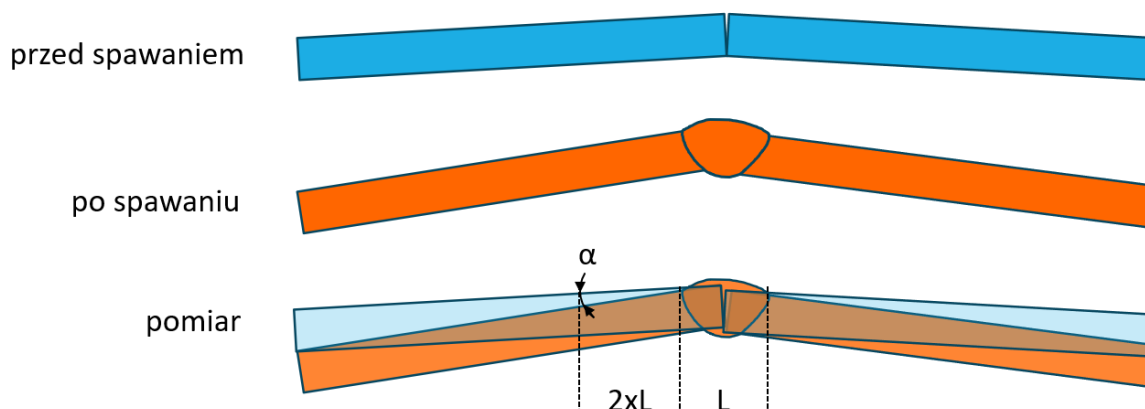
Na podstawie powyższej analizy profili, można stwierdzić że dla stali 17-4 PH poprzez opracowanie odpowiednich parametrów procesu spawania automatycznego można uzyskać zbliżone zmiany profili jak przy spawaniu ręcznym. Niewłaściwie dobrane parametry spawania mogą spowodować wystąpienie znacznych deformacji materiału.

Dla złączy próbnych wykonanych ze stopu Inconel 718 deformacje po spawaniu automatycznym są mniejsze niż przy spawaniu ręcznym.

Podczas analizy profili zauważono również, że zmiany kształtu złączy w przekrojach A, B, C są bardzo nieregularne dla procesu spawania wykonanego ręcznie. Natomiast profile wykonane metodą automatyczną cechują się równomiernym rozkładem zmian kształtu.

5.9.2 Analiza odkształcenia kąтового

Analizę deformacji spawalniczych wykonano w oparciu wyznaczenie wartości kąta odkształcenia α . Kąt deformacji α zdefiniowano na podstawie pomiaru kąta pomiędzy profilami złącza przed i po spawaniu. Metodologię obliczenia kąta deformacji przedstawiono na Rys. 125.



Rys. 125. Metodologia pomiaru kąta deformacji

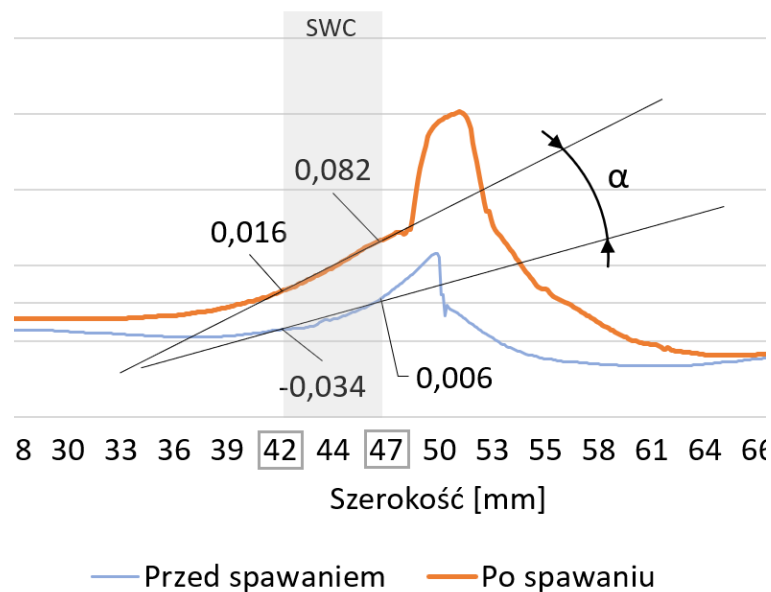
Przykład wyznaczenia wartości kąta deformacji dla próbnego złącza spawanego A.1 przedstawiono na Rys. 126. Znając współrzędne na osi X w pobliżu spoiny (oś spoiny przyjęto w odległości 50mm od krawędzi złącza, w tym przypadku współrzędne X to 42 i 47 mm od osi spoiny. Wartości osi X przedstawiono na Rys. 126) oraz wartości osi Y, został obliczony kąt pochylenia wyznaczonej linii przed spawaniem i po spawaniu. Następnie obliczono różnicę tych kątów. Uzyskana wartość to kąt deformacji α .

Wyniki pomiarów dla każdego złącza próbnego przedstawiono w Tab. 24.

Aby możliwe było porównanie energii liniowej spawania do deformacji kątowych, obliczono energię dla poszczególnych konfiguracji według wzoru (4).

$$E = \frac{U \cdot I}{v} \cdot \eta \text{ [kJ/mm]} \quad [4]$$

gdzie: E - energia liniowa spawania [kJ/mm], U - napięcie łuku [V], I - natężenie prądu [A], v - prędkość spawania [mm/s], η – współczynnik określający wydajność (sprawność), zależna od metody spawania [%]



Rys. 126. Przykład wyznaczenia wartości kąta deformacji dla próbnego złącza spawanego A.1

Tab. 24. Wartości kąta deformacji α w próbnym złączach spawanych

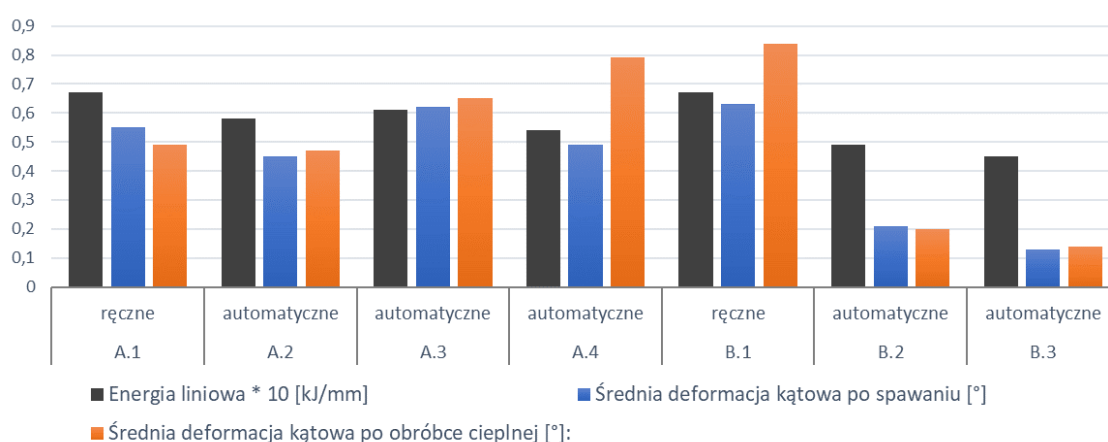
Oznaczenie złącza próbnego		A.1	A.2	A.3	A.4	B.1	B.2	B.3
Materiał		17-4PH				Inconel 718		
Metoda spawania:		ręczna	automatyczna			ręczna	automatyczna	
Po spawaniu	A	0,82	0,37	0,34	0,54	0,61	0,26	0,15
	B	0,26	0,43	0,72	0,30	0,74	0,32	0,05
	C	0,58	0,56	0,79	0,63	0,54	0,05	0,19
Średnie po spawaniu		0,55	0,45	0,62	0,49	0,63	0,21	0,13
Po OC	A	0,50	0,19	0,37	0,58	0,74	0,15	0,22
	B	0,29	0,56	0,68	0,90	1,25	0,38	0,05
	C	0,69	0,66	0,89	0,89	0,54	0,06	0,15
Średnie po OC		0,49	0,47	0,65	0,79	0,84	0,20	0,14

Wartość obliczonej energii liniowej dla każdego próbnego złącza spawanego, wraz ze średnią wartością deformacji kątowej po spawaniu i po obróbce cieplnej przedstawiono w Tab. 25. Wartość energii liniowej dla spawania ręcznego w dużym stopniu zależy od prowadzenia uchwytu i natężenia prądu (spawacza), dlatego wartości dla spawania ręcznego należy traktować jako przybliżone.

Tab. 25. Energia liniowa oraz średnia wartość deformacji kątowej próbnych złączy spawanych

Oznaczenie złącza próbnego	A.1	A.2	A.3	A.4	B.1	B.2	B.3
Material	17-4PH				Inconel 718		
Metoda spawania	ręczna	automatyczna			ręczna	automatyczna	
Energia liniowa [kJ/mm]	0,067	0,058	0,061	0,054	0,067	0,049	0,045
Średnia deformacja kątowa po spawaniu [°]	0,55	0,45	0,62	0,49	0,63	0,21	0,13
Średnia deformacja kątowa po obróbce cieplnej [°]	0,49	0,47	0,65	0,79	0,84	0,20	0,14

Wartości z Tab. 25 przedstawiono w formie wykresu na Rys. 127.



Rys. 127. Porównanie energii liniowej procesu do średnich wartości odkształceń kątowych

Uzyskane wyniki wskazują, że najmniejsze deformacje kątowe wykazuje próbne złącze spawane A.2. Dla tego złącza deformacje kątowe są najmniejsze zarówno po spawaniu, jak i po obróbce cieplnej.

Automatyczne spawanie metodą TIG z największą energią liniową, czyli złącze próbne A.3, wywołuje największe odkształcenie kątowe. Dla złącza A.3, deformacje kątowe są większe od deformacji kątowej powstającej po procesie spawania ręcznego (A.1).

Dla złącza A.4 deformacja kątowa po spawaniu jest niewielka, lecz po obróbce cieplnej znacznie wzrasta. Konfiguracja A.4 to spawanie bez materiału dodatkowego. Przypuszczać można, że spawanie bez materiału dodatkowego nie powoduje deformacji kątowych (spoina jest symetryczna i nie ma wysokiego lica spoiny, które kurcząc się powoduje wygięcie materiału), jednak zlokalizowane w spoinie naprężenia wewnętrzne ujawniają się w trakcie obróbki cieplnej, co prowadzi do deformacji złącza.

Deformację kątową powstającą po spawaniu ręcznym, czyli złącze A.1, można zaklasyfikować pomiędzy złączem A.2 i A.3, które są spawane automatycznie.

Na podstawie powyższego, można stwierdzić że metodą spawania automatycznego można uzyskać mniejsze odkształcenia kątowe złączy spawanych niż przy metodzie ręcznej, jednak pod warunkiem odpowiedniego doboru parametrów spawania.

Dla stopu Inconel 718 metoda spawania ręcznego spowodowała największe deformacje kątowe (złącze B.1). Zastosowanie spawania automatycznego znacznie zmniejsza odkształcenia kątowe. Dodatkowo dla Inconelu 718 parametry spawania automatycznego mają mniejszy wpływ na ostateczną deformację, niż przy spawaniu stali 17-4 PH. Nie bez znaczenia w tym przypadku są różne wartości właściwości materiałowych stopu niklu w porównaniu do stali, między innymi współczynnika rozszerzalności cieplnej, modułu Younga, czy granicy plastyczności.

5.9.3 Analiza skurczu poprzecznego

Po spawaniu i obróbce cieplnej wystąpiły nie tylko odkształcenia kątowe, ale także skurcz poprzeczny spoiny. Wartość skurczu można określić porównując szerokość złącza przed spawaniem do jego szerokości po spawaniu oraz szerokość złącza po spawaniu do szerokości złącza po obróbce cieplnej. Znając szerokości złączy, określone w Tab. 13, Tab. 17 oraz Tab. 23 na poszczególnych etapach wytwarzania złączy spawanych, obliczono wartości skurczu poprzecznego dla każdej ich konfiguracji.

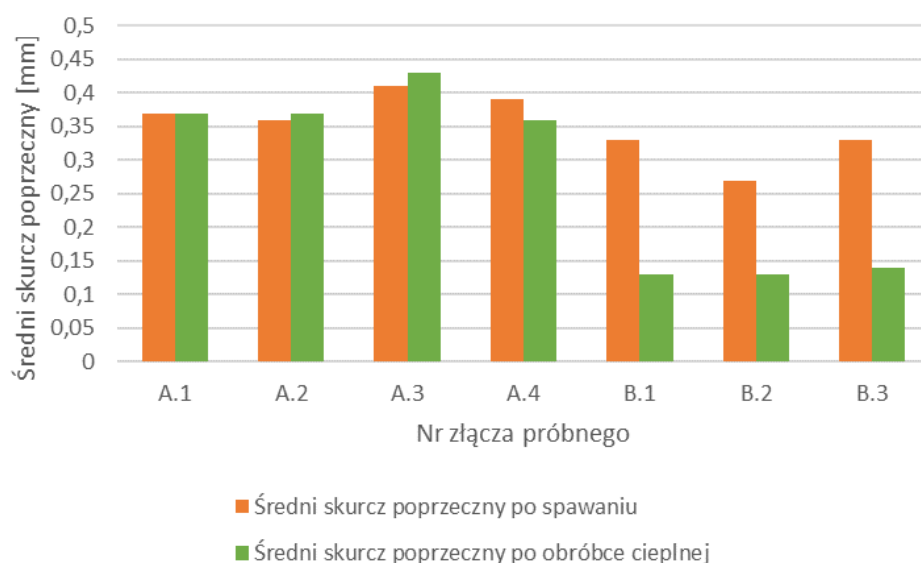
Wyniki obliczeń skurczu poprzecznego po spawaniu i po obróbce cieplnej przedstawiono w Tab. 26 i Tab. 27. Wyniki te przedstawiono również w formie graficznej na Rys. 128.

Tab. 26. Wartość skurczu poprzecznego złączy próbnych po spawaniu

Oznaczenie złącza	A, mm	B, mm	C, mm	Średnia, mm
A.1	0,37	0,33	0,41	0,37
A.2	0,39	0,34	0,34	0,36
A.3	0,41	0,43	0,39	0,41
A.4	0,39	0,39	0,38	0,39
B.1	0,31	0,31	0,36	0,33
B.2	0,30	0,25	0,27	0,27
B.3	0,33	0,31	0,35	0,33

Tab. 27 Wartość skurczu poprzecznego złączy próbnych po obróbce cieplnej

Oznaczenie złącza	A, mm	B, mm	C, mm	Średnia, mm
A.1	0,38	0,37	0,35	0,37
A.2	0,35	0,39	0,38	0,37
A.3	0,44	0,42	0,44	0,43
A.4	0,35	0,39	0,35	0,36
B.1	0,13	0,13	0,12	0,13
B.2	0,08	0,11	0,20	0,13
B.3	0,14	0,14	0,13	0,14



Rys. 128. Wartości średniego skurczu poprzecznego po spawaniu i po obróbce cieplnej

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że skurcz poprzeczny spoin dla złączy próbnych z stali 17-4PH przekracza 0,35 mm po spawaniu oraz po obróbce cieplnej. Największy skurcz poprzeczny występuje dla konfiguracji A.3 (spawanie ze zwiększoną energią liniową). Skurcz dla konfiguracji A.1, A.2, A.4 jest porównywalny.

Dla złączy próbnych ze stopu Inconel 718, największy skurcz poprzeczny po spawaniu występuje dla konfiguracji B.1 i B.3. Natomiast po obróbce cieplnej skurcz poprzeczny jest porównywalny dla wszystkich złączy z tego materiału.

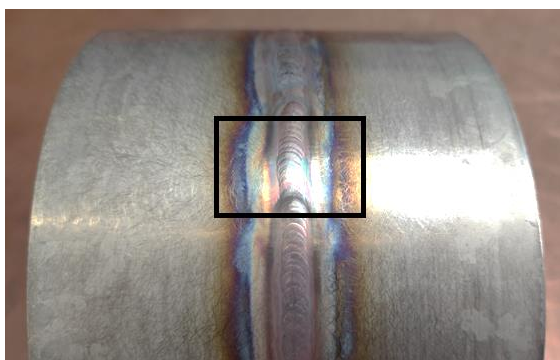
Wartości skurczu poprzecznego po obróbce cieplnej dla stopu Inconel 718 są około trzykrotnie mniejsze od wartości skurczu poprzecznego dla stali 17-4 PH. Oznacza to, że obróbka cieplna ma znacznie mniejszy wpływ na skurcz poprzeczny spoin ze stopu Inconel 718, niż dla stali 17-4 PH.

5.10 Badania niszczące złączy spawanych

5.10.1 Badanie metalograficzne

Badania metalograficzne, mające na celu ocenę makro- i mikrostruktury obszaru złącza spawanego, a zwłaszcza wpływu rodzaju procesu spawania (ręcznie lub automatycznie), wykonano na zglądach metalograficznych przygotowanych z próbek pobranych z złączy spawanych. Badania te wykonano dla złączy po procesie spawania i dla złączy po obróbce cieplnej.

Miejsce pobierania próbek do przygotowania zglądów metalograficznych przedstawiono na Rys. 129. Z każdego złącza spawanego zostały wycięte fragmenty spoiny wraz z przyległym do niej obszarem o wymiarach 20x20 mm. Proces ciecicia realizowano z wykorzystaniem przecinarki laboratoryjnej firmy Struers. Następnie wykonano zglądy metalograficzne, które trawiono odczynnikami Kalling'a w czasie 5 s (Rys. 130).



Rys. 129. Miejsce pobierania próbek do przygotowania zglądów metalograficznych



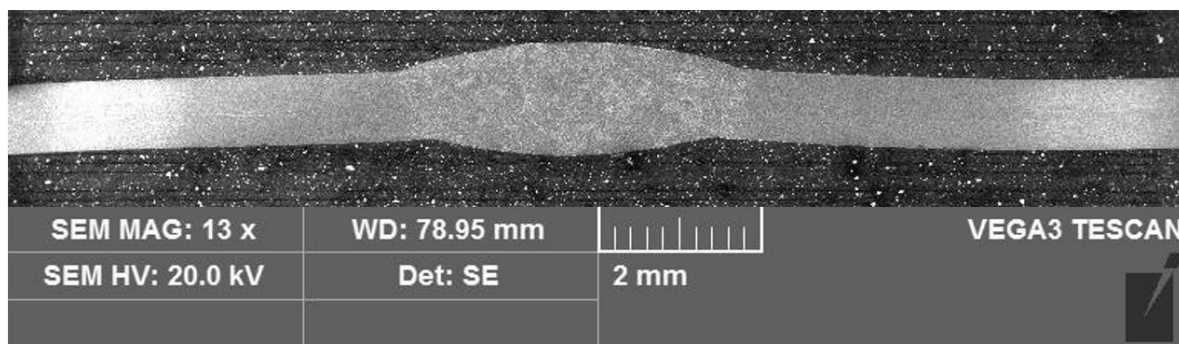
Rys. 130. Widok przygotowanego zglądu metalograficznego do obserwacji mikrostruktury

Obserwację mikrostruktury wykonano z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego VEGA z przystawką do mikroanalizy składu chemicznego INCA X-ACT (OXFORD), który jest na wyposażeniu laboratorium metalograficznego Katedry Odlewnictwa i Spawalnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

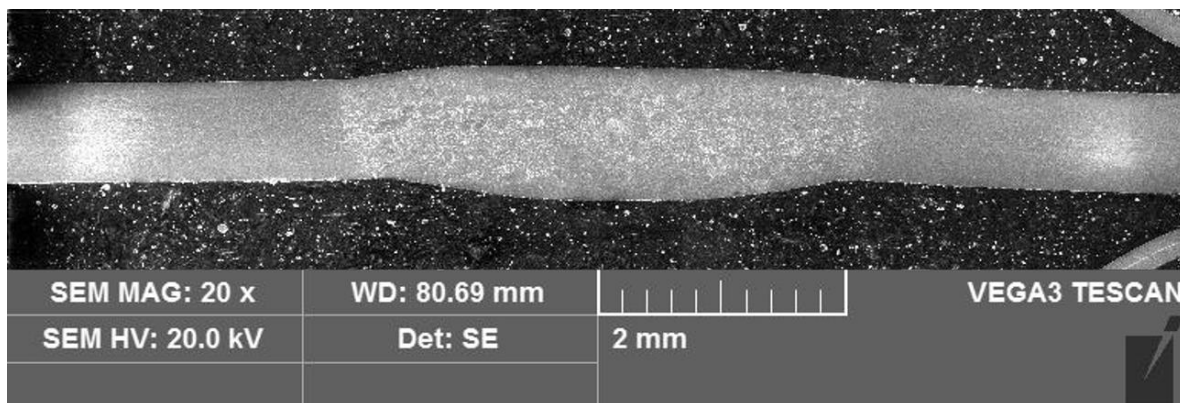
Obserwację mikrostruktury wykonano dla dwóch wybranych wariantów z każdego rodzaju złącza spawanego. W przypadku złączy spawanych wykonanych ze stali 17-4PH analizowano warianty A.1 (spawanie ręczne) oraz A.2 (spawanie automatyczne), natomiast dla złączy ze stopu Inconel 718 mikrostrukturę analizowano na próbnych złączach spawanych B.1 (spawanie ręczne) oraz B.3 (spawanie automatyczne).

Badania metalograficzne próbnych złączy spawanych ze stali 17-4PH

Makrostrukturę obszaru złącza spawanego ręcznie A.1 przedstawiono na Rys. 131, natomiast makrostrukturę obszaru złącza spawanego automatycznie A2 przedstawiono na Rys. 132.

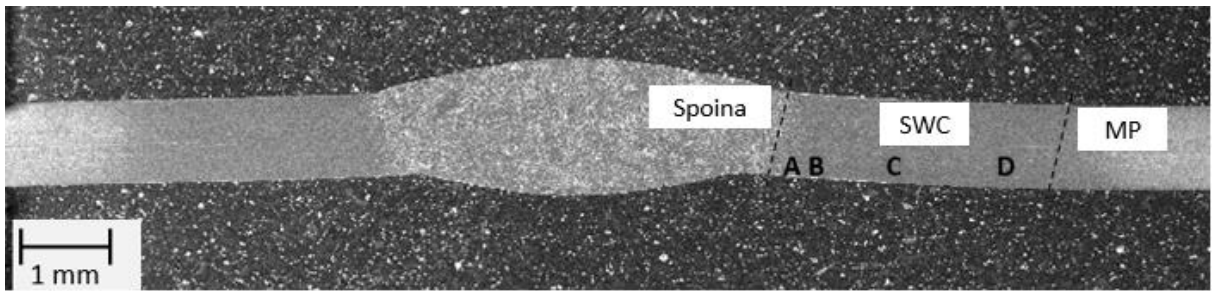


Rys. 131. Makrostruktura złącza spawanego ręcznie ze stali 17-4 PH

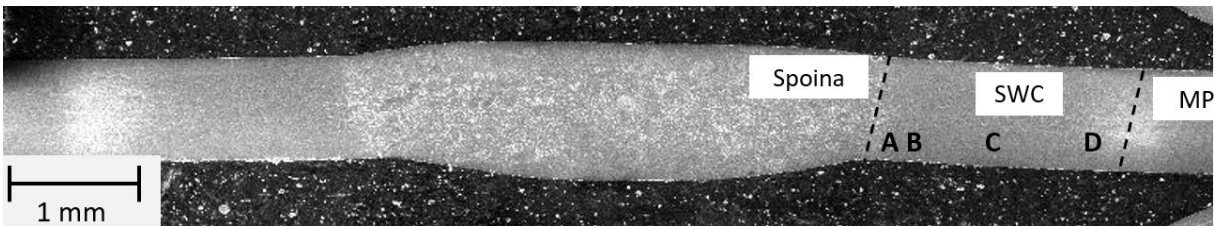


Rys. 132. Makrostruktura złącza spawanego automatycznie ze stali 17-4 PH

Następnie po analizie makrostruktury określano i oznaczono poszczególne obszary złącza spawanego (Rys. 133 dla złącza spawanego ręcznie, oraz Rys. 134 dla złącza spawanego automatycznie).

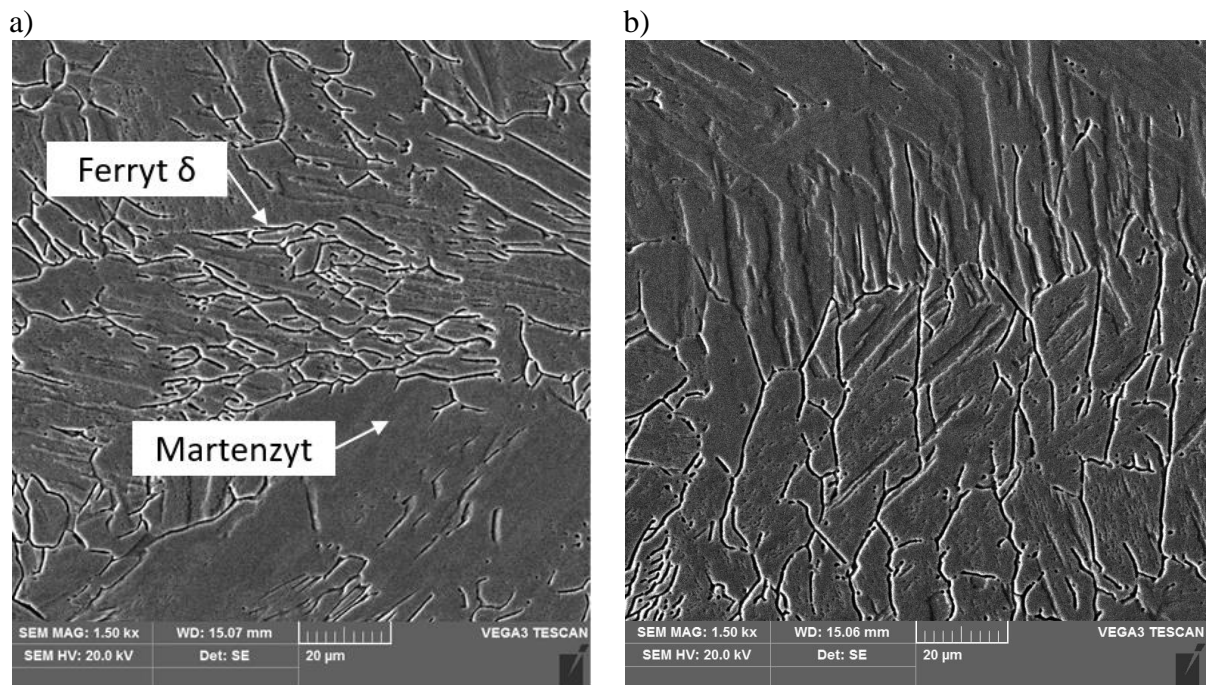


Rys. 133. Makrostruktura złącza ze stali 17-4 PH spawanego ręcznie z oznaczonymi jego obszarami

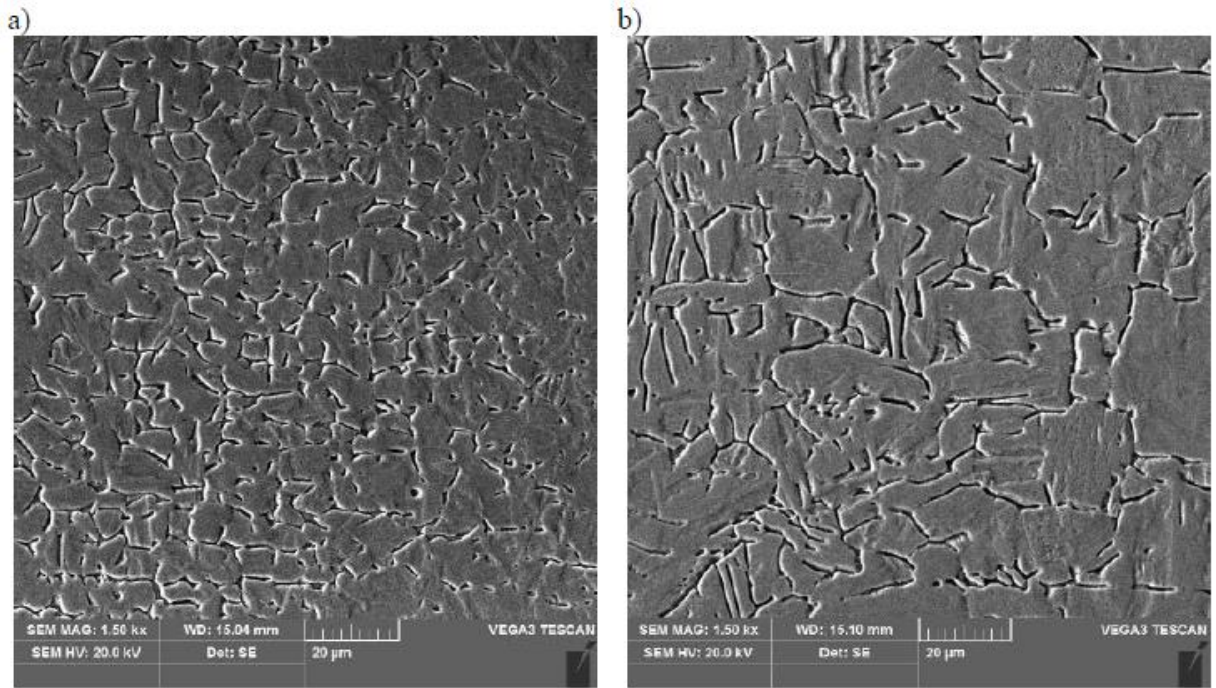


Rys. 134. Makrostruktura złącza ze stali 17-4 PH spawanego automatycznie z oznaczonymi jego obszarami

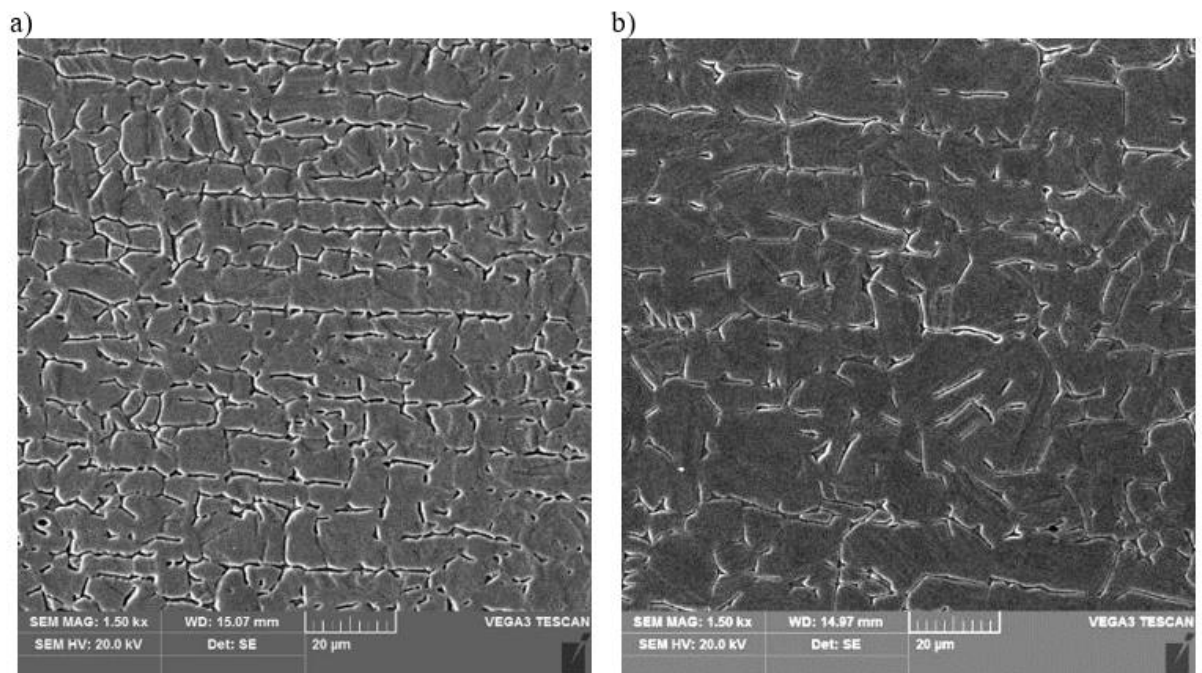
W oznaczonych obszarach złącza spawanego wykonano zdjęcia ich mikrostruktury, które przedstawiono na Rys. 135 – 140.



Rys. 135. Mikrostruktura spoiny złącza spawanego automatycznie (a) i ręcznie (b)

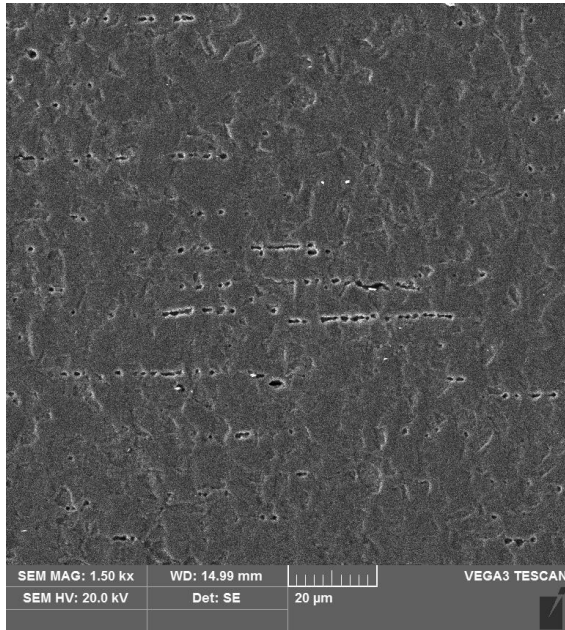


Rys. 136. Mikrostruktura SWC obszaru A złącza spawanego automatycznie (a) i ręcznie (b)

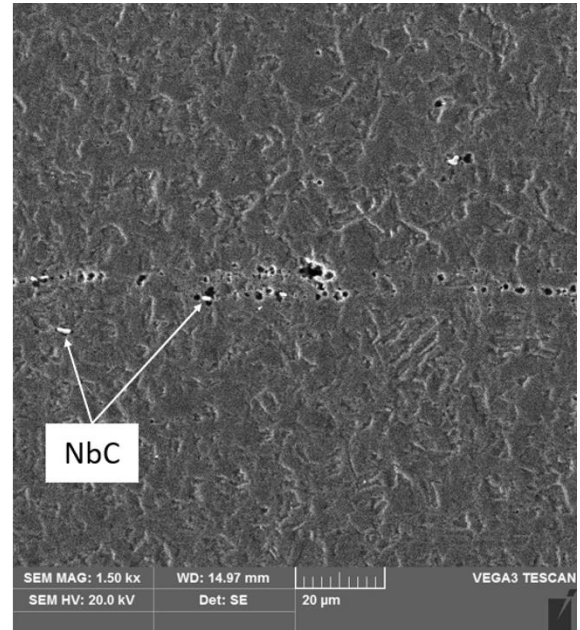


Rys. 137. Mikrostruktura SWC obszaru B złącza spawanego automatycznie (a) i ręcznie (b)

a)

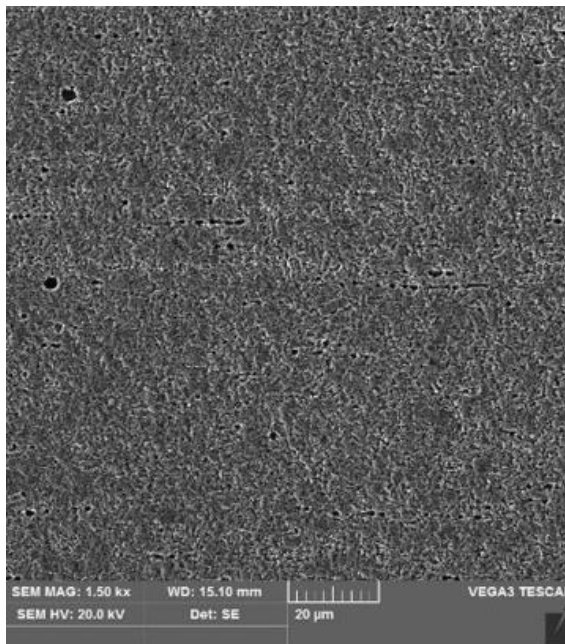


b)

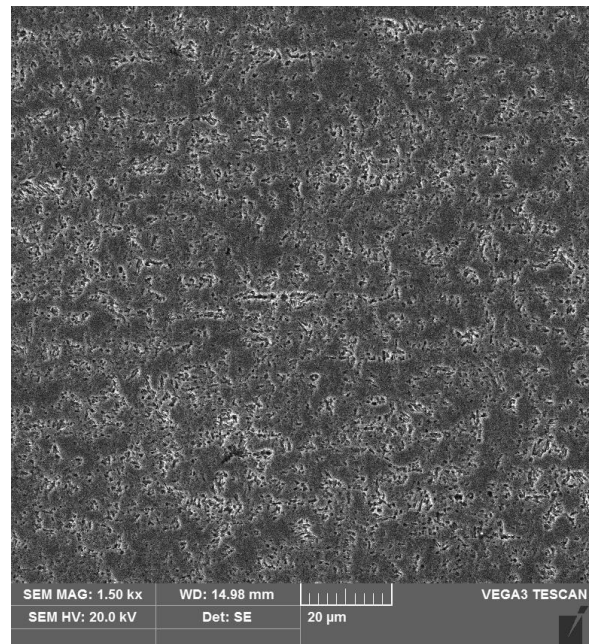


Rys. 138. Mikrostruktura SWC obszaru C złącza spawanego automatycznie (a) i ręcznie (b)

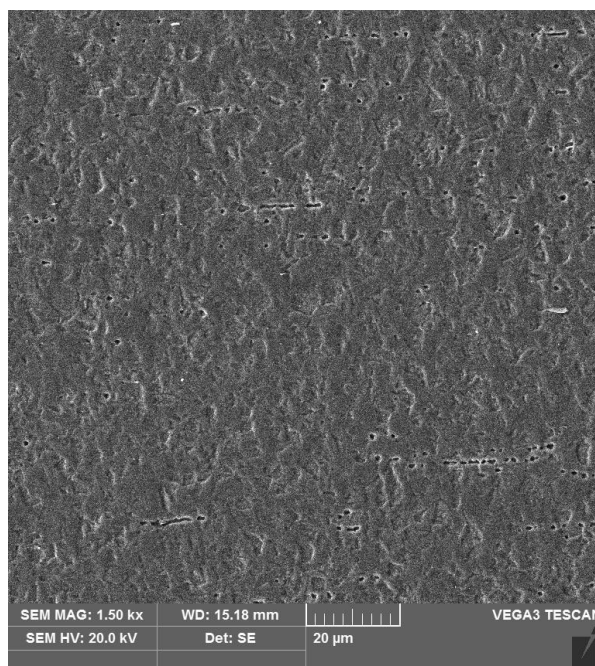
a)



b)



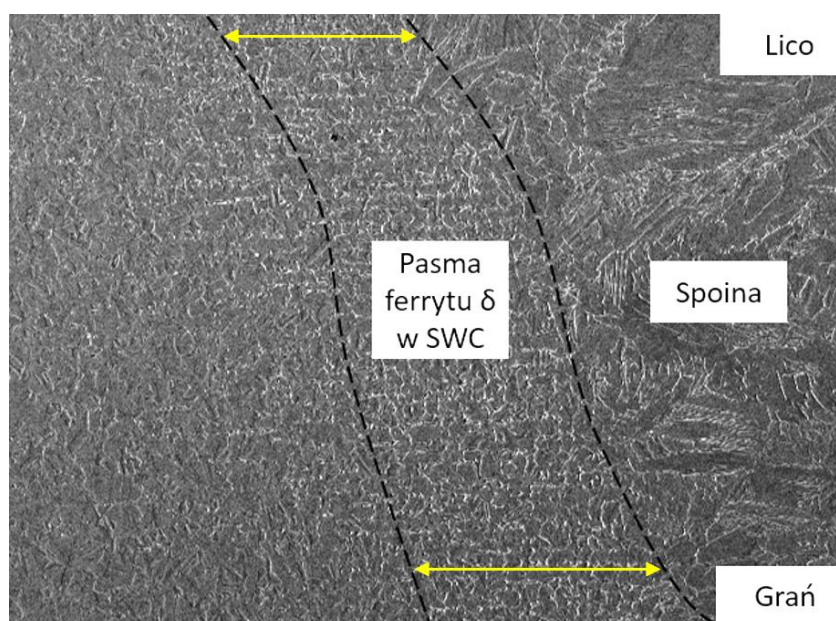
Rys. 139. Mikrostruktura SWC obszaru D złącza spawanego automatycznie (a) i ręcznie (b)



Rys. 140. Mikrostruktura SEM materiału rodzimego złącza spawanego automatycznie (a) i ręcznie (b)

Na podstawie obrazów SEM stwierdzono, że spoina, zarówno w złączy spawanym ręcznie, jak i automatycznie, charakteryzuje się dendrytyczną mikrostrukturą, zawierającą ferryt δ + martenzyt (Rys. 135). Poza spoiną, w strefie wpływu ciepła (SWC) można wyróżnić cztery obszary (Rys. 133). Widać wyraźnie, że mikrostruktura w strefie wpływu ciepła zależy od warunków nagrzewania i chłodzenia podczas procesu spawania. W strefie tej występują cztery obszary (A, B, C i D). Najwyższa temperatura występuje w pobliżu linii spoiny i wraz z odległością od niej maleje. W częściowo stopionej strefie obecne jest ferryt δ o grubych ziarnach w obszarze A (Rys. 136). W obszarze B, prostopadle do linii wtopienia, ferryt δ tworzy się wzdłuż granic ziaren austenitu pierwotnego (Rys. 137). W strefie C, na granicach ziaren występują nierozpuszczone węgliki niobu (Rys. 138).

Występujące wzdłuż linii wtopienia pasma ferrytu δ są dłuższe od strony grani niż od strony lica spoiny, co przedstawiono na Rys. 141. Szybkie chłodzenie w sąsiedztwie strefy stopienia spoiny hamuje dyfuzję transformacji ferrytu δ w austenit. Oprzyrządowanie spawalnicze od strony grani wykonane jest z miedzi. Zapewnia to większą szybkość chłodzenia, co może wyjaśnić wzrost ilości ferrytu δ w obszarze A-B od strony grani.



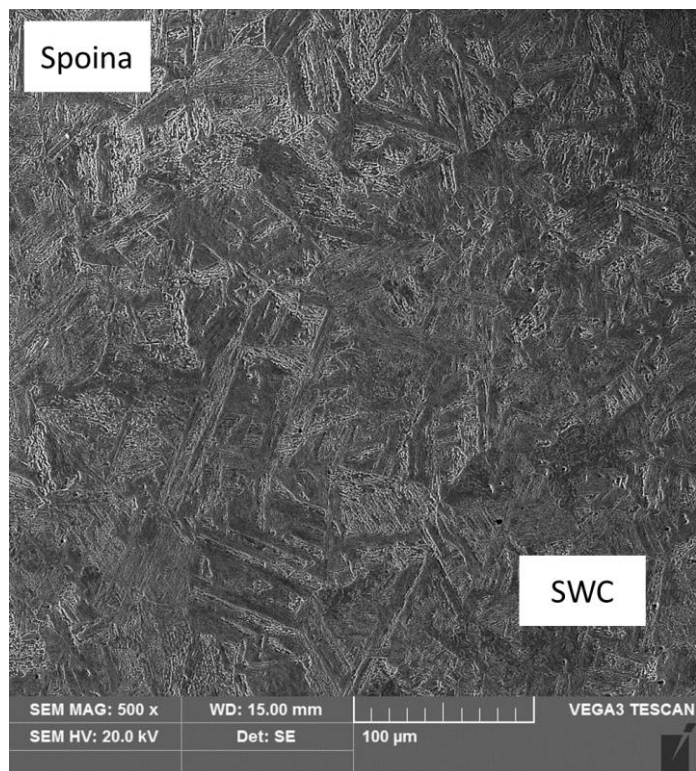
Rys. 141. Zmiana szerokości pasm ferrytu δ wzdłuż linii wtopienia w kierunku lica i grani spoiny

Analiza złącza spawanego wykonanego metodą spawania automatycznego wskazuje na podobny wpływ cyklu cieplnego procesu spawania na mikrostrukturę poszczególnych jego obszarów, z tą różnicą, że w strefie wpływu ciepła nie stwierdzono takiej ilości węglików (Rys. 138). Wskazuje to na mniejszy zasięg i mniejsze natężenie oddziaływania cyklu cieplnego procesu spawania metodą automatyczną. Potwierdzają to pomiary szerokości całej strefy wpływu ciepła i jej poszczególnych obszarów, jak pokazano w Tab. 28. Całkowita szerokość strefy wpływu ciepła dla złącza wykonanego metodą spawania automatycznego jest prawie dwukrotnie mniejsza niż w przypadku złącza wykonanego ręcznie.

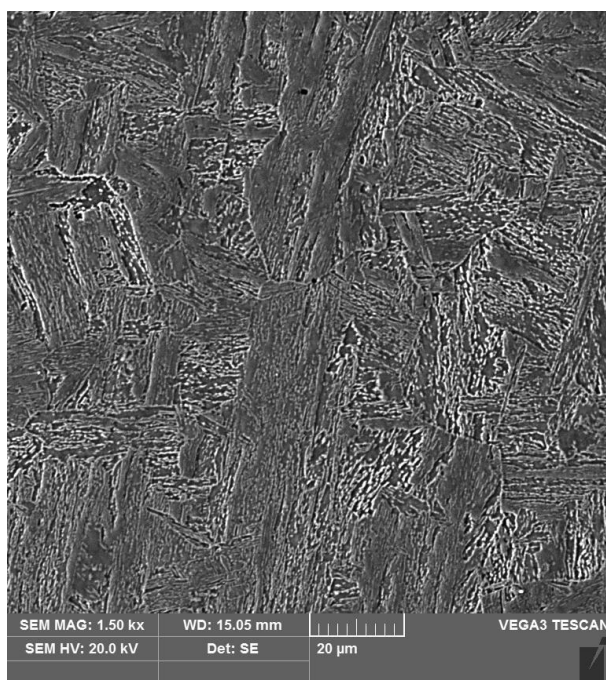
Tab. 28. Wyniki pomiarów szerokości obszarów strefy wpływu ciepła, złączy próbných ze stali 17-4PH wykonanych ręcznie i metodą automatyczną

Metoda spawania	Obszar	Szerokość, μm
ręcznie	A	120-150
	B	90-105
automatycznie	A	90-100
	B	80-90

Mikrostrukturę spoiny i strefy wpływu ciepła złącza ze stali 17-4 PH po obróbce cieplnej przedstawiono na Rys. 142 i 143.



Rys. 142. Obszar spoina-strefa wpływu ciepła złącza ze stali 17-4 PH po obróbce cieplnej



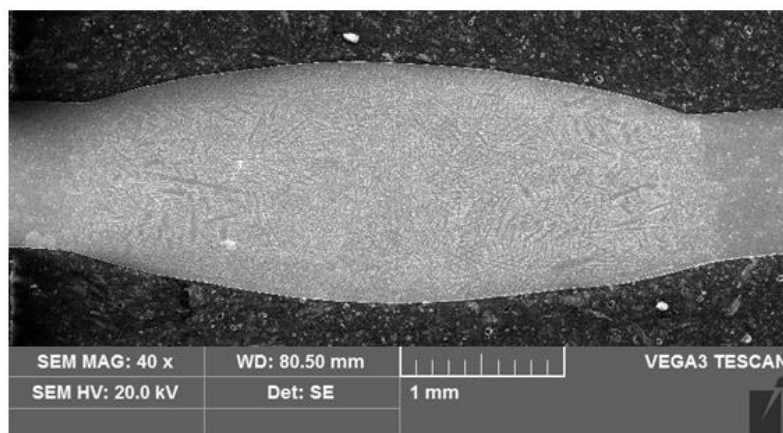
Rys. 143. Obszar strefy wpływu ciepła złącza ze stali 17-4 PH po obróbce cieplnej

Obróbka cieplna złącza ze stali 17-4PH miała wyraźny wpływ na jego mikrostrukturę. Ilość ferrytu δ , obecnego przy linii wtopienia jest znacznie mniejsza po obróbce cieplnej.

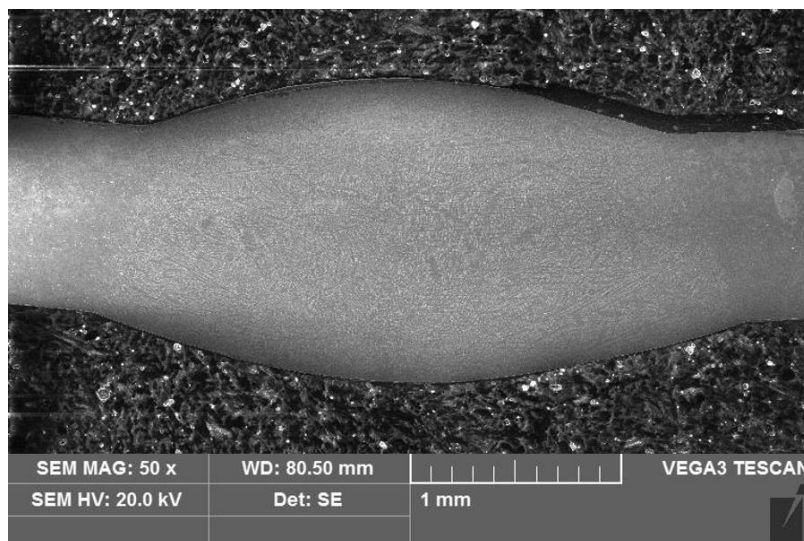
Przypuszczać można, że obróbka cieplna w pewnym stopniu zhomogenizowała, czyli ujednorodniła mikrostrukturę poszczególnych obszarów złącza spawanego.

Badania metalograficzne próbných złączy spawanych ze stopu Inconel 718

Widok makrostruktury obszaru próbnego złącza ze stopu Inconel 718 spawanego ręcznie przedstawiono na Rys. 144 oraz automatycznie na Rys. 145. W złączu tym wyszczególniono trzy obszary: spoina, strefa wpływu ciepła i materiał podstawowy.

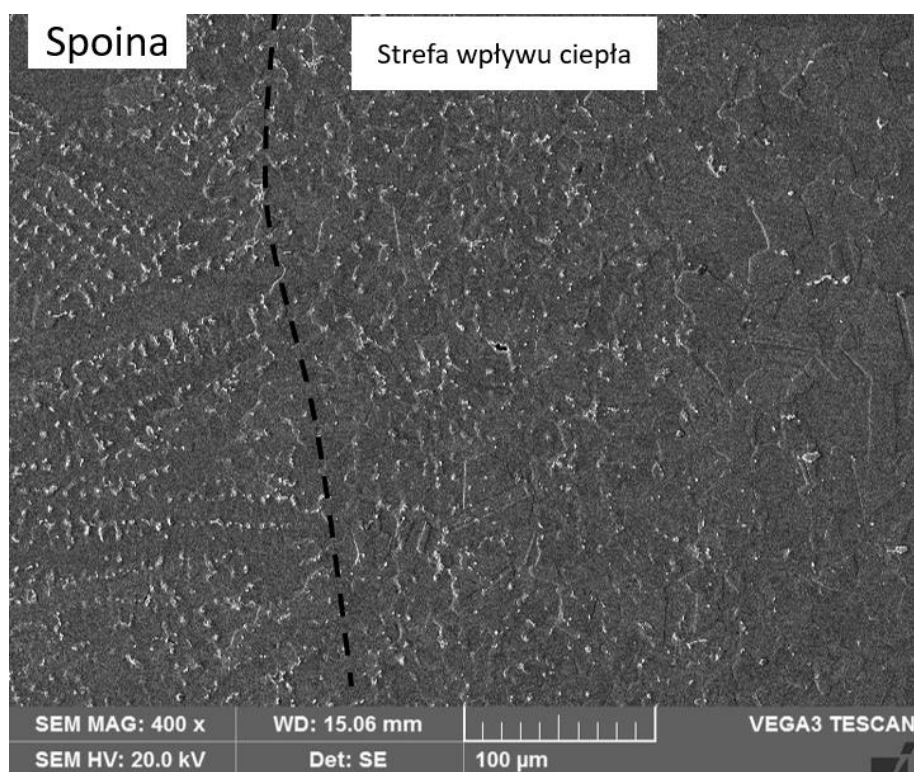


Rys. 144. Makrostruktura SEM ręcznie spawanego złącza ze stopu Inconel 718



Rys. 145. Makrostruktura SEM automatycznie spawanego złącza ze stopu Inconel 718

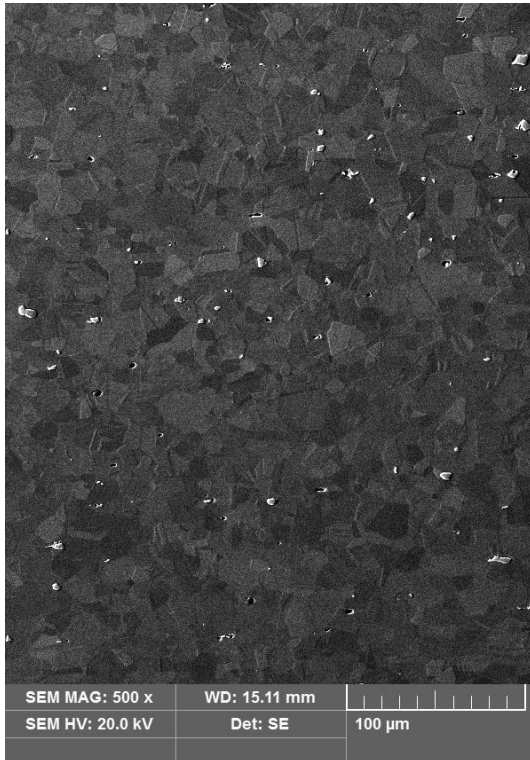
Na rysunku 141 przedstawiono granicę spoina-strefa wpływu ciepła złącza ze stopu Inconel 718. W obszarze tym wykonano również analizę składu chemicznego zidentyfikowanych składników mikrostruktury. Wyniki tej analizy przedstawiono na Rys. 143-144.



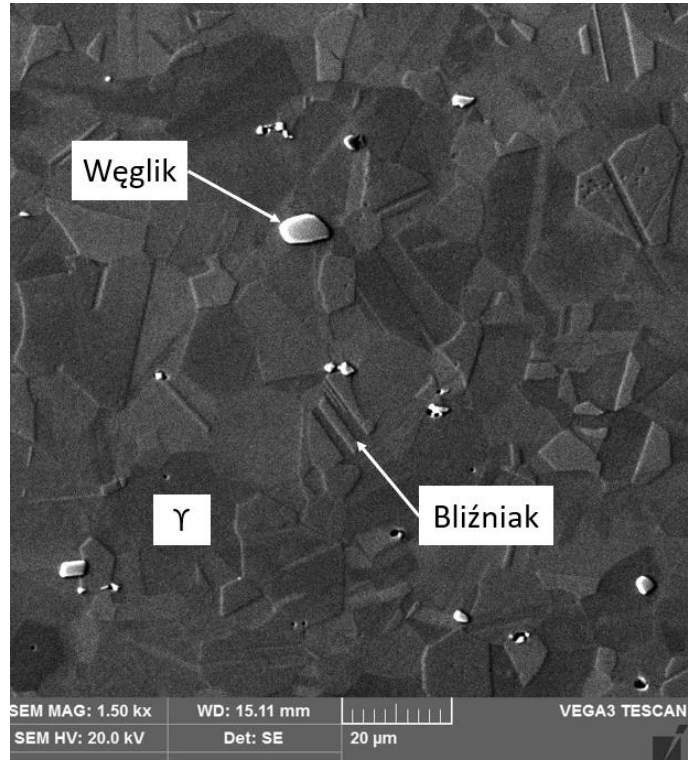
Rys. 146. Obszary złącza spawanego ze stopu Inconel 718, w których analizowano mikrostrukturę

Charakterystyczna mikrostrukturę materiału podstawowego, czyli stopu Inconel 718 przedstawiono na Rys. 147. W mikrostrukturze tej można wyodrębnić osnowę austenityczną γ , z ziarnami o równej wielkości oraz obecność bliźniaków wyżarzania (dyslokacji). Ta mikrostruktura powstaje w wyniku odkształcenia mechanicznego podczas walcowania i obróbki cieplnej blachy, co potwierdzono w pracy [113]. Dodatkowo, pod większym powiększeniem zaobserwowano obecność węglików losowo rozproszonych w austenitycznej osnowie γ . Na Rys. 149 przedstawiono wyniki analizy składu chemicznego osnowy i węglików (obszary analizy określone na Rys. 143). Analiza ta wykazała, że zidentyfikowane węgliki zawierają głównie niob i tytan.

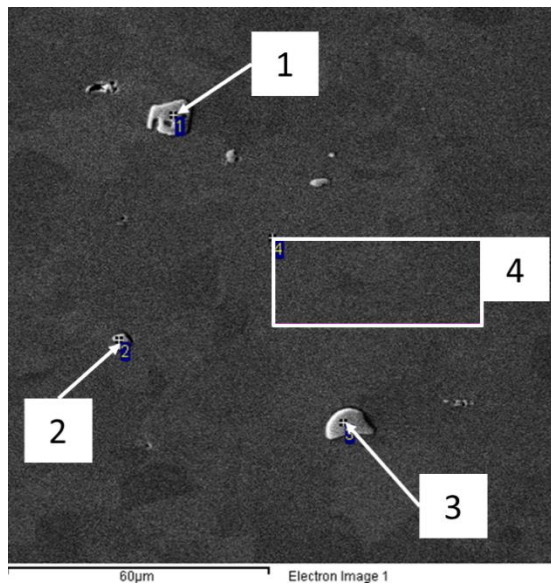
a)



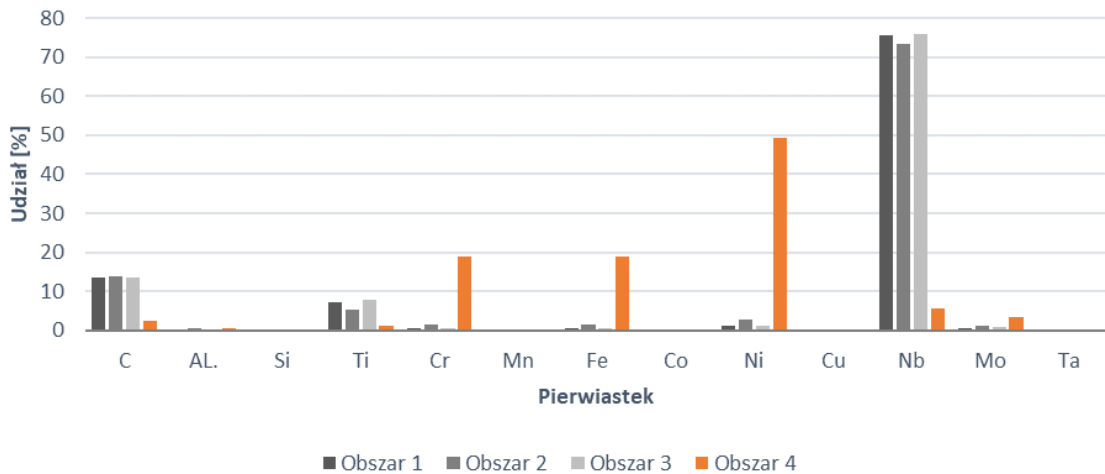
b)



Rys. 147. Mikrostruktura stopu Inconel 718; a) powiększenie 500x, b) powiększenie 1500x



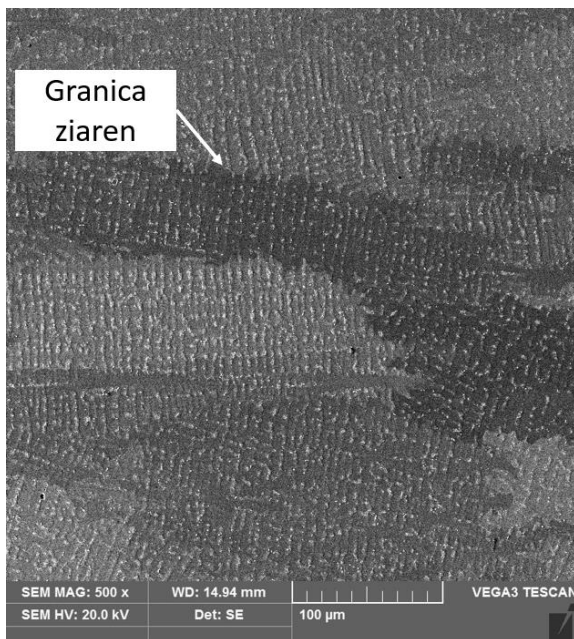
Rys. 148. Obszar badania składu chemicznego materiału podstawowego Inconel 718 po spawaniu. Obszar 1-3 węgliki, obszar 4 osnowa austenityczna



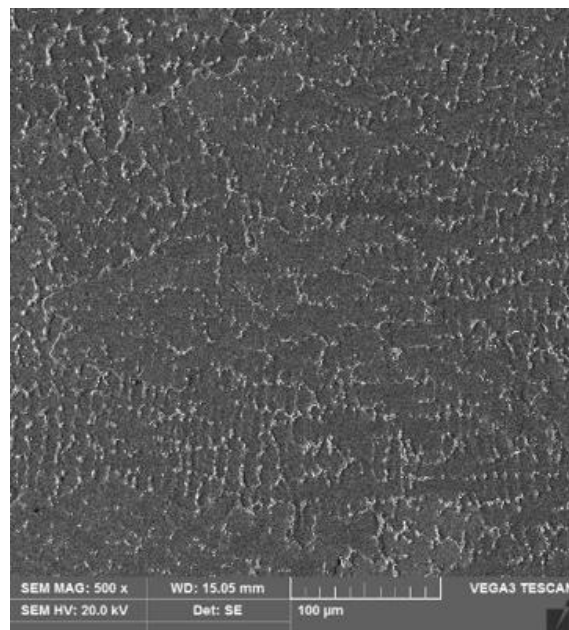
Rys. 149. Udział pierwiastków dla obszarów 1, 2, 3, 4 określonych na Rys. 148

W spoinie stwierdzono typową dla spawania mikrostrukturę dendrytów kolumnowych z wydzieleniami węglików, z bardziej wyraźną granicą ziaren w przypadku złącza spawanego automatycznie (Rys. 150).

a)



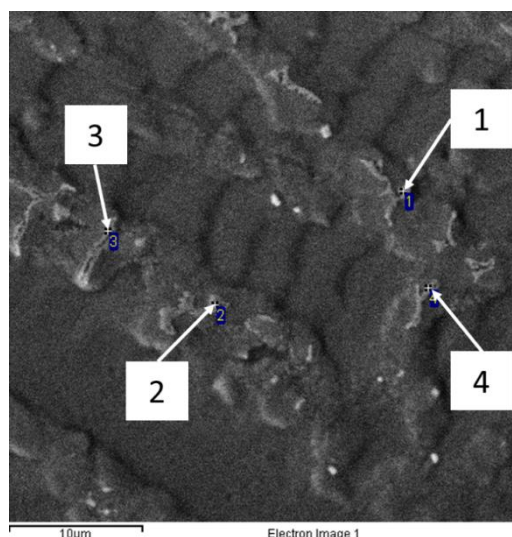
b)



Rys. 150. Mikrostruktura spoiny złącza spawanego ze stopu Inconel 718 wykonanego automatycznie (a) i ręcznie (b)

Różnorodność węglików i faz międzymetalicznych występujących w spoinie wynika między innymi z mikrosegregacji zachodzącej podczas procesu jej krzepnięcia. Pierwiastki takie jak Mo, Nb i Ti segregują się między dendrytami, a inne, takie jak W, Fe, Cr i Co, segregują się do obszarów osnowy. Efektem tego jest pojawienie się wydzieleni fazy Lavesa

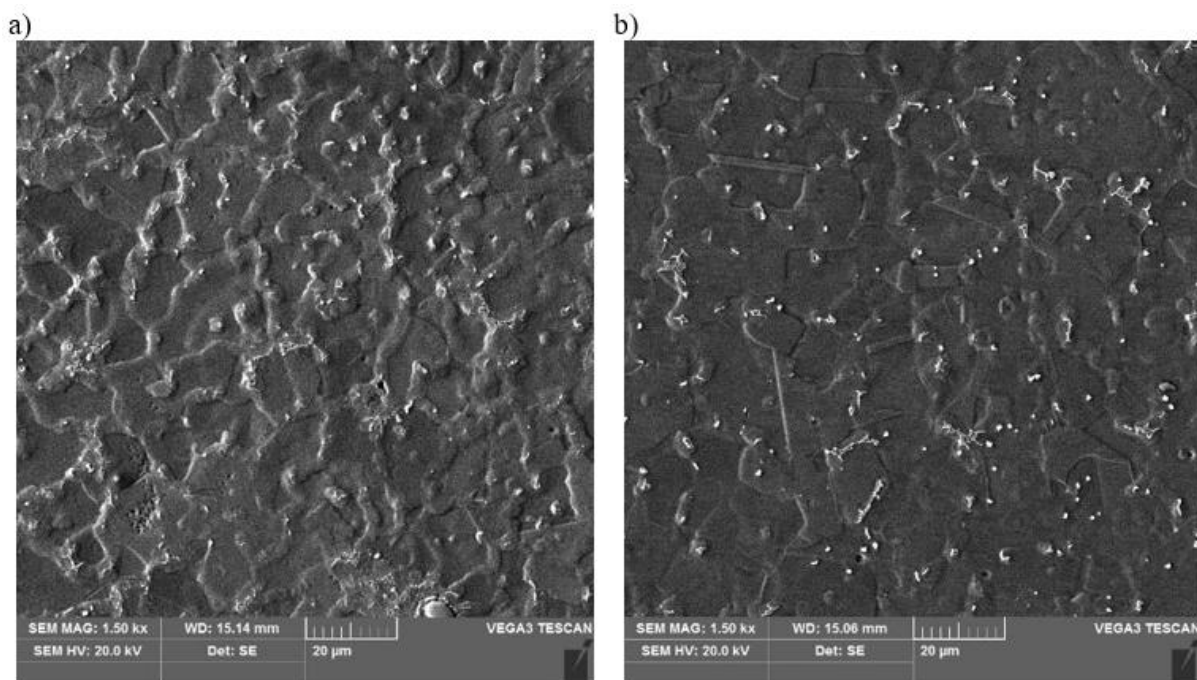
i węglików bogatych w Nb [114]. Autorzy pracy [115] zauważają, że wtrącenia faz wtórnych (Lavesa w przypadku Nb) oraz do obszarów zubożonych w Mo, mogą obniżyć odporność na korozję. W celu identyfikacji węglików i faz występujących w przestrzeniach międzydendrytycznych wykonano rentgenowską mikroanalizę składu chemicznego. Wyniki tej analizy przedstawiono na Rys. 151.



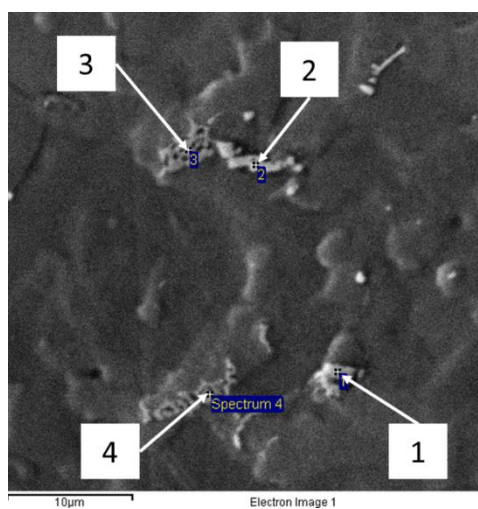
Obszar	C	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Nb	Mo	Ta
1	12.22	0.07	0.32	7.73	6.16	0.00	5.06	0.31	12.13	0.00	52.96	3.71	0.00
3	3.78	0.37	0.67	1.50	13.39	0.00	12.27	0.00	39.87	0.00	23.51	5.20	0.00
2	4.36	0.83	0.25	1.40	13.90	0.00	12.94	0.12	40.26	0.69	19.32	5.28	0.76
4	3.74	0.49	0.43	1.56	14.52	0.00	14.15	0.01	43.10	0.03	17.75	4.62	0.00

Rys. 151. Obszar spoiny w złączu ze stopu Inconel 718 z zaznaczonymi miejscami rentgenowskiej analizy składu chemicznego

Na Rys. 152 przedstawiono mikrostrukturę złącza ze stopu Inconel 718, w obszarze jego strefy wpływu ciepła. Wyniki rentgenowskiej mikroanalizy składu chemicznego tego obszaru, przedstawione na Rys. 153, wskazują na duże zróżnicowanie zawartości niobu w poszczególnych węglikach i fazach międzymetalicznych.



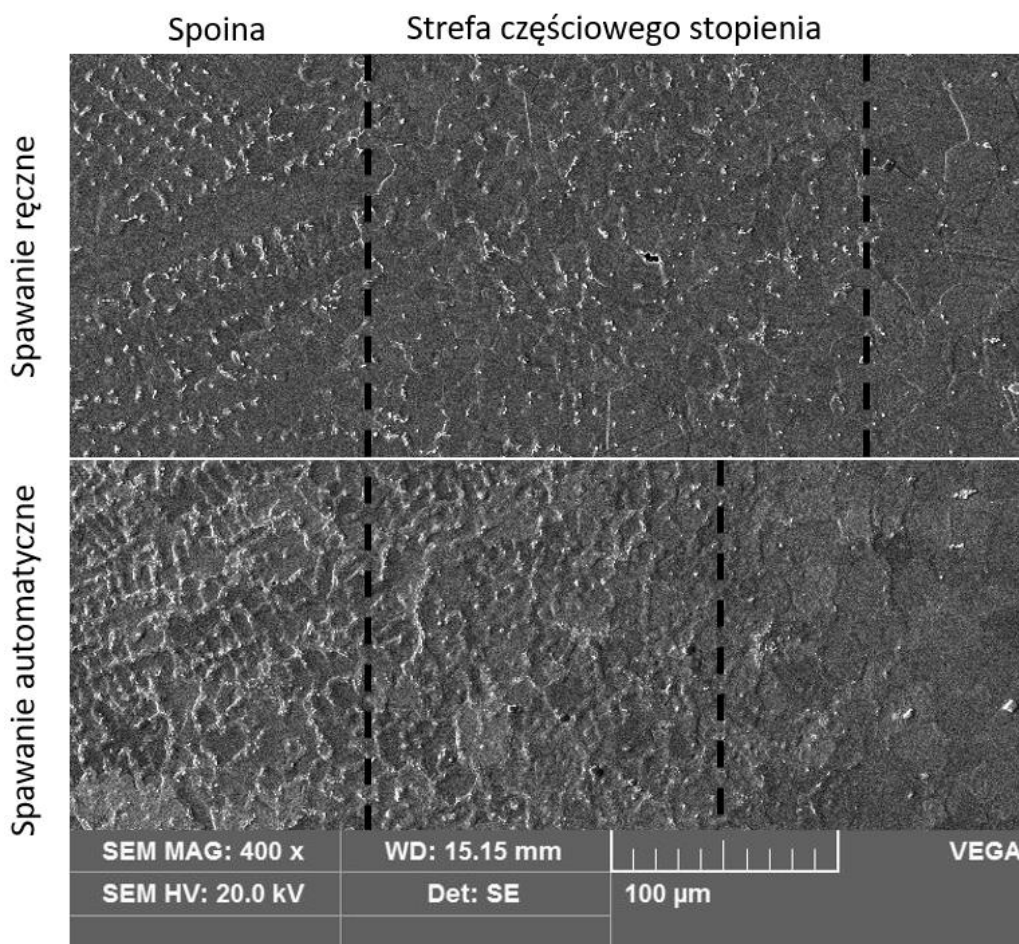
Rys. 152. Mikrostruktura SEM strefy wpływu ciepła, złącza spawanego ze stopu Inconel 718 wykonanego automatycznie (a) i ręcznie (b)



Obszar	C	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Nb	Mo	Ta
1	13.53	0.02	0.06	6.33	3.55	0.00	3.26	0.00	8.14	0.00	63.81	1.04	0.32
3	12.91	0.21	0.18	6.30	6.43	0.01	6.03	0.00	15.36	0.11	50.89	1.63	0.00
2	3.25	0.38	0.35	1.50	12.40	0.00	11.85	0.00	38.64	0.21	26.10	5.24	0.16
4	3.50	0.43	0.40	1.75	12.97	0.00	12.26	0.00	41.28	0.15	23.04	4.47	0.00

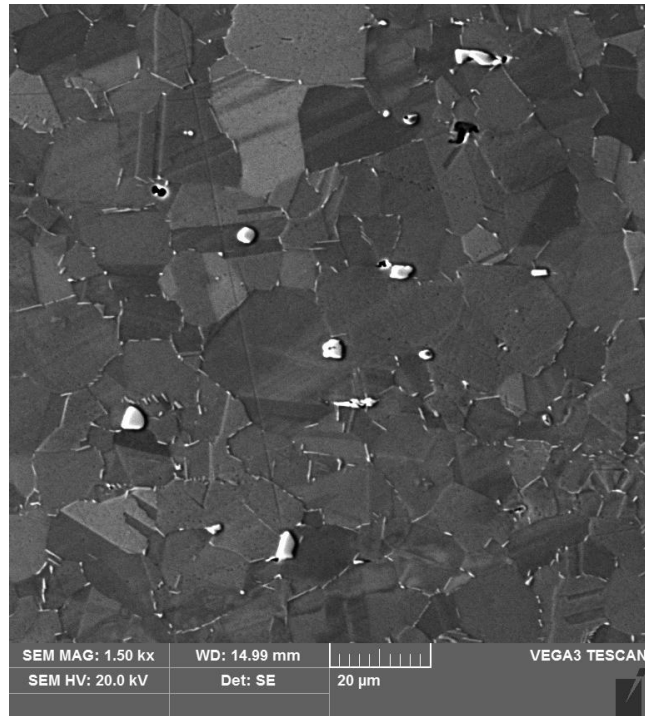
Rys. 153. Wyniki rentgenowskiej analizy składu chemicznego obszaru strefy wpływu ciepła złącza ze stopu Inconel 718

Analiza szerokości obszaru wtopienia wskazuje na dużą różnicę pomiędzy złączem spawanym ręcznie, a złączem spawanym automatycznie (Rys. 154). Rozmiary strefy dla spawania automatycznego to 150 μm , natomiast dla spawania ręcznego to 220 μm . Większy rozmiar poszczególnych obszarów świadczy o większej energii cyklu cieplnego spawania ręcznego.

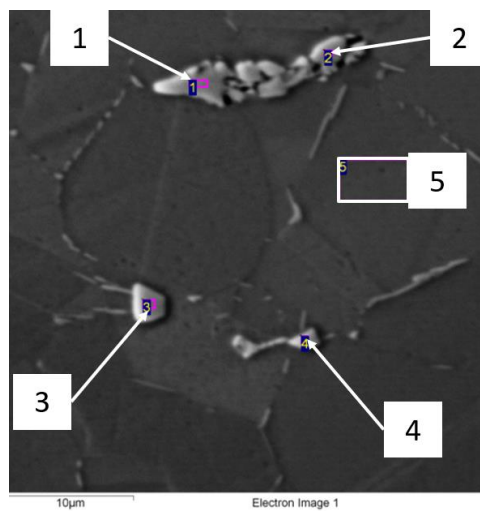


Rys. 154. Porównanie obszaru wtopienia w złączu spawanym ręcznie i automatycznie

Analiza mikrostruktury stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej (Rys. 155) wskazuje, że rozmiary ziaren nie uległy zmianie, natomiast zauważalne są wytrącenia bogate w Nb na granicach ziaren. Potwierdziły to wyniki rentgenowskiej mikroanalizy składu chemicznego przedstawione na Rys. 156.



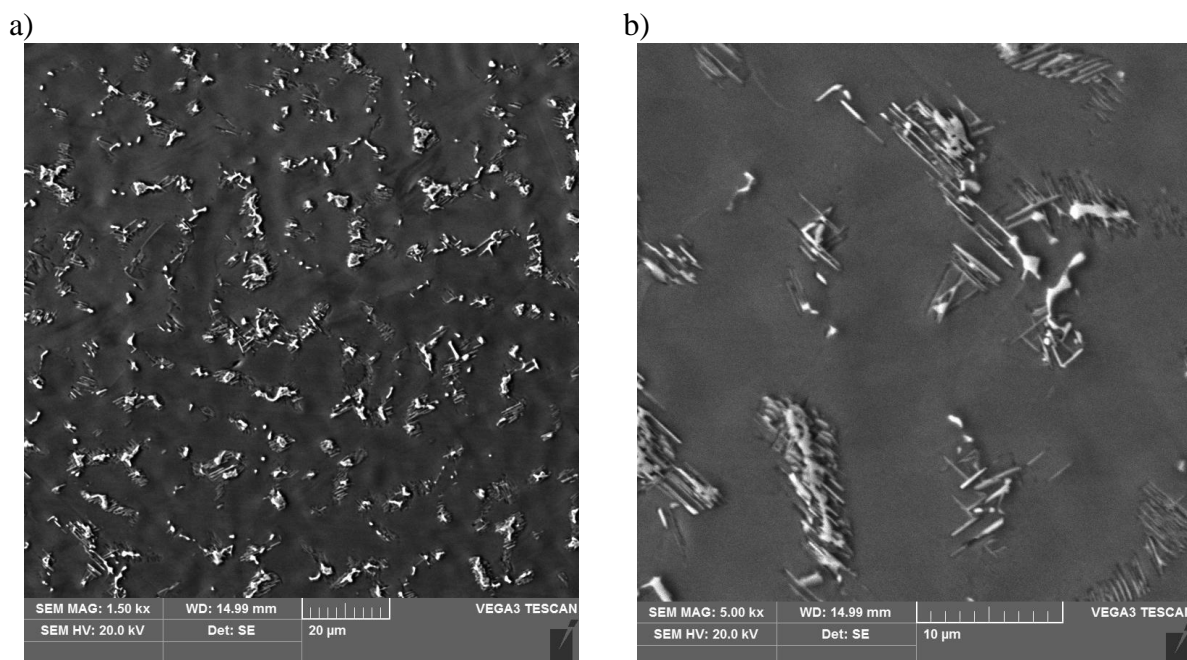
Rys. 155. Mikrostruktura stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej



Obszar	C	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
1	12,88	0,02	7,42	2,22	2,06	4,89	69,24	1,28
2	12,41	0,13	6,21	3,95	3,77	8,35	63,97	1,21
3	10,19	0,13	4,75	3,24	3,28	7,94	67,94	1,14
4	6,14	0,30	4,18	10,10	10,30	25,94	40,96	2,08
5	2,28	0,60	1,02	18,67	19,06	50,03	5,03	3,30

Rys. 156. Wyniki mikroanaliza składu chemicznego stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej

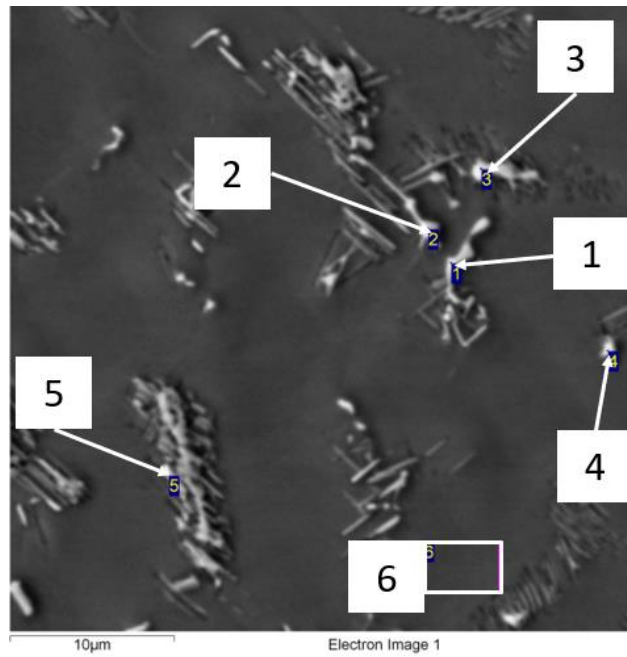
Mikrostrukturę spoiny w złączu ze stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej przedstawiono na Rys. 157.



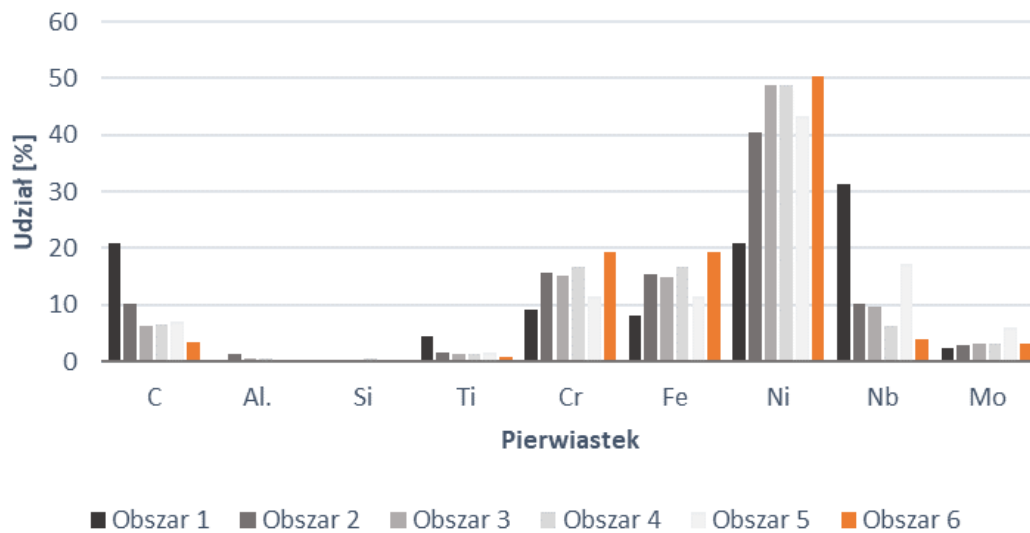
Rys. 157. Mikrostruktura spoiny złącza spawanego ze stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej (spawanie ręczne). Powiększenie (a) 500x, (b) 5000x

Przy dużym powiększeniu (x5000) w mikrostrukturze tej ujawniono igły w fazie δ wytrącone wokół częściowo rozpuszczonych cząstek Lavesa, w obszarach bogatych w niob (Rys. 158 i Rys. 159). Obróbka cieplna po spawaniu spowodowała w pewnym stopniu rozpuszczenie fazy Lavesa, ale nie wyeliminowała jej całkowicie. Potwierdzają to wyniki autorów prac [112, 116].

W strefie wpływu ciepła złącza spawanego ze stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej (Rys. 160) można zauważyć rozproszone węgliki oraz wytrącenia bogate w Nb na granicach ziaren, jednak ilościowo jest ich znacznie mniej niż w materiale podstawowym, czyli w stopie Inconel 718 (Rys. 161).

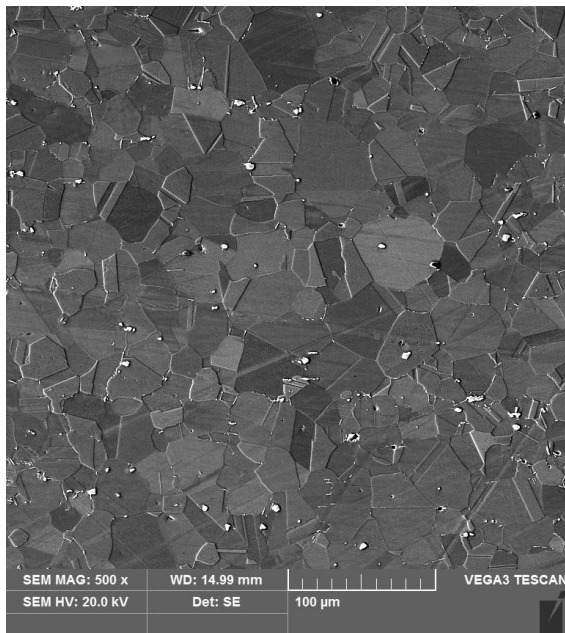


Rys. 158. Miejsca analizy składu chemicznego w spoinie złącza ze stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej

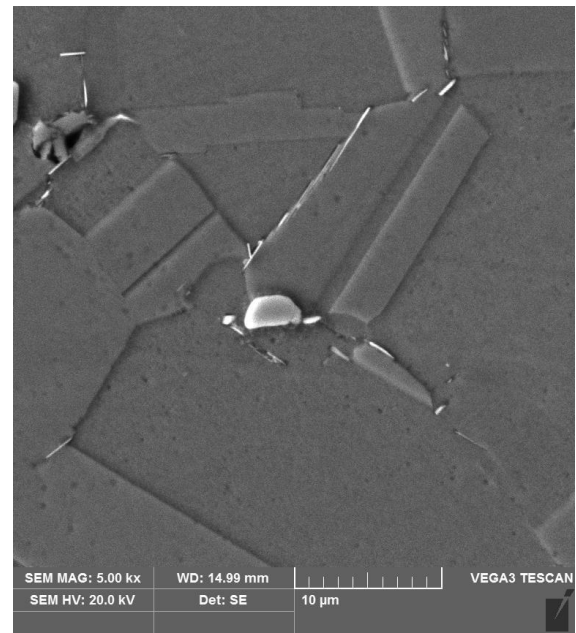


Rys. 159. Wyniki analizy składu chemicznego w spoinie złącza ze stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej, w miejscach określonych na Rys. 158

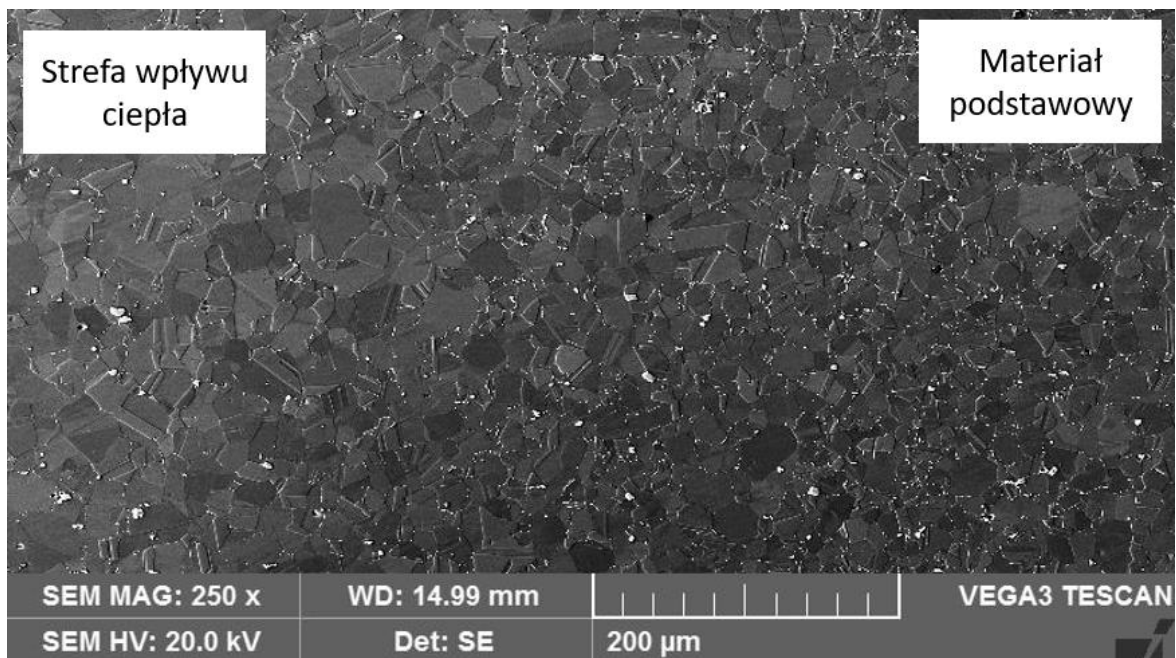
a)



b)



Rys. 160. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła złącza spawanego ze stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej. Powiększenie (a) 500x, (b) 5000x



Rys. 161. Mikrostruktura strefy wpływu ciepła i materiału podstawowego w złączeniu ze stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej

5.10.2 Pomiary twardości

Pomiary twardości próbnych złączy spawanych wykonano na zglądach metalograficznych. Dla każdego złącza określono rozkład twardości w materiale podstawowym, strefie wpływu ciepła i w spoinie.

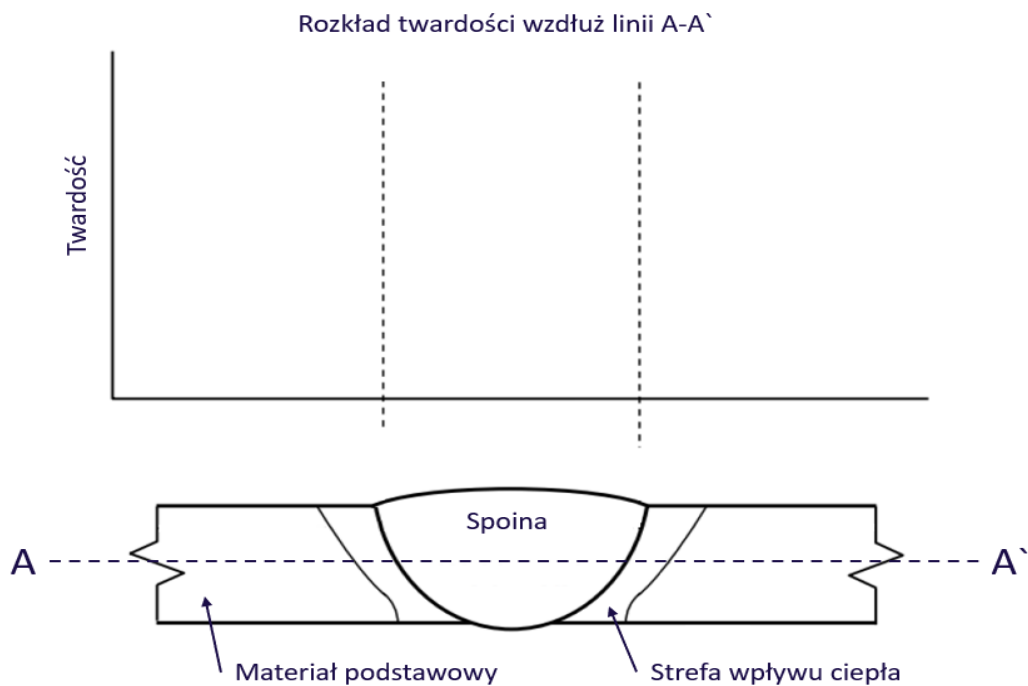
Pomiary twardości wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 9015-1, wykorzystując metodę Vickersa. Do pomiarów użyto twardościomierza ZHV10, firmy ZWICK/ROELL będącego na wyposażeniu Katedry Odlewnictwa i Spawalnictwa Politechniki Rzeszowskiej (Rys. 162).



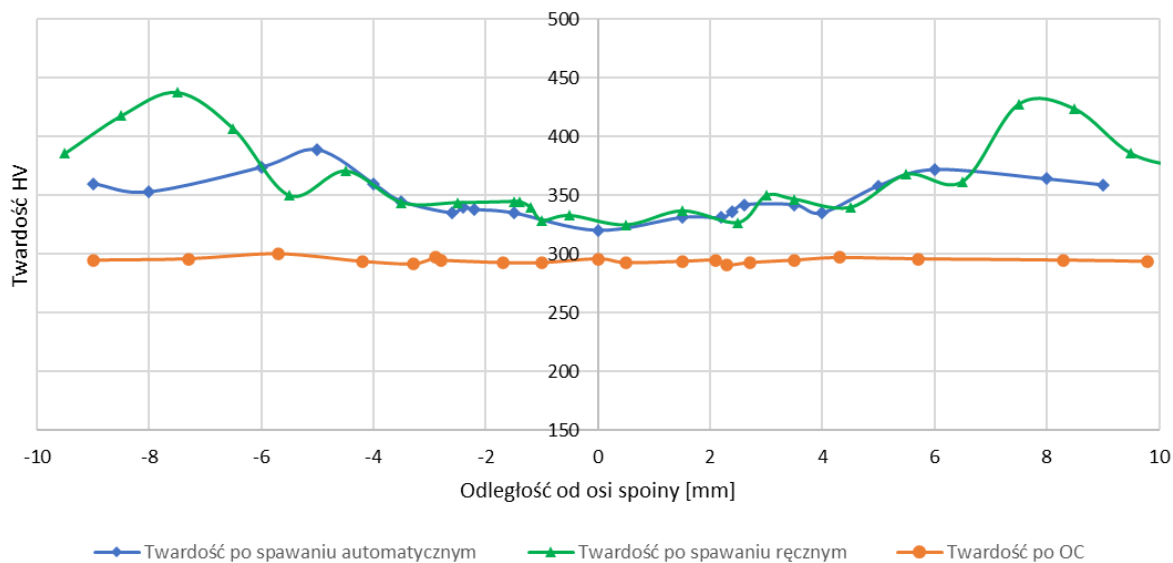
Rys. 162. Twardościomierz ZHV10, firmy ZWICK/ROELL

W trakcie pomiarów stosowano obciążenie 5kG (49,03N), co odpowiadało standardowej sile dla pomiaru HV5. Schemat pomiaru został przedstawiony na Rys. 163.

Rozkład twardości w próbnym złączu spawanym ze stali 17-4PH, spawanym ręcznie, automatycznie i po obróbce cieplnej przedstawiono na Rys. 164. W przypadku złącza ze stali 17-4PH w stanie bez obróbki cieplnej, najniższą wartością twardości charakteryzuje się środek spoiny. Wzdłuż osi spoiny występuje minimum wynoszące 320 HV5. W linii wtopienia zauważalny jest minimalny wzrost twardości w porównaniu do materiału podstawowego. Różnica pomiędzy min i max w rozkładzie twardości wynosi 21% dla spawania automatycznego i 34% dla spawania ręcznego. Strefa przegrzania złącza w przypadku spawania ręcznego jest znacznie szersza niż podczas spawania automatycznego.

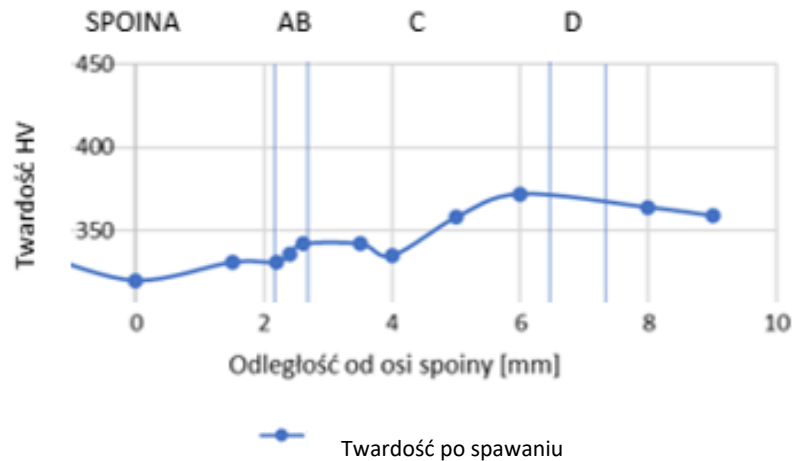


Rys. 163. Lokalizacja punktów pomiarowych wzdłuż linii A-A`, oraz sposób przedstawienia wyników na wykresie



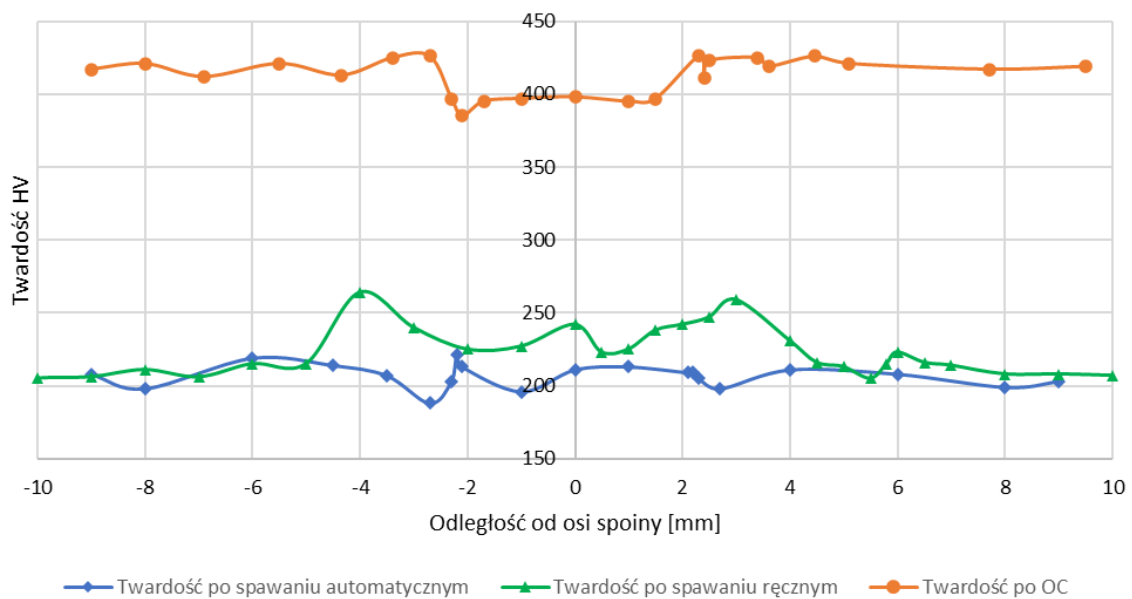
Rys. 164. Rozkład twardości w próbnym złączu spawanym ze stali 17-4 PH

Rozkład twardości w złączu spawanym ze stali 17-4 PH po obróbce cieplnej znacznie różni się od pozostałych. Zauważyć można, że różnica pomiędzy min i max tego rozkładu twardości wynosi tylko 3%. Potwierdza to, że zastosowanie obróbki cieplnej homogenizuje mikrostrukturę, a tym samym twardość złącza spawanego (Rys. 165).



Rys. 165. Obszary mikrostruktury A, B, C i D wraz z naniesionym wykresem twardości

Rozkład twardości w złączu spawanym ze stopu niklu Inconel 718 przedstawia Rys. 166.



Rys. 166. Rozkład twardości spoiny wykonanej na próbce z materiału Inconel 718

W złączu ze stopu niklu Inconel 718 w stanie przed obróbką cieplną, w linii wtopienia zauważalny jest minimalny wzrost twardości względem materiału podstawowego, a następnie jej spadek, który jest charakterystyczny dla strefy przegrzania występującej w SWC. Różnica pomiędzy najwyższą i najniższą wartością w rozkładzie twardości dla spawania automatycznego wynosi około 17%, natomiast dla spawania ręcznego 32%. Zauważalne jest także, że całkowita szerokość obszaru o innej twardości niż materiał podstawowy, dla

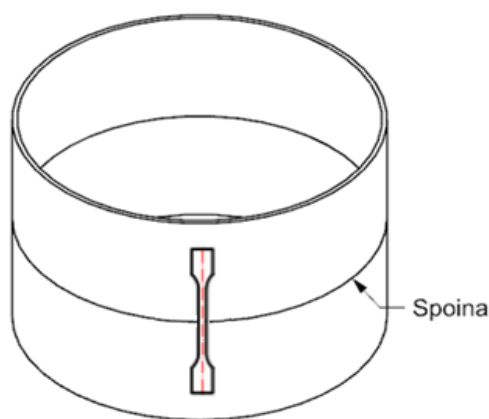
spawania ręcznego jest większa o około 1 mm, od szerokości obszaru zmian twardości złącza spawanego automatycznie. Podobnie jak w przypadku stali 17-4 PH, na krzywej twardości dla Inconelu 718 mniejsze wartości twardości w obszarze SWC spoiny występują po spawaniu automatycznym.

Obróbka cieplna złącza wykonanego ze stopu Inconel 718 spowodowała spadek twardości w spoinie oraz w okolicy linii wtopienia. Różnica pomiędzy min i max twardości wynosi 10%.

Zgodnie z wymaganiami AMS twardość po obróbce cieplnej w przypadku stali 17-4 PH powinna mieścić się w zakresie 280-383 HV, a dla stopu Inconel 718 nie powinna być mniejsza niż 355 HV. Należy zatem stwierdzić, że nowoopracowane złącza spawane spełniają kryteria twardości wynikające z norm AMS.

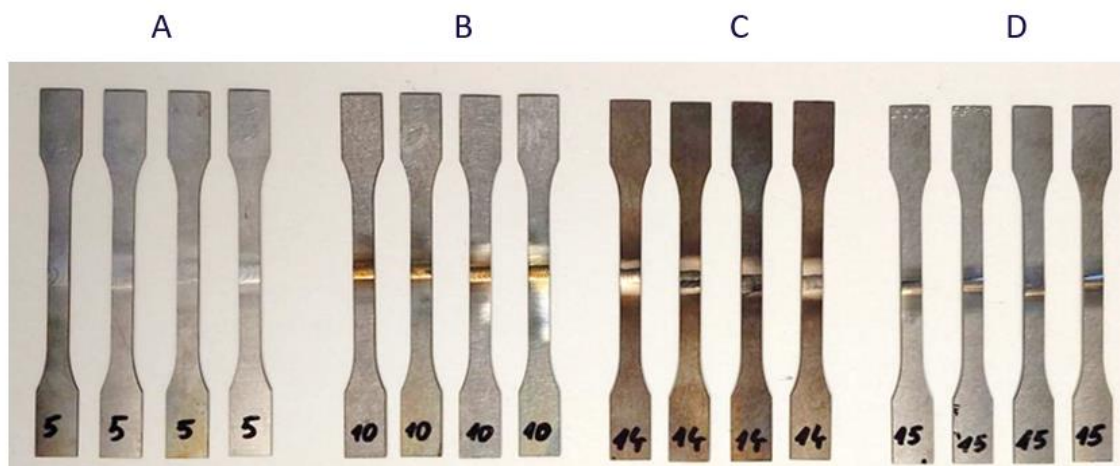
5.10.3 Badania właściwości mechanicznych

Badanie właściwości mechanicznych próbnych złączy spawanych polegały na wykonaniu statycznej próby rozciągania, którą wykonano na próbkach pobranych z cienkościennych złączy spawanych ze stali 17-4PH i ze stopu niklu Inconel 718. Miejsce pobierania próbek do badań przedstawiono na Rys. 167.



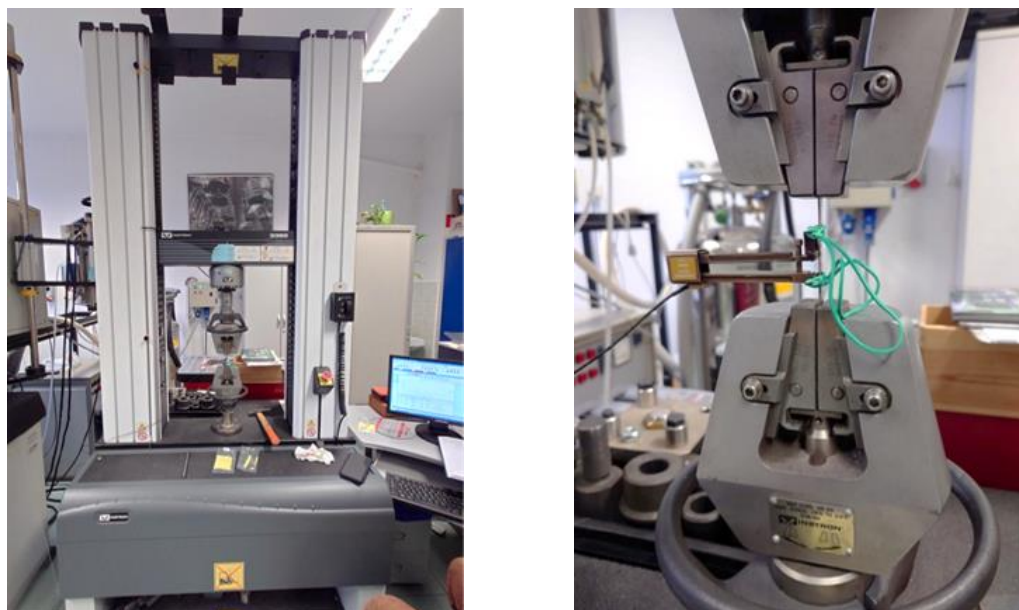
Rys. 167. Miejsce pobierania próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie

Próbki wycięto metodą cięcia elektroerozyjnego. Widok próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono na Rys. 168.



Rys. 168. Przykładowy widok próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie: A - stal 17-4PH po obróbce cieplnej, B - stal 17-4PH przed obróbką cieplną, C - stop Inconel 718 po obróbce cieplnej, D - stop Inconel 718 przed obróbką cieplną

Badania wytrzymałości na rozciąganie zrealizowano na Politechnice Rzeszowskiej w R&D Laboratory for Aerospace Materials. Stanowisko badawcze przedstawiono na Rys. 169.



Rys. 169. Stanowisko do badań wytrzymałości na rozciąganie

Parametry statycznej próby rozciągania to:

- próbka płaska z ekstensometrem (RTT),
- temperatura: 21,6 °C,
- wilgotność: 35%.

Po wykonaniu prób rozciągania wyznaczono:

- maksymalną granicę plastyczności,
- wytrzymałość na rozciąganie,

Wyniki statycznej próby rozciągania przedstawiono w Tab. 29 i Tab. 30.

Tab. 29. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie – złącze spawane ze stali 17-4PH

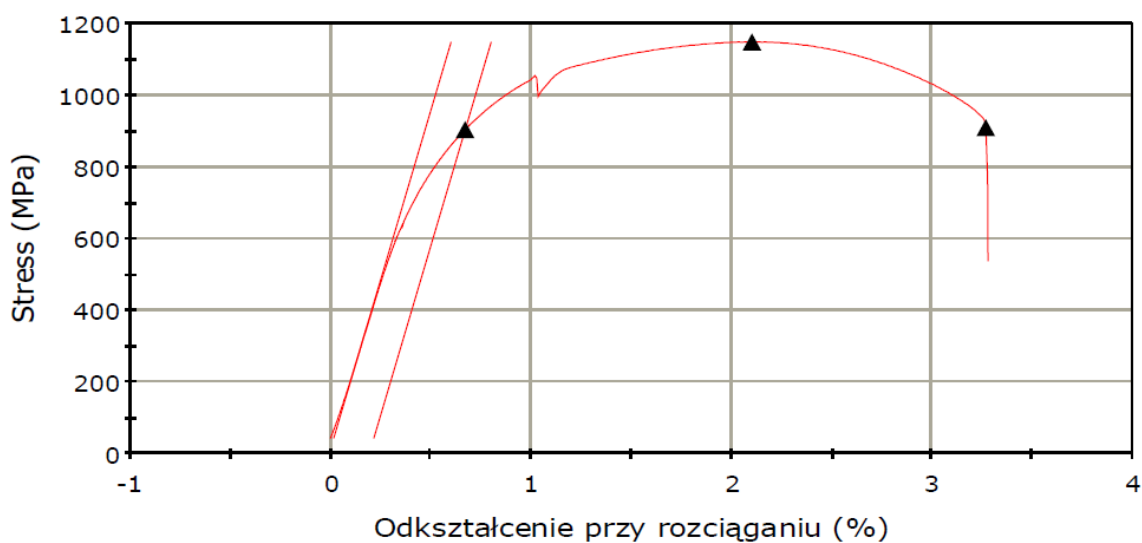
Etap badania	Metoda spawania	Granica plastyczności (MPa) (Przesunięcie 0,002 mm/mm)	Max obciążenie (N)	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)
po spawaniu	automatyczna	910,7	5249	1154,8
	ręczna	904,2	4795	1148,3
po obróbce cieplnej	ręczna	780,7	4331	952,9

Tab. 30. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie – złącze spawane ze stopu Inconel 718

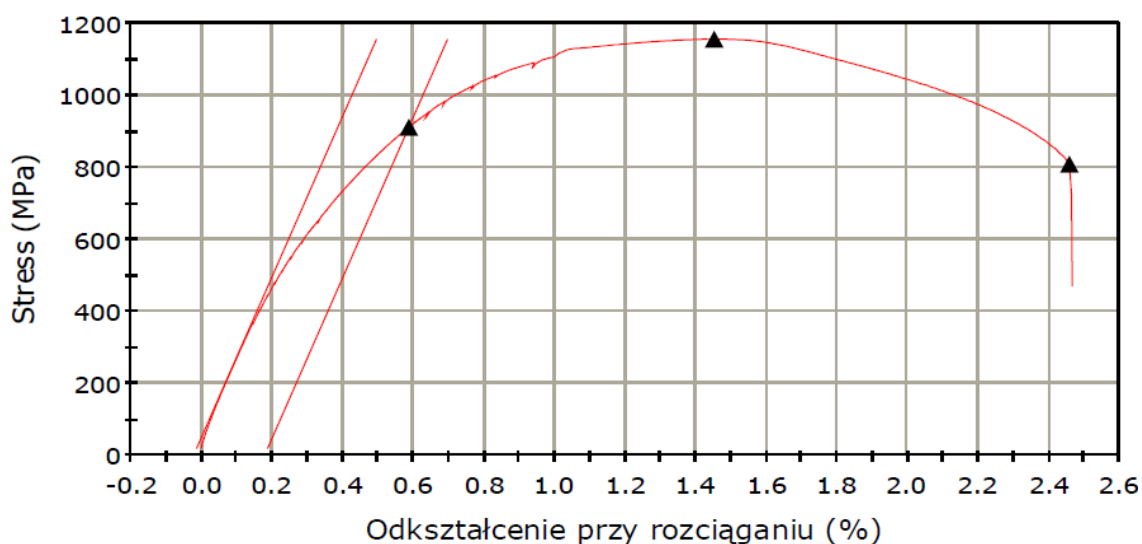
Etap badania	Metoda spawania	Granica plastyczności (MPa) (Przesunięcie 0,002 mm/mm)	Max obciążenie (N)	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)
po spawaniu	automatyczna	439,5	4082	898,2
	ręczna	460,3	3813	899,4
po obróbce cieplnej	ręczna	1113,1	6291	1384,2

Krzywe naprężenie-odkształcenie, dla złączy ze stali 17-4PH, spawanych ręcznie i automatycznie, przedstawiono na Rys. 170, a dla stopu Inconel 718 na Rys. 171. Natomiast na Rys. 172 i Rys. 173 przedstawiono krzywe naprężenia-odkształcenia dla próbek po obróbce cieplnej.

a)

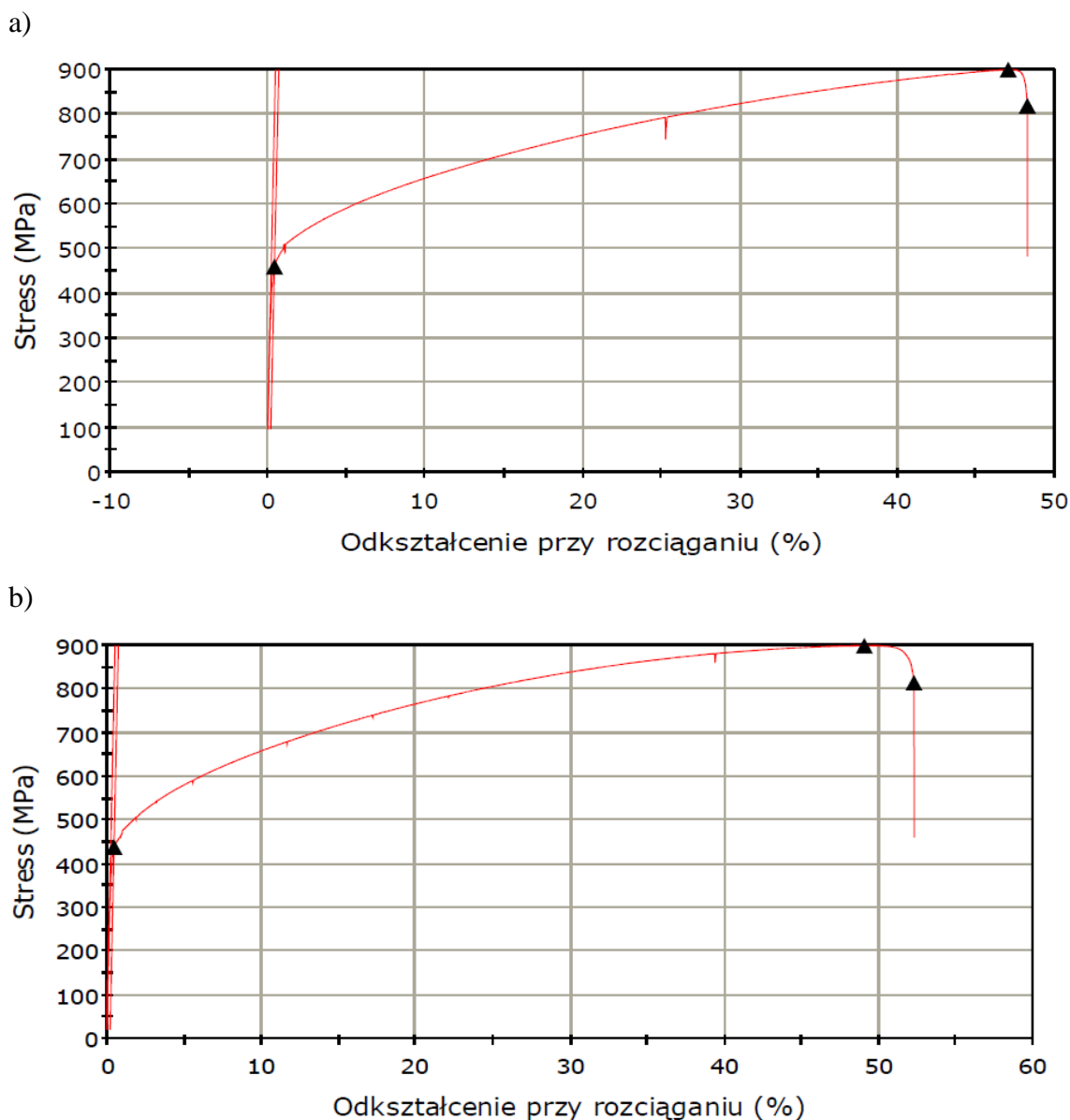


b)



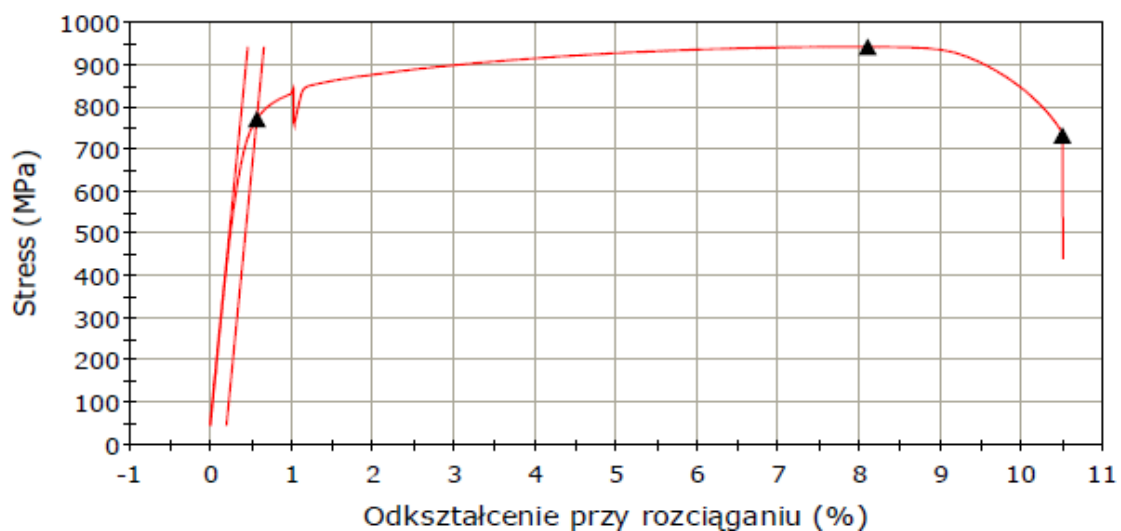
Rys. 170. Krzywe naprężenia i odkształcenia w statycznej próbie rozciągania dla próbek ze stali 17-4PH po spawaniu: a) ręcznym, b) automatycznym

Uzyskane wyniki badań wskazują, że wytrzymałość na rozciąganie próbných złączy spawanych ręcznie i automatycznie jest podobna zarówno dla złączy wykonanych ze stali 17-4 PH, jak i tych wykonanych ze stopu Inconel 718. Oznacza to, że zastosowanie różnych parametrów spawania nie wpływa aż tak wyraźnie na właściwości mechaniczne połączeń spawanych. Zastosowanie mniejszej energii liniowej spawania nie zmniejsza wytrzymałości spoin na rozciąganie.

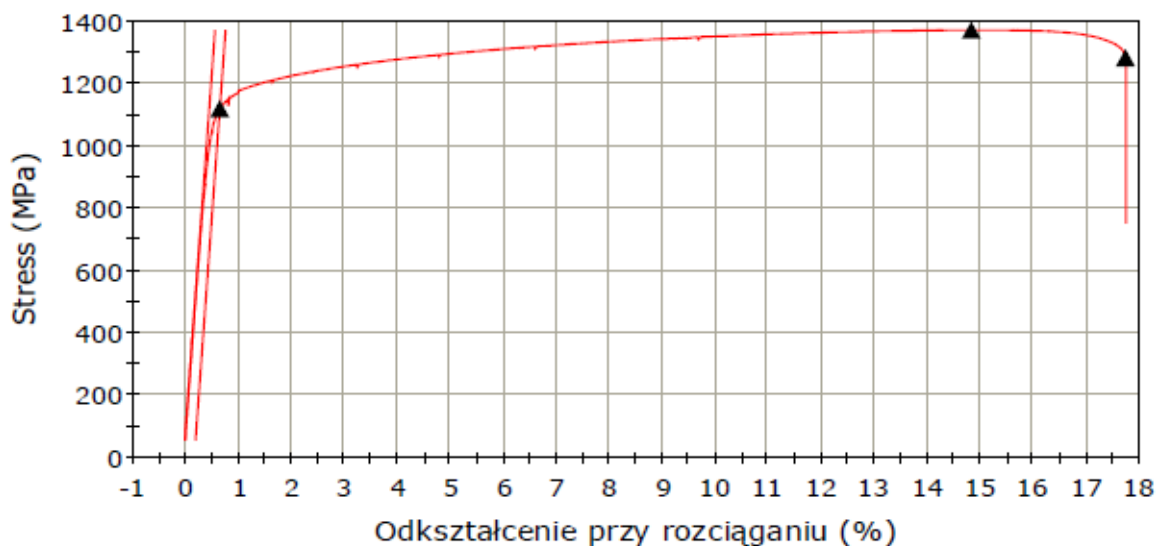


Rys. 171. Krzywe naprężenia i odkształcenia w statycznej próbie rozciągania dla próbek ze stopu Inconel 718 po spawaniu,: a) ręcznym, b) automatycznym

Próbki wycięte ze złącza ze stali 17-4 PH po obróbce cieplnej mają niższą wytrzymałość na rozciąganie, niż próbki po spawaniu. Wynika to z rodzaju zastosowanego utwardzania wydzieleniowego (uzyskanej kondycji materiału). W tym przypadku wykonano obróbkę cieplną 17-4PH do kondycji H1150. Wymagania specyfikacji materiałowej AMS 5604, określają minimalne wymagania wytrzymałościowe po obróbce cieplnej. Według tych wymagań minimalna wartość wytrzymałości na rozciąganie powinna wynosić 931 MPa, a granica plastyczności 724 MPa. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w Tab. 29, wymagania wytrzymałościowe specyfikacji AMS zostały spełnione.



Rys. 172. Krzywa naprężenia i odkształcenia w statycznej próbie rozciągania dla próbek ze stali 17-4PH po obróbce cieplnej



Rys. 173. Krzywa naprężenia i odkształcenia w statycznej próbie rozciągania dla próbek ze stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej

Wymagania specyfikacji materiałowej AMS 5596 określają minimalne wymagania wytrzymałościowe po obróbce cieplnej stopów niklu Inconel 718. Według wymagań AMS dla stopów niklu utwardzanych wydzieleniowo minimalna wartość wytrzymałości na rozciąganie to 1241 MPa oraz granicy plastyczności 1034 MPa. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w Tab. 30 wymagania wytrzymałościowe specyfikacji AMS zostały spełnione.

6. WNIOSKI SZCZEGÓŁOWE I KOŃCOWE

Na podstawie wykonanych badań sformułowano następujące wnioski szczegółowe:

1. Średnie wartości deformacji spawalniczych próbnych złączy spawanych, określone na podstawie analizy stopnia odchylenia profilu od kształtu nominalnego, w przypadku złączy ze stali 17-4 PH spawanych ręcznie lub automatycznie są porównywalne. Zastosowanie obróbki cieplnej spowodowało znaczne zmiany w kształcie profilu złącza spawanego ręcznie w postaci jego deformacji zwłaszcza w obszarze strefy wpływu ciepła, czego nie zaobserwowano w przypadku złączy spawanych automatycznie.
2. W przypadku złączy próbnych ze stopu Inconel 718, średnia wartość deformacji bezpośrednio po spawaniu jest większa w złączach wykonanych metodą automatyczną. Po wykonaniu obróbki cieplnej wartości deformacji tych złączy w istotny sposób uległy zmniejszeniu (dążąc do zera), w porównaniu do złączy spawanych ręcznie, których deformacja po obróbce cieplnej jest porównywalna z deformacją po spawaniu.
3. Całkowita, sumaryczna wartość deformacji spawalniczych (po spawaniu i po obróbce cieplnej) występujących w próbnych złączach spawanych ze stopu Inconel 718 jest zdecydowanie mniejsza w przypadku spawania metodą automatyczną w porównaniu do spawania ręcznego.
4. W próbnym złączach spawanych ze stali 17-4 PH, wartość całkowitej deformacji zależy od przyjętych parametrów technologicznych automatycznego spawania metodą TIG (energii liniowej). Niewłaściwy dobór tych parametrów, nawet po zastosowanej obróbce cieplnej (zbyt duża wartość energii liniowej) sprawia, że sumaryczna wartość deformacji złączy spawanych ręcznie i automatycznie jest porównywalna.
5. Niższe wartości deformacji kątowych próbnym złączach spawanych ze stali 17-4 PH wykonanych metodą spawania automatycznego, podobnie jak w przypadku deformacji spawalniczych analizowanych z wykorzystaniem profilu, w porównaniu do spawania

ręcznego można uzyskać poprzez odpowiedni dobór parametrów technologicznych (energii liniowej).

6. Deformacje kątowe złączy próbnych ze stopu Inconel 718 spawanych metodą automatyczną są mniejsze w porównaniu do deformacji złączy spawanych ręcznie. W przypadku stopu Inconel 718, wpływ parametrów spawania jest zdecydowanie mniejszy na skłonność do odkształceń spawalniczych, w porównaniu do stali 17-4 PH.
7. Sądzić można, że w przypadku stali 17 4- PH metoda spawania nie ma większego wpływu na wartość skurczu poprzecznego. W przypadku spawania ręcznego i automatycznego wartości skurczu poprzecznego są na podobnym poziomie, z wyjątkiem złącza próbnego A.3.
8. Złącza próbne ze stopu Inconel 718 wykonane metodą automatyczną i ręcznie oraz po obróbce cieplnej charakteryzują się około trzykrotnie mniejszą wartością skurczu poprzecznego, co oznacza, że w przypadku tego materiału wpływ obróbki cieplnej na skłonność do deformacji w wyniku skurczu poprzecznego jest większy niż wpływ parametrów technologicznych procesu spawania.
9. Wszystkie analizowane próbne złącza spawane uzyskały pozytywne wyniki badań nieniszczących (wizualnych i penetracyjnych). Złącza spawane wykonane nowo opracowaną metodą automatycznego spawania metodą TIG są jakościowo porównywalne ze złączami spawanymi ręcznie.
10. Analiza złączy ze stali 17-4 PH, wykonanych ręcznie i metodą spawania automatycznego, wskazuje na podobny wpływ cyklu cieplnego procesu spawania na ich mikrostrukturę, z tą różnicą że w strefie wpływu ciepła złącza wykonanego metodą automatyczną stwierdzono mniejszą ilość wydzieleni faz węglkowych. Całkowita szerokość strefy wpływu ciepła w złączu wykonanym metodą automatyczną jest prawie dwukrotnie mniejsza niż w złączu spawanym ręcznie.
11. Zastosowanie obróbki cieplnej złączy ze stali 17-4 PH spowodowało zmniejszenie ilości ferrytu δ . Sądzić można, że efektem tej obróbki było ujednorodnienie (homogenizacja) mikrostruktury.

12. Mikrostruktura złączy ze stopu Inconel 718 spawanych ręcznie lub metodą automatyczną jest podobna. Zdecydowane różnice występują w szerokości obszaru wtopienia oraz całkowitej szerokości strefy wpływu ciepła. Szerokość strefy wpływu ciepła złączy wykonanych ręcznie jest o około 50% większa w porównaniu do złączy spawanych metodą automatyczną.
13. Pomiary twardości próbnych złączy spawanych ze stali 17-4 PH wykazały, że w przypadku spawania automatycznego bez obróbki cieplnej wartości twardości są mniejsze niż po spawaniu ręcznym. W wyniku zastosowania obróbki cieplnej, rozkład twardości w złączu spawanym ulega ujednorodnieniu.
14. Rozkład twardości w złączach ze stopu Inconel 718 spawanych ręcznie lub metodą automatyczną różnią się między sobą. Niższe wartości twardości stwierdzono w przypadku spawania automatycznego.
15. W obu analizowanych przypadkach złączy spawanych, ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718, stwierdzono zgodność z wymaganiami specyfikacji AMS w zakresie uzyskania odpowiedniej twardości. Dotyczy to zarówno spawania ręcznego, jak i metodą automatyczną.
16. Na podstawie wyników badań właściwości mechanicznych próbnych złączy spawanych ze stali 17 4-PH i ze stopu Inconel stwierdzono uzyskanie pełnej zgodności z wymaganiami specyfikacji AMS, stosowanej przy odbiorze części lotniczych w firmie MB Aerospace.

Uzyskane pozytywne wyniki badań wpływu nowo opracowanej technologii automatycznego spawania cienkościennych komponentów silnika lotniczego na zmniejszenie ich deformacji spawalniczych potwierdzają osiągnięcie założonych celów pracy. Wykazano, że poprzez zintegrowane działania, realizowane na wszystkich etapach produkcji cienkościennych złączy spawanych, można zminimalizować naprężenia i wynikające z nich deformacje spawalnicze. Istotnym elementem tej technologii, zwłaszcza z uwagi na wdrożeniowy charakter rozprawy doktorskiej, jest nowo opracowane oprzyrządowanie spawalnicze, które pozwala na minimalizację deformacji spawalniczych cienkościennych

złączy spawanych już na etapie ich spawania. Dodatkowo odpowiedni dobór parametrów technologicznych automatycznego spawania metodą TIG oraz zastosowanie obróbki cieplnej w końcowym etapie wytwarzania cienkościennych części lotniczych, w istotny sposób wpływają na redukcję ich deformacji spawalniczych.

Osiągnięcie założonych celów, naukowego i użytecznego, potwierdza słuszność przyjętej tezy pracy, że poprzez opracowanie technologii spawania cienkościennych komponentów wykonanych ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718, opartej o nowe rozwiązanie konstrukcyjne oprzyrządowania spawalniczego oraz dobór parametrów technologicznych automatycznego spawania metodą TIG wraz z zastosowaną obróbką cieplną po procesie spawania, można zminimalizować ich deformacje spawalnicze oraz obniżyć koszty oraz podnieść jakość prac związanych z montażem silnika lotniczego.

7. PODSUMOWANIE PRACY

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących minimalizacji deformacji spawalniczych cienkościennych elementów stosowanych w budowie silnika lotniczego, wykonanych ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconelm718.

Trójaspektowy charakter wykonanych badań zapewnił osiągnięcie założonych celów, których zwieńczeniem jest wdrożenie w firmie MB Aerospace nowo opracowanej, automatycznej technologii spawania metodą TIG cienkościennych elementów silnika lotniczego. Najistotniejszym elementem tej technologii jest nowo opracowane oprzyrządowanie spawalnicze o konstrukcji zapewniającej minimalizację deformacji spawalniczych już w trakcie procesu spawania. Dalszą redukcję deformacji spawalniczych uzyskano poprzez odpowiedni dobór parametrów technologicznych metody TIG oraz zastosowanie obróbki cieplnej.

Wymiernym efektem doktoratu wdrożeniowego będzie obniżenie kosztów produkcji cienkościennych komponentów silnika lotniczego, poprzez zmniejszenie liczby braków oraz ilości prac naprawczych niezbędnych do uzyskania wysokiej jakości prac montażowych silnika lotniczego realizowanych w firmie MB Aerospace.

Streszczenie

Praca doktorska dotyczy zagadnień związanych z technologią spawania cienkościennych elementów silników lotniczych, wykonanych ze stali nierdzewnej 17-4 PH oraz ze stopu niklu Inconel 718. Głównym celem pracy była analiza wpływu parametrów technologicznych spawania cienkościennych elementów na ich deformację. Przedstawione rozwiązania obejmują zarówno opracowanie nowatorskiego oprzyrządowania spawalniczego, jak i precyzyjny dobór parametrów technologicznych dla metody TIG (spawanie łukowe w osłonie gazów ochronnych).

W pierwszej części pracy omówiono materiały stosowane w budowie silników lotniczych, ze szczególnym uwzględnieniem stali wysokostopowych oraz stopów niklu. Następnie przeanalizowano metody spawania. Kolejna część pracy poświęcona jest problemom związanym z naprężeniami i deformacjami spawalniczymi, w tym ich powstawaniu, przewidywaniu oraz metodom redukcji.

W dalszej części pracy przeprowadzono własne badania eksperymentalne, których celem było zweryfikowanie skuteczności zaproponowanych rozwiązań. Badania obejmowały dobór parametrów procesu, opracowanie oprzyrządowania, a także stanowiska do automatycznego spawania metodą TIG. Wykonano próby spawania, a następnie przeprowadzono pomiary i analizy złączy próbnych, obejmujące badania nieniszczące, obróbkę cieplną oraz badania niszczące, takie jak analiza mikrostruktury, pomiary twardości i ocena właściwości mechanicznych.

Uzyskane pozytywne wyniki badań wpływu nowoopracowanej technologii automatycznego spawania cienkościennych komponentów silnika lotniczego na zmniejszenie ich deformacji spawalniczych potwierdzają osiągnięcie założonych celów pracy. Wykazano, że poprzez zintegrowane działania, realizowane na wszystkich etapach produkcji cienkościennych złączy spawanych, można zminimalizować naprężenia i wynikające z nich deformacje spawalnicze. Istotnym elementem tej technologii, zwłaszcza z uwagi na wdrożeniowy charakter rozprawy doktorskiej, jest nowoopracowane oprzyrządowanie spawalnicze, które pozwala na minimalizację deformacji spawalniczych cienkościennych złączy spawanych już na etapie ich spawania. Dodatkowo odpowiedni dobór parametrów technologicznych automatycznego spawania metodą TIG oraz zastosowanie obróbki cieplnej w końcowym etapie wytwarzania cienkościennych części lotniczych, w istotny sposób wpływają na redukcję ich deformacji spawalniczych.

Osiągnięcie założonych celów, naukowego i użytkowego, potwierdza słuszność przyjętej tezy pracy, że poprzez opracowanie technologii spawania cienkościennych komponentów wykonanych ze stali 17-4 PH i ze stopu Inconel 718, opartej o nowe rozwiązanie konstrukcyjne oprzyrządowania spawalniczego oraz dobór parametrów technologicznych automatycznego spawania metodą TIG wraz z zastosowaną obróbką cieplną po procesie spawania, można zminimalizować ich deformacje spawalnicze oraz obniżyć koszty oraz podnieść jakość prac związanych z montażem silnika lotniczego.

Summary

The doctoral dissertation addresses issues related to the welding technology of thin-walled aircraft engine components made of 17-4 PH stainless steel and Inconel 718 nickel alloy.

The main objective of the study was to analyze the impact of technological welding parameters on the deformation of these thin-walled components. The proposed solutions include both the development of innovative welding fixtures and the precise selection of technological parameters for the TIG (Tungsten Inert Gas) method.

The first part of the dissertation discusses the materials used in aircraft engine construction, with a particular focus on high-alloy steels and nickel alloys. Subsequently, an analysis of welding methods is presented.

The next section of the work is dedicated to issues related to welding stresses and deformations, including their formation, prediction, and methods of reduction.

In the subsequent part of the dissertation, experimental research was conducted to verify the effectiveness of the proposed solutions. The research included the selection of process parameters, the development of fixtures, as well as the setup for semi-automatic TIG welding. Welding trials were performed, followed by measurements and analyses of the test joints. This included non-destructive testing, heat treatment, and destructive testing such as microstructure analysis, hardness measurements, and evaluation of mechanical properties.

The positive results obtained from the research confirm that the newly developed technology for semi-automatic welding of thin-walled aircraft engine components significantly reduces welding deformations. It was demonstrated that through integrated actions at all stages of the production of thin-walled welded joints, welding stresses and resulting deformations can be minimized. A crucial element of this technology, especially considering the implementation nature of the doctoral thesis, is the newly developed welding fixture, which minimizes welding deformations at the welding stage itself.

Additionally, the appropriate selection of technological parameters for semi-automatic TIG welding, along with the application of heat treatment at the final stage of manufacturing thin-walled aircraft parts, significantly influences the reduction of welding deformations.

The achievement of the scientific and utilitarian objectives confirms the thesis of the dissertation: that by developing a welding technology for thin-walled components made of 17-4 PH stainless steel and Inconel 718 alloy, based on an innovative welding fixture design

and selecting technological parameters for semi-automatic TIG welding, followed by post-weld heat treatment, it is possible to minimize welding deformations, reduce costs, and improve the quality of work related to aircraft engine assembly.

Literatura

- 1 S.M.O. Tavares, J.F. dos Santos i P.M.S.T. de Castro. Friction stir welded joints of Al–Li Alloys for aeronautical applications: butt-joints and tailor welded blanks. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2013, vol. 65.
- 2 Sérgio M. O. Tavares: Design and advanced manufacturing of aircraft structures using friction stir welding. University of Porto. Faculty of Engineering. Doctoral Dissertation, 2011, 1-6.
- 3 R. Petrescu, R. Aversa, B. Akash, F. Petrescu; Modern Propulsions for Aerospace-A Review; January 2017, 1-4.
- 4 Federal Aviation Administration. *Airplane Flying Handbook (FAA-H-8083-3A)*. Skyhorse Publishing Inc. 2011, dział 16.
- 5 Gurrappa, I.; Yashwanth, I.V.S. Design and Development of Smart Coatings for Gas Turbines. *Gas Turbines 2010*, 65-78.
- 6 Reed R. C., *The Superalloys Fundamentals and Applications*, Cambridge, New York, 2006, 1-6, 236-240.
- 7 R. Jha, G. S. Dulikravich, F. Pettersson, N. Chakraborti: A Combined Experimental-Computational Approach to Design Optimization of High Temperature Alloys, Conference: ASME 2014 Symposium on Elevated Temperature Application of Materials for Fossil, Nuclear, and Petrochemical Industries, March 2014, 1-11.
- 8 Strona internetowa: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/customers/bb-agema-simcenter/71065/>.
- 9 Zhang, Ch.; Li, H.; Yang, J.; Lu, H.; Su, P. Research on Model Slice and Forming Method of Thin-walled Parts. *E3S Web of Conferences 2021*, Vol. 233. EDP Sciences.
- 10 H. Zhang, M. Zhan, Z. Zheng, R. Li, F. Ma, X. Cui, S. Chen, Y. Lei: Forming dependence on spin roller paths for thin-walled complex components from 2195 Al-Li alloy TWBs. *Int J Adv Manuf Technol 2022*, 120, 3113–3122.
- 11 N. Eswara Prasad, R. J. H. Wanhill: *Aerospace Materials and Material Technologies*, Volume 1, Indian Institute of Metals Series, Singapore 2017, 173-202.
- 12 S. J. Rosenberg: *Nickel and Its Alloys*, Monograph 106, National Bureau of Standards, 1968.
- 13 J. Everhart: *Engineering Properties of Nickel and Nickel Alloys*, Springer Science & Business Media, 6 grudzień 2012, 59-147.

- 14 J. J. Vagi, R. M. Evans, and D. C. Martin, Nasa: Welding of precipitation-hardening stainless steels; metals, ceramics, and materials, 1968, 155-159.
- 15 J. Nowacki: Weldability of 17-4 PH stainless steel in centrifugal compressor impeller applications; Journal of Materials Processing Technology 157–158 (2004) 578–583.
- 16 S. M. Hosseini Farzaneh, M. Belbasi: Effects of Shielding Gas on the Depth, Width and Hardness of 17-4PH Stainless Steel during TIG Welding. Journal of Environmental Friendly Materials 2020, 4(1), 25-29.
- 17 Abdel Salam Hamdy Makhlouf, Mahmood Aliofkhaezai (red.): Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry, Elsevier, 2016, 354-355.
- 18 C.N. Hsiao, C.S. Chiou, J.R. Yang: Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel; Materials Chemistry and Physics Volume 74, Issue 2, 1 March 2002, 134-142
- 19 MB Aerospace sp. z o.o. Rzeszów, ul. Przemysłowa 9B.
- 20 A. S. Prabhakar, M. Agilan, T. Venkateswaran, D. Sivakumar, P. G. Venkatakrishnan: Effect of post weld heat treatment on mechanical properties of 17-4-PH stainless steel welds. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 2022, Vol. 53, 946, 947.
- 21 S. A. Mousavi, A. R. Sufizadeh: Metallurgical investigations of pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 321 and AISI 630 stainless steels. Materials & Design 2009, 30(8), 3150-3157.
- 22 W. Liu, J. Ma, M. M. Atabaki, R. Pillai, B. Kumar, U. Vasudevan, H. Sreshta, R. Kovacevic: Hybrid laser-arc welding of 17-4 PH martensitic stainless steel. Lasers in Manufacturing and Materials Processing 2015, 2, 74-90.
- 23 A. Ziewiec, A. Zielińska-Lipiec, E. Tasak: Microstructure of welded joints of X5CrNiCuNb16-4 (17-4 PH) martensitic stainless steel after heat treatment. Archives of metallurgy and materials 2014, 59(3), 965-970.
- 24 Specfikacje SAE International. Aerospace Material Specification.
- 25 J. Graneix, Jean-Denis Beguin, F. Pardheillan, Joël Alexis i Talal Masri: Weldability of the superalloys Haynes 188 and Hastelloy X by Nd:YAG; Eurosuperalloys, 2014, 1-6.
- 26 J. C. Lippold, S. D. Kiser, N. John: Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys, DuPont, John Wiley & Sons, 2011, rozdział 3.5.

- 27 W. F. Smith: Structure and properties of engineering alloys, 2nd ed. McGraw-Hill: New York; 1993, 1-160.
- 28 Gobbi S et al; High powder CO₂ and Nd-YAG laser welding of wrought Inconel 718. J Mater Process Technol; 1996, 333-345.
- 29 S. Bryła: the first arc-welded bridge in Europe; Inżynier; Polska, 1920, 3-8.
- 30 P. F. Mendez, T. W. Eagar, Welding processes for aeronautics; Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, Advanced materials & processes, 2001, 38-43.
- 31 Eagar, T.W., Energy Sources Used for Fusion Welding, in ASM Handbook, ASM International. 1993, 3-6.
- 32 F. Patricio, Mendez & Thomas W. Eagar: "New trends in welding in the aeronautic industry" in Conference of New Manufacturing Trends, 2002, 2-7.
- 33 M. St. Węglowski, S. Blacha, A. Phillips: Electron beam welding – Techniques and trends – Review ; Institute of Welding, Gliwice, Poland, 2016, 1-80.
- 34 G. Senthil Kumar, U. Natarajan, T. Veerarajan, i S. S. Ananthan: Quality level assessment for imperfections in GMAW; WELDING JOURNAL, 2014, 85-87.
- 35 P. Subramani i M. Manikandan: Development of gas tungsten arc welding using current pulsing technique to preclude chromium carbide precipitation in aerospace-grade alloy 80A; Volume 26, , 2019, 210–221.
- 36 A. Zavadski: Advanced welding technologies used in aerospace industry, Saimaa University of Applied Sciences, Department of Technology, Lappeenranta; 2018, 14-18.
- 37 M. Uliasz, A. Ornat, A. Burghardt, M. Muszyńska, D. Szybicki, K. Kurc; Automatic Evaluation of the Robotic Production Process for an Aircraft Jet Engine Casing; MDPI, 2022, 1-16.
- 38 U.S. NAVY Nonresident training course, Gas Tungster Arc Welding, NAVEDTRA 14250A, 1996, rozdział 3.
- 39 L. M. Gour: Podstawy technologii spawalniczych. Warszawa: WNT, 1997, 38-46.
- 40 J. Dworak: Spawanie wiązką elektronów – 50 lat doświadczeń Instytutu Spawalnictwa, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa vol 59, 2015, 123-126.
- 41 Bishub Choudhury, M. Chandrasekaran: Investigation on welding characteristics of aerospace materials – A review , 2017, 7521-7524.
- 42 A. Kaur, C. Ribton, W. Balachandaran: Electron beam characterization methods and

- devices for welding equipment, Elsevier, 2015, 1-9.
- 43 T. Böllinghaus: Manufacturing Engineering, in K.H. Grote. E.K. Antonsson (Eds.): Springer handbook of mechanical engineering. Germany: Springer 2009.
- 44 K. ADAMUS, P. LACKI, A. DUDEK: Analiza naprężeń i deformacji w cienkich blachach tytanowych podczas spawania wiązką elektronów, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2014, 113-126.
- 45 J. Pilarczyk, M. St. Węglowski; Spawanie wiązką elektronów; Przegląd spawalnictwa Vol. 87 2015, 125-126.
- 46 Fu Pengfei, M. Zhiyong, Z. Congjin, W. Yajun, W. Chunming; Microstructures and fatigue properties of electron beam welds with beam oscillation for heavy section TC4-DT alloy, ResearchGate, 2013.
- 47 Strona www: Steigerwald Strahltechnik GmbH; www.sst-ebeam.com
- 48 Z. Minko; Nie tylko spawanie łukowe; Polska Izba Konstrukcji Stalowych, Konstrukcje Stalowe tom 5, 2022, 33-35.
- 49 Volker A., Uwe C., Dobeneck D.: Electron beam welding. The fundamentals of a fascinating technology. Pro-beam AG & Co.KG&A, 2011.
- 50 Strona www: TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, Cambridge, UK - www.twi-global.com.
- 51 S. Boukhalfa, Y. Feng, Chapter 1 – The impact of additive manufacturing on the supply chain, Aerospace and Defense, PRESCOUTER, 2020, 9-11.
- 52 J. Blackburn , TWI Ltd: Laser welding of metals for aerospace and other applications; Woodhead Publishing Limited, 2012, 75-92.
- 53 Strona www: The aerospace industry is a heavy user of fiber laser welding. www.laserwobblewelding.com.
- 54 Hee-Je Kima, Eun-Soo Kimb, Dong-Hoon Lee; The development of a high repetitive and high power Nd:YAG laser by using a zero-current switching resonant converter; Optics & Laser Technology, 1998, 199-203.
- 55 W.J. Wittemana; The CO₂ Laser; Springer Series in Optical Sciences, 1987, 1-309
- 56 M. B. Balajaddeh, H. Naffakh-Moosavy; Pulsed Nd:YAG laser welding of 17-4 PH stainless steel: Microstructure, mechanical properties, and weldability investigation; Elsevier, 2019, 1-15.
- 57 M. Tayebi, H. M. Soltani, A. Rajaei; Laser Welding; 2022, 2-4.
- 58 E. Schubert, M. Klassen, I. Zerner, C. Walz, G. Sepold: Light-weight structures

- produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry; *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 115, Issue 1, 22 August 2001, 2-8.
- 59 Junjie Ma, Mehdi Mazar Atabaki, Wei Liu, Raju Pillai, Biju Kumar, Unnikrishnan Vasudevan, Radovan Kovacevic; Laser-based welding of 17-4 PH martensitic stainless steel in a tubular butt joint configuration with a built-in backing bar; *Optics & Laser Technology*, Elsevier, 2016, 1-15.
- 60 S. Katayama, M. Mizutani, A. Matsunawa: Development of porosity prevention procedures during laser welding, *Proceedings of the First international Symposium on High-Power Laser Macroprocessing (SPIE)*, 2003, 1.
- 61 J. Chen: Modelling of Laser Welding of Aluminium using COMSOL Multiphysics; *SWEDEN 2020*, 3-8.
- 62 J. Czuchryj, Kurs IWE – Naprężenia i odkształcenia spawalnicze, IS Gliwice.
- 63 Department of Manufacturing and Engineering Systems, Brunel University, D. W. A. Rees; *Basic Stress and Strain*. In: *Basic Solid Mechanics*. Palgrave, London, 1997.
- 64 H. Long, D. Gery, A. Carlier , P.G. Maropoulos: Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates, Elsevier, 2009, 4126–4135.
- 65 Yan Li, Chen Su, Ling Wang and Chuansong Wu: A convenient unified model to display the mobile keyhole-mode arc welding process, *MDPI*, 2020, 1-17.
- 66 Lei Xiaoa, Ding Fana,b, Jiankang Huang: Tungsten cathode-arc plasma-weld pool interaction in the magnetically rotated or deflected gas tungsten arc welding configuration; *Journal of manufacturing processes*, Elsevier, 2018, 127-137.
- 67 J. Pilarczyk i inni: *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo, cz. 1 i 2*, WNT, Warszawa, 2021.
- 68 Dean Deng, FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects; *Japan* ,Elsevier, 2008, 359-366.
- 69 Chunbiao Wua, Jae-Woong Kimb; Analysis of welding residual stress formation behavior during circumferential TIG welding of a pipe; *Thin-Walled Structures* Volume 132, 2018, 421-430.
- 70 A. S. Sabau, W. D. Porter: Alloy shrinkage factors for the investment casting of 17-4PH stainless steel parts; *Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 2008, 317-330.

- 71 R I Suleimanov, L Z Zainagalina, M Ya Khabibullin, L M Zaripova, N O Kovalev; Studying heat-affected zone deformations of electric arc welding; *Materials Science and Engineering*, 2018, 1-7.
- 72 M. Deo; Minimization of bowing distortion in welded stiffeners using differential heating; *Woodhead Publishing Limited*, 2011, 169-183.
- 73 Y. Liu, P. Wang, H. Fang, N. Ma: Mitigation of residual stress and deformation induced by TIG welding in thin-walled pipes through external constraint. *Journal of Materials Research and Technology* 2021, 15, 4636-4651.
- 74 C. Rubio-Ramirez, D. F. Giarollo, J. E. Mazzaferro, C. P. Mazzaferro: Prediction of angular distortion due GMAW process of thin-sheets Hardox 450® steel by numerical model and artificial neural network. *Journal of Manufacturing Processes* 2021, 68, 1202-1213.
- 75 P. Michaleris; Introduction to welding residual stress and distortion; *Woodhead Publishing Limited*, 2011, 3-21.
- 76 M. Mróz, B. Kucel, P. Rąb, S. Olszewska; Study of the TIG welding procedure of thin-walled components made of 17-4PH steel in the aspect of weld distortion distribution; *MDPI*, 2023, 1-22.
- 77 Mróz, M.; Czech, R.; Kupiec, B.; Dec, A.; Spólnik, M.; Rąb, P. Numerical and Physical Simulation of MAG Welding of Large S235JRC+N Steel Industrial Furnace Wall Panel. *Materials* 2023, 1-22
- 78 Solfronk, P.; Sobotka, J.; Bukovská, Š.; Bradáč, J. Experimental and Numerical Analysis of the Residual Stresses in Seamed Pipe in Dependence on Welding and Metal Forming. *Materials* 2023, 1-26.
- 79 D. N. Tien: Numerical simulation for determination of temperature field and residual stress of stainless steel butt joints with and without clamping, *Vietnam Journal of Science and Technology* 2022, 713-725.
- 80 A. Capriccioli, P. Frosi: Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation. *Fusion engineering and Design* 2009, 546-553.
- 81 A. K. Unni, M. Vasudevan: Computational fluid dynamics simulation of hybrid laser-MIG welding of 316 LN stainless steel using hybrid heat source. *International Journal of Thermal Sciences* 2023, 185.
- 82 G. Satyanarayana, K. L. Narayana, B. N. Rao: Incorporation of Taguchi approach with CFD simulations on laser welding of spacer grid fuel rod assembly. *Materials*

- Science and Engineering: B 2021, 269.
- 83 A. P. Chou, G. Shi, C. Liu, L. Zhou: Residual stress and compression buckling of large welded equal-leg steel angles. *Journal of Constructional Steel Research* 2023, 201.
- 84 Saternus Z., Piekarska W., Kubiak M., Domański T., Goszczyńska-Króliszewska D.: Numerical estimation of temperature field in a laser welded butt joint made of dissimilar materials. *MATEC Web of Conferences Vol. 157*, 2018, 2043.
- 85 R. A. Adewuyi, J. O. Aweda: Modeling and simulation of welding temperature fields in Cr-Mo steel bar. *European Journal of Materials Science and Engineering* 2021, 3-18
- 86 M. Slováček, T. Kik: Use of Welding process numerical analyses as Technical support in industry. part 1: Introduction to Welding process numerical simulations. *Biul. Inst. Spaw.* 2015, 26-28.
- 87 S. V. Eva, I. Marques, J. G. Francisco Silva I A. B. Pereira: Comparison of Finite Element Methods in Fusion Welding Processes—A Review, *Metals* 2020, 1-19.
- 88 Lindgren, L.-E. Finite Element Modeling and Simulation of Welding. Part 1: Increased Complexity; *J. Therm. Stresses*, 2001, 24, 141–192.
- 89 Lindgren, L.-E. Finite Element Modeling and Simulation of Welding. Part 2: Improved Material Modeling. *J. Therm. Stresses* 2001, 24, 195–231.
- 90 Norma PN-EN 1011-1:2009 „Spawanie-Zalecenia dotyczące spawania metali- Część 1: Ogólne wytyczne dotyczące spawania łukowego”.], PKN, 2009.
- 91 D. Radaj: Heat Effects of Welding, rozdział Reduction of welding residual stresses and distortion; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1992, 247-248.
- 92 A. Ambroziak; Techniki wytwarzania spawalnictwo; Politechnika Wrocławska, Wrocław 2010, 169-190.
- 93 M. Deo: Minimization of bowing distortion in welded stiffeners using differential heating; Woodhead Publishing Limited, 2011, 169-184.
- 94 Jakubiec Marian, Lesiński Krzysztof, Henryk Czajkowski - Technologia konstrukcji spawanych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1987.
- 95 Tae-Jun Kim¹, Beom-Seon Jang² and Sung-Wook Kang: Welding deformation analysis based on improved equivalent strain method to cover external constraint during cooling stage, Seoul, Korea 2015, 805-816.
- 96 J. Kozak, J. Kowalski: The influence of manufacturing oversizing on postwelding

- distortions of the fillet welded joint, Gdańsk Univeristy of Technology, Poland, 2015, 59-63.
- 97 J. Sun, K. Dilger : Influence of welding sequence and external restraint on buckling distortion in thin-plate arc-welded joints; *Journal of Advanced Joining Processes*, 8, 2023, 1-9.
- 98 P. Colegrove,C. Ikeagu,A. Thistlethwaite,S. Williams,T. Nagy,W. Suder I inni: Welding process impact on residual stress and distortion, *Science and Technology of Welding and Joining Volume 14*, 2009 - Issue 8, 717-725.
- 99 Murat Vural: The effect of welding fixtures on welding distortions; *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering* · January 2007.
- 100 V.D. Kalyankar a, P. Shah: A review on methodologies to reduce welding distortion; *Materials Today: Proceedings 5* , Elsevier, 2018, 511-514.
- 101 K-Y Bae, S-J Na: A Study of the Effect of Pre-Straining on Angular Distortion in One-Pass Fillet Welding Incorporating Large Deformation Theory; *Freie Universitaet Berlin*, 2016, 401-409.
- 102 J. Yuan, H. Ji, Y. Zhong, G Cui, L Xu, X. Wang: Effects of Different Pre-Heating Welding Methods on the Temperature Field, Residual Stress and Deformation of a Q345C Steel Butt-Welded Joint; *Materials*, 2023, 2-8.
- 103 S. Seddighi1, F. Ostovan, E. Shafiei1, M. Toozandehjani: A study on the effect of stress relief heat treatment on the microstructure and mechanical properties of dissimilar GTAW weld joints of Inconel 625 and A106 carbon steel; *Materials Research Express*, 2019, 2-15
- 104 P. Colegrove, C. Ikeagu, A. Thistlethwaite, S. Williams, T. Nagy, W. Suder, A. Steuwer, T. Pirling: Welding process impact on residual stress and distortion, *Science and Technology of Welding & Joining* · November 2009, 717-726.
- 105 M. Chaturvedi, *Welding and joining of Aerospace materials*, Second edition, Elsevier 2021, 199-275.
- 106 K. Ferenc, *Spawalnictwo*, PWN, WNT, 2016, 96-120.
- 107 D. H. Philips, *Welding Engineering An introduction*, John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- 108 Polysoude P6 CW. Operating, maintenance and programming manual PN-0509076.
- 109 Polysoude, *The orbital welding handbook*; PN-0509078; Published by Polysoude, Nantes, Fr, 2009.
- 110 *Specyfikacja AWS D17.1 Specification for Fusion Welding for Aerospace*

- Applications; American National Standard; 2017.
- 111 ASTM E1417/E1417M – 21E01 Standard Practice for Liquid Penetrant Testing; ASTM International; Listopad 2021.
 - 112 G. Janaki Ram, A. Venugopal Reddy, K. Prasad Rao, G. Madhusudhan Reddy: Control of Laves phase in Inconel 718 GTA welds with current pulsing; Science and Technology of Welding and Joining, 2004.
 - 113 S. Mahajan , C.S. Pande , M.A. Imam , B. Rath: Formation of annealing twins in f.c.c. crystals; Acta Materialia, Volume 45, Issue 6, Pages 2633-2638, 1997.
 - 114 M.L. Hernández-Rodríguez, M. J. Soria-Aguilar, J.L. Acevedo-Dávila, R.R. Ambriz-Rojas, F. F. Curiel-López: Welding input effect on the corrosion behavior and microstructure of heat treated GTAW welds of Inconel 718; International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE, 2019.
 - 115 R. Cortés, E. R. Barragán, V. H. López, R. R. Ambriz, D. Jaramillo: Mechanical properties of Inconel 718 welds performed by gas tungsten arc welding; Springer-Verlag London Ltd. 2017.
 - 116 G. D. Janaki Ram, A. Venugopal Reddy, K. Prasad Rao, G. Madhusudhan Reddy: Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 electron beam welds; Materials Science and Technology, 2005.
 - 117 K. Wojsyk, M. Macherzyński: Determination of Welding Linear Energy by Measuring Cross-Sectional Areas of Welds; Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, No 5, 2016.

Spis rysunków

RYS. 1. SILNIK TURBOODRZUTOWY [3].....	7
RYS. 2. PRZEKRÓJ ZAAWANSOWANEGO SILNIKA TURBOWENTYLATOROWEGO ROLLS-ROYCE [6]	8
RYS. 3. WPŁYW TEMPERATURY PRACY NA WYTRZYMAŁOŚĆ STOPÓW [7].....	8
RYS. 4. SYMULACJA CHŁODZENIA ŁOPATKI TURBINY GAZOWEJ (SIEMENS) [8].....	9
RYS. 5. PRZYKŁADOWY PRZEBIEG UTWARDZANIA WYDZIELENIOWEGO STALI 17-4 PH [19]	14
RYS. 6 ZMIENNOŚĆ GRANICY PLASTYCZNOŚCI W TEMPERATURZE 650 °C Z CAŁKOWITYM UDZIAŁEM FAZ WZMACNIAJĄCYCH γ' I γ'' DLA WYBRANYCH STOPÓW NIKLU [6]	18
RYS. 7. PRZYKŁADOWY PRZEBIEG UTWARDZANIA WYDZIELENIOWEGO STOPU INCONEL 718 [19]	20
RYS. 8. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE W PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE W KRÓTKIM CZASIE KILKU STOPÓW NIKLOWO-CHROMOWYCH [13].....	20
RYS. 9. PROCESY SPAWANIA WG INTENSYWNOŚCI ŹRÓDŁA CIEPŁA [32]	22
RYS. 10. GEOMETRIA ZŁĄCZA DOCZOŁOWEGO WYKONANEGO RÓŻNYMI METODAMI SPAWANIA [33]	22
RYS. 11. ROZMIAR STREFY WPŁYWU CIEPŁA, W ZALEŻNOŚCI OD MOCY ŹRÓDŁA ENERGII [30] .	23
RYS. 12. PORÓWNANIE ODKSZTAŁCENIA KĄTOWEGO PO SPAWANIU WIĄZKĄ ELEKTRONÓW I METODĄ TIG [30].....	23
RYS. 13. WYDAJNOŚĆ PROCESÓW SPAWANIA, PORÓWNANA Z KOSZTAMI WYPOSAŻENIA [30] ..	23
RYS. 14. PODZIAŁ MATERIAŁÓW WYKORZYSTANYCH DO BUDOWY SILNIKA LOTNICZEGO GENERAL ELECTRIC [36].....	24
RYS. 15. SPAWANIE ELEKTRODĄ NIETOPLIWĄ W OSŁONIE GAZÓW OBOJĘTNYCH TIG (GTAW) [38]	25
RYS. 16. SCHEMAT ODDZIAŁYWANIA WIĄZKI ELEKTRONÓW Z POWIERZCHNIĄ MATERIAŁU [45]	27
RYS. 17. SIŁY UTRZYMUJĄCE KANAŁ W RÓWNOWADZE, F1– ODRZUT PAR MATERIAŁU, F2 – CIŚNIENIE PAR W KANAŁE, F3 – SIŁA TARCIA MIĘDZY STRUMIENIEM PAR A WARSTWĄ CIEKŁĄ, F4 – NAPIĘCIE POWIERZCHNIOWE, F5 – SIŁA ELEKTROMAGNETYCZNA, F6 –SIŁA TERMOKAPILARNA (WSKUTEK RÓŻNICY TEMPERATUR MIĘDZY TYLNA I PRZEDNIĄ ŚCIANKĄ KANAŁU), F7 – CIŚNIENIE ELEKTRONÓW, F8 – CIŚNIENIE HYDROSTATYCZNE, F9 – SIŁA TERMOKAPILARNA (WSKUTEK GRADIENTU TEMPERATURY NA PRZEDNIEJ ŚCIANCE), F10 – NAPIĘCIE POWIERZCHNIOWE [45, 37].....	27

RYS. 18. PRZEKRÓJ SPOINY WYKONANEJ METODĄ EBW (A) BEZ OSCYLACJI, (B) Z OSCYLACJĄ [46]	28
RYS. 19. ETAPY UZYSKANIA GŁĘBOKIEGO WTOPIENIA [47]: A - WYSOKA KONCENTRACJA ENERGII W MIEJSCU WIĄZKI TOPI MATERIAŁ, B - MATERIAŁ PARUJE W ŚRODKU, C - WIĄZKA WNIKA GŁĘBIJ W OBRABIANY PRZEDMIOT POPRZECZ UTWORZONY KANAŁ PAROWY, D - PODCZAS PRZESUWANIA PRZEDMIOTU OBRABIANEGO STOPIONY MATERIAŁ PRZEPIŃKA OD PRZODU DO TYŁU, WOKÓŁ KANAŁU PAROWEGO I KRZEPNIE	28
RYS. 20. SPAWANIE AUTOMATYCZNE OBUDOWY ŁOŻYSKA PRZEDNIEGO [49]	29
RYS. 21. ŁOPATKI TURBINY NISKOCIŚNIENIOWEJ (LTP) SILNIKA GE9X [51]	30
RYS. 22. SCHEMAT WYTWARZANIA WIĄZKI LASEROWEJ [57]	31
RYS. 23. FORMOWANIE DZIURKI OD KLUCZA I SPAWANIE LASEROWE W TRYBIE DZIURKI OD KLUCZA [57]	32
RYS. 24. PROFILE SPOIN WYKONANYCH LASEREM, METODĄ DZIURKI OD KLUCZA Z MATERIAŁU Ti-6Al-4V, (A) O GRUBOŚCI 9,3 MM I (B) O GRUBOŚCI 3,2 MM. UWAGA: RÓŻNE SKALE. DZIĘKI UPRZEJMOŚCI TWI LTD [52]	33
RYS. 25. PRZEKRÓJ POŁĄCZENIA ALUMINIUM-STAL [58]	33
RYS. 26. SCHEMATYCZNY WIDOK WPŁYWU PRZEPIŃKA PŁYNU NA POWSTAWANIE PĘCHERZYKÓW PODCZAS SPAWANIA LASEROWEGO PRZY RÓŻNYCH PRĘDKOŚCIACH: (A) NISKA PRĘDKOŚĆ SPAWANIA, (B) ŚREDNIA PRĘDKOŚĆ SPAWANIA I (C) DUŻA PRĘDKOŚĆ SPAWANIA [61]	34
RYS. 27. ROZKŁAD TEMPERATUR ORAZ STRUMIEŃ PRZEPIŃKA PLAZMY W ŁUKU I JEZIORKU SPAWALNICZYM [65]	36
RYS. 28. POLA TEMPERATUROWE W ŁUKU I ELEKTRODZIE GTAW Z ETMF [66]	36
RYS. 29. ROZKŁAD TEMPERATUR WOKÓŁ ŹRÓDŁA CIEPŁA SPAWANIA [67]	37
RYS. 30. MECHANICZNO-FIZYCZNE WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU, W ZALEŻNOŚCI OD JEGO TEMPERATURY [68]	38
RYS. 31. WŁAŚCIWOŚCI STALI WĘGLOWEJ AH36 [69]	39
RYS. 32. SCHEMATYCZNY DIAGRAM ZMIANY OBJĘTOŚCI W WYNIKU PRZEMIANY FAZOWEJ (STAL WĘGLOWA) [68]	40
RYS. 33. ZMIERZONA LINIOWA ROZSZERZALNOŚĆ CIEPLNA ODLEWU ZE STOPU 17-4PH [70] ...	40
RYS. 34. ZMIANY STRUKTURY STALI 17-4PH PODCZAS SYMULACJI PROCESU PRZESYCANIA [19]	42
RYS. 35. STRUKTURA STREFY WPŁYWU CIEPŁA (SWC) [71]	42
RYS. 36. RODZAJE SKURCZU SPAWALNICZEGO I DEFORMACJI SPAWALNICZYCH [75]	44

RYS. 37. ZALEŻNOŚCI W SYMULACJACH SPAWANIA [87]	46
RYS. 38. SYMULACJA SPAWANIA OBWODOWEGO TIG: A) MES (FEM) MODEL [69].....	47
RYS. 39. SYMULACJA SPAWANIA OBWODOWEGO TIG: WŁAŚCIWOŚCI STALI NISKOWĘGLOWEJ AH36 [69].....	47
RYS. 40. SYMULACJA SPAWANIA OBWODOWEGO TIG: OSIOWE NAPRĘŻENIA SZCZĄTKOWE NA ZEWNĘTRZNEJ POWIERZCHNI RUR [69]	48
RYS. 41. SYMULACJA SPAWANIA OBWODOWEGO TIG: CHARAKTERYSTYKA KOŃCOWEGO OSIOWEGO NAPRĘŻENIA SZCZĄTKOWEGO W POBLIŻU POZYCJI ZATRZYMANIA SPOINY [69]	48
RYS. 42. WYGIĘCIE USZTYWNIENIA PO ZESPAWANIU, PRÓBKA SCZEPIANA WSTĘPNIE [93].....	51
RYS. 43. NOMOGRAM DO OKREŚLANIA ZNIEKSZTAŁCENIA KĄTOWEGO B [94].....	52
RYS. 44. ALGORYTM DEFORMACJI SPAWALNICZEJ [95]	52
RYS. 45. KSZTAŁT PRÓBNEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO OBWODOWO	58
RYS. 46. WYCIĘTE PASY BLACHY	58
RYS. 47. WALCARKA DO BLACHY (ZWIJARKA)	58
RYS. 48. WIDOK PRZYRZĄDU DO SPAWANIA WZDŁUŻNEGO BLACH	59
RYS. 49. SPOSÓB MOCOWANIA BLACH W PRZYRZĄDZIE DO SPAWANIA WZDŁUŻNEGO	59
RYS. 50. WIDOK PRÓBKI PRZYGOTOWANEJ DO WYKONANIA PRÓBNEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO.	60
RYS. 51. STANOWISKO DO SPAWANIA AUTOMATYCZNEGO METODĄ TIG	60
RYS. 52. ŹRÓDŁO PRĄDU POLYSOUDE P6 [108, 109].....	61
RYS. 53. FUNKCJE STEROWANIA PRĄDEM NA TABLICY ZASILACZA POLYSOUDE P6 CW [109].	63
RYS. 54. RODZAJE PRĄDÓW SPAWANIA [108]	63
RYS. 55. SCHEMAT DZIAŁANIA FUNKCJI WYGASZANIA ŁUKU (DOWNSLOPE) [108]	64
RYS. 56. SCHEMATYCZNE PRZEDSTAWIENIE FUNKCJI OBROTU UCHWYTU SPAWALNICZEGO (STOŁU) [108].....	64
RYS. 57. SCHEMAT PROGRAMOWANIA PRĘDKOŚCI PODAWANIA MATERIAŁU DODATKOWEGO [108]	65
RYS. 58. SCHEMAT PROGRAMOWANIA FUNKCJI KONTROLI WYSOKOŚCI ELEKTRODY AVC [108]	65
RYS. 59. UKŁAD KRZYŻOWY POZWALAJĄCY NA KONTROLĘ WYSOKOŚCI ELEKTRODY.....	66
RYS. 60. PRZYKŁAD PROGRAMU SPAWANIA, BEZ MATERIAŁU DODATKOWEGO, AVC I OSCYLACJI [108].....	67
RYS. 61. STÓŁ OBROTOWY, DWUOSIOWY O NOŚNOŚCI 500 KG.....	68
RYS. 62. POMIAR WARTOŚCI KĄTA POCHYLENIA STOŁU OBROTNIKA	68

RYS. 63. ZMIANA SZEROKOŚCI CZĘŚCI SPAWANEJ NA RÓŻNYCH ETAPACH PRODUKCJI: A – SZEROKOŚĆ CZĘŚCI PRZED SPAWANIEM, B - SZEROKOŚĆ CZĘŚCI PO SPAWANIU, C – SZEROKOŚĆ CZĘŚCI PO OBRÓBCE CIEPLNEJ, D – SZEROKOŚĆ CZĘŚCI PO OBRÓBCE MECHANICZNEJ (LINIĄ CZERWONĄ OZNACZONO OSTATECZNY KSZTAŁT DO UZYSKANIA). WARTOŚCI POGLĄDOWE	70
RYS. 64. WIDOK KONSTRUKCJI PRZYRZĄDU DO SPAWANIA PRÓBEK	71
RYS. 65. PRZEKRÓJ PRZYRZĄDU DO SPAWANIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH, 1 – PODSTAWA CENTRUJĄCA, 2 – DYSTANS, 3 – BAZOWANIE LEWEJ KRAWĘDZI ZŁĄCZA PRÓBNEGO, 4 – ZŁĄCZE PRÓBNE, 5 – PODKŁADKA MIEDZIANA, 6 – DEKIEL	72
RYS. 66. WIDOK PRZYRZĄDU NA OBROTNIKU, WRAZ Z ZAMONTOWANYM ZŁĄCZEM PRÓBNYM	73
RYS. 67. KONFIGURACJA PRÓBNYCH ZŁĄCZY SPAWANYCH	74
RYS. 68. PRZYRZĄD SPAWALNICZY - MECHANIZM ROZSUWANIA PODKŁADKI MIEDZIANEJ (NIEKTÓRE ELEMENTY PRZYRZĄDU ZOSTAŁY UKRYTE)	75
RYS. 69. USTAWIENIE UCHWYTU SPAWALNICZEGO WZGLĘDEM ZŁĄCZA PRÓBNEGO ORAZ WIDOK MECHANIZMU ROZSUWANIA PODKŁADKI MIEDZIANEJ	75
RYS. 70. USTAWIENIE UCHWYTU SPAWALNICZEGO NAD OSIĄ ROWKA SPAWALNICZEGO DO WYKONANIA SPOIN SCZEPNYCH	76
RYS. 71. WIDOK ZŁĄCZA PRÓBNEGO PRZED SPAWANIEM	77
RYS. 72. SPOSÓB POMIARU WYSOKOŚCI ZŁĄCZA PRÓBNEGO	78
RYS. 73. SCHEMATYCZNE PRZEDSTAWIENIE LOKALIZACJI LINII POMIAROWYCH A, B, C NA ZŁĄCZU PRÓBNYM	78
RYS. 74. MASZYNA POMIAROWA MITUTOYO CRISTA-APEX S122010.....	79
RYS. 75. POMIAR PROFILU PRÓBKII PO SCZEPIANIU GŁOWICĄ REVO	80
RYS. 76. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.1 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED SPAWANIEM	81
RYS. 77. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.2 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED SPAWANIEM	81
RYS. 78. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.3 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED SPAWANIEM	82
RYS. 79. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.4 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED SPAWANIEM	82
RYS. 80. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO B1 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED SPAWANIEM	83

RYS. 81. PROFIL ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.2 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED SPAWANIEM	83
RYS. 82. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.3 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED SPAWANIEM	84
RYS. 83. WIDOK ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.1, MATERIAŁ STAL NIERDZEWNA 17-4PH.....	86
RYS. 84. WIDOK ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.2, MATERIAŁ STAL NIERDZEWNA 17-4PH.....	86
RYS. 85. WIDOK ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.3, MATERIAŁ STAL NIERDZEWNA 17-4PH.....	86
RYS. 86. WIDOK ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.4, MATERIAŁ STAL NIERDZEWNA 17-4PH.....	87
RYS. 87. WIDOK ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.1, MATERIAŁ INCONEL 718.....	87
RYS. 88. WIDOK ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.2, MATERIAŁ INCONEL 718.....	87
RYS. 89. WIDOK ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.3, MATERIAŁ INCONEL 718.....	88
RYS. 90. CYFROWY PROJEKTOR PROFILOWY KEYENCE SERII IM [19].....	89
RYS. 91. PRZEKRÓJ SPOIN, OPRACOWANY NA PODSTAWIE WYNIKÓW POMIARU SPOIN NA PROJEKTORZE CYFROWYM	89
RYS. 92. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.1 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED I PO SPAWANIU	90
RYS. 93. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.2 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED I PO SPAWANIU	91
RYS. 94. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.3 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED I PO SPAWANIU	91
RYS. 95. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.4 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED I PO SPAWANIU	92
RYS. 96. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.1 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED I PO SPAWANIU	92
RYS. 97. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.2 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED I PO SPAWANIU	93
RYS. 98. PROFIL ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.3 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PRZED I PO SPAWANIU	93
RYS. 99. ZDJĘCIE POWIERZCHNI ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.1 PODCZAS KONTROLI FPI.....	95
RYS. 100. ZDJĘCIE POWIERZCHNI ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.2 PODCZAS KONTROLI FPI.....	95
RYS. 101. ZDJĘCIE POWIERZCHNI ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.3 PODCZAS KONTROLI FPI.....	96
RYS. 102. ZDJĘCIE POWIERZCHNI ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.4 PODCZAS KONTROLI FPI.....	96
RYS. 103. ZDJĘCIE POWIERZCHNI ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.1 PODCZAS KONTROLI FPI.....	96
RYS. 104. ZDJĘCIE POWIERZCHNI ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.2 PODCZAS KONTROLI FPI.....	97

RYS. 105. ZDJĘCIE POWIERZCHNI ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.3 PODCZAS KONTROLI FPI	97
RYS. 106. PIEC PRÓŻNIOWY SECO WARWICK MODEL 10.0VPT-4050/48HVN.....	99
RYS. 107. WYKRES $T = F(T)$ PODCZAS PRZESYCANIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH ZE STALI 17-4PH ...	100
RYS. 108. WYKRES $T = F(T)$ PODCZAS PRZESYCANIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH Z STOPU INCONEL 718	100
RYS. 109. WYKRES $T = F(T)$ PODCZAS STARZENIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH ZE STALI 17-4PH.....	101
RYS. 110. WYKRES $T = F(T)$ PODCZAS STARZENIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH Z STOPU INCONEL 718	101
RYS. 111. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.1 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PO OBRÓBCE CIEPLNEJ (Z UWZGLĘDNIENIEM PROFILI PRZED I PO SPAWANIU)	102
RYS. 112. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.2 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PO OBRÓBCE CIEPLNEJ (Z UWZGLĘDNIENIEM PROFILI PRZED I PO SPAWANIU)	103
RYS. 113. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.3 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PO OBRÓBCE CIEPLNEJ (Z UWZGLĘDNIENIEM PROFILI PRZED I PO SPAWANIU)	103
RYS. 114. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.4 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PO OBRÓBCE CIEPLNEJ (Z UWZGLĘDNIENIEM PROFILI PRZED I PO SPAWANIU)	104
RYS. 115. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.1 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PO OBRÓBCE CIEPLNEJ (Z UWZGLĘDNIENIEM PROFILI PRZED I PO SPAWANIU)	104
RYS. 116. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.2 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PO OBRÓBCE CIEPLNEJ (Z UWZGLĘDNIENIEM PROFILI PRZED I PO SPAWANIU)	105
RYS. 117. PROFILE ZŁĄCZA PRÓBNEGO B.3 NA LINIACH POMIAROWYCH A, B, C PO OBRÓBCE CIEPLNEJ (Z UWZGLĘDNIENIEM PROFILI PRZED I PO SPAWANIU)	105
RYS. 118. GRAFICZNE PRZEDSTAWIENIE STOPNIA DEFORMACJI NA PRZYKŁADZIE ZŁĄCZA PRÓBNEGO A.2 W PRZEKROJU B PO SPAWANIU	106
RYS. 119. ŚREDNIA WARTOŚĆ DEFORMACJI ZŁĄCZA ZE STALI 17-4PH SPAWANEGO RĘCZNIE (ZŁĄCZE A.1) I AUTOMATYCZNIE (ZŁĄCZE A.4), NA ETAPIE PO SPAWANIU I PO OBRÓBCE CIEPLNEJ.....	107
RYS. 120. ŚREDNIA WARTOŚĆ DEFORMACJI ZŁĄCZA ZE STALI 17-4PH SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE (ZŁĄCZE A.2) I AUTOMATYCZNIE (ZŁĄCZE A.3), NA ETAPIE PO SPAWANIU I PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	107
RYS. 121. ŚREDNIA WARTOŚĆ DEFORMACJI ZŁĄCZA ZE STOPU INCONEL 718 SPAWANEGO RĘCZNIE (ZŁĄCZE B.1) I AUTOMATYCZNIE (ZŁĄCZE B.2), NA ETAPIE PO SPAWANIU I PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	108

RYS. 122. ŚREDNIA WARTOŚĆ DEFORMACJI ZŁĄCZA ZE STOPU INCONEL 718 SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE (ZŁĄCZE NR B.2) I AUTOMATYCZNIE (ZŁĄCZE B.3), NA ETAPIE PO SPAWANIU I PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	108
RYS. 123. SUMA DEFORMACJI PO SPAWANIU I OBRÓBCE CIEPLNEJ DLA ZŁĄCZY PRÓBNYCH WYKONANYCH ZE STALI 17-4 PH.....	109
RYS. 124. SUMA DEFORMACJI PO SPAWANIU I OBRÓBCE CIEPLNEJ DLA ZŁĄCZY PRÓBNYCH WYKONANYCH ZE STOPU INCONEL 718.....	110
RYS. 125. METODOLOGIA POMIARU KĄTA DEFORMACJI	111
RYS. 126. PRZYKŁAD WYZNACZENIA WARTOŚCI KĄTA DEFORMACJI DLA PRÓBNEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO A.1.....	112
RYS. 127. PORÓWNANIE ENERGII LINIOWEJ PROCESU DO ŚREDNICH WARTOŚCI ODKSZTAŁCENÍ KĄTOWYCH.....	113
RYS. 128. WARTOŚCI ŚREDNIEGO SKURCZU POPRZECZNEGO PO SPAWANIU I PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	115
RYS. 129. MIEJSCE POBIERANIA PRÓBEK DO PRZYGOTOWANIA ZGLĄDÓW METALOGRAFICZNYCH	116
RYS. 130. WIDOK PRZYGOTOWANEGO ZGLĄDU METALOGRAFICZNEGO DO OBSERWACJI MIKROSTRUKTURY.....	116
RYS. 131. MAKROSTRUKTURA ZŁĄCZA SPAWANEGO RĘCZNIE ZE STALI 17-4 PH.....	117
RYS. 132. MAKROSTRUKTURA ZŁĄCZA SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE ZE STALI 17-4 PH....	117
RYS. 133. MAKROSTRUKTURA ZŁĄCZA ZE STALI 17-4 PH SPAWANEGO RĘCZNIE Z OZNACZONYMI JEGO OBSZARAMI.....	118
RYS. 134. MAKROSTRUKTURA ZŁĄCZA ZE STALI 17-4 PH SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE Z OZNACZONYMI JEGO OBSZARAMI.....	118
RYS. 135. MIKROSTRUKTURA SPOINY ZŁĄCZA SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE (A) I RĘCZNIE (B)	118
RYS. 136. MIKROSTRUKTURA SWC OBSZARU A ZŁĄCZA SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE (A) I RĘCZNIE (B)	119
RYS. 137. MIKROSTRUKTURA SWC OBSZARU B ZŁĄCZA SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE (A) I RĘCZNIE (B)	119
RYS. 138. MIKROSTRUKTURA SWC OBSZARU C ZŁĄCZA SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE (A) I RĘCZNIE (B)	120
RYS. 139. MIKROSTRUKTURA SWC OBSZARU D ZŁĄCZA SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE (A) I RĘCZNIE (B)	120

RYS. 140. MIKROSTRUKTURA SEM MATERIAŁU RODZIMEGO ZŁĄCZA SPAWANEGO AUTOMATYCZNIE (A) I RĘCZNIE (B).....	121
RYS. 141. ZMIANA SZEROKOŚCI PASM FERRYTU Δ WZDŁUŻ LINII WTOPIENIA W KIERUNKI LICA I GRANI SPOINY	122
RYS. 142. OBSZAR SPOINA-STREFA WPŁYWU CIEPŁA ZŁĄCZA ZE STALI 17-4 PH PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	123
RYS. 143. OBSZAR STREFY WPŁYWU CIEPŁA ZŁĄCZA ZE STALI 17-4 PH PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	123
RYS. 144. MAKROSTRUKTURA SEM RĘCZNIE SPAWANEGO ZŁĄCZA ZE STOPU INCONEL 718 .	124
RYS. 145. MAKROSTRUKTURA SEM AUTOMATYCZNIE SPAWANEGO ZŁĄCZA ZE STOPU INCONEL 718	124
RYS. 146. OBSZARY ZŁĄCZA SPAWANEGO ZE STOPU INCONEL 718, W KTÓRYCH ANALIZOWANO MIKROSTRUKTURĘ.....	125
RYS. 147. MIKROSTRUKTURA STOPU INCONEL 718; A) POWIĘKSZENIE 500X, B) POWIĘKSZENIE 1500X.....	126
RYS. 148. OBSZAR BADANIA SKŁADU CHEMICZNEGO MATERIAŁU PODSTAWOWEGO INCONEL 718 PO SPAWANIU. OBSZAR 1-3 WĘGLIKI, OBSZAR 4 OSNOWA AUSTENITYCZNA.....	126
RYS. 149. UDZIAŁ PIERWIĄSTKÓW DLA OBSZARÓW 1, 2, 3, 4 OKREŚLONYCH NA RYS. 148....	127
RYS. 150. MIKROSTRUKTURA SPOINY ZŁĄCZA SPAWANEGO ZE STOPU INCONEL 718 WYKONANEGO AUTOMATYCZNIE (A) I RĘCZNIE (B).....	127
RYS. 151. OBSZAR SPOINY W ZŁĄCZU ZE STOPU INCONEL 718 Z ZAZNACZONYMI MIEJSCAMI RENTGENOWSKIEJ ANALIZY SKŁADU CHEMICZNEGO.....	128
RYS. 152. MIKROSTRUKTURA SEM STREFY WPŁYWU CIEPŁA, ZŁĄCZA SPAWANEGO ZE STOPU INCONEL 718 WYKONANEGO AUTOMATYCZNIE (A) I RĘCZNIE (B).....	129
RYS. 153. WYNIKI RENTGENOWSKIEJ ANALIZY SKŁADU CHEMICZNEGO OBSZARU STREFY WPŁYWU CIEPŁA ZŁĄCZA ZE STOPU INCONEL 718.....	129
RYS. 154. PORÓWNANIE OBSZARU WTOPIENIA W ZŁĄCZU SPAWANYM RĘCZNIE I AUTOMATYCZNIE.....	130
RYS. 155. MIKROSTRUKTURA STOPU INCONEL 718 PO OBRÓBCE CIEPLNEJ.....	131
RYS. 156. WYNIKI MIKROANALIZA SKŁADU CHEMICZNEGO STOPU INCONEL 718 PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	131
RYS. 157. MIKROSTRUKTURA SPOINY ZŁĄCZA SPAWANEGO ZE STOPU INCONEL 718 PO OBRÓBCE CIEPLNEJ (SPAWANIE RĘCZNE). POWIĘKSZENIE (A) 500X, (B) 5000X	132

RYS. 158. MIEJSCA ANALIZY SKŁADU CHEMICZNEGO W SPOINIE ZŁĄCZA ZE STOPU INCONEL 718 PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	133
RYS. 159. WYNIKI ANALIZY SKŁADU CHEMICZNEGO W SPOINIE ZŁĄCZA ZE STOPU INCONEL 718 PO OBRÓBCE CIEPLNEJ, W MIEJSCACH OKREŚLONYCH NA RYS. 158	133
RYS. 160. MIKROSTRUKTURA STREFY WPŁYWU CIEPŁA ZŁĄCZA SPAWANEGO ZE STOPU INCONEL 718 PO OBRÓBCE CIEPLNEJ. POWIĘKSZENIE (A) 500X, (B) 5000X.....	134
RYS. 161. MIKROSTRUKTURA STREFY WPŁYWU CIEPŁA I MATERIAŁU PODSTAWOWEGO W ZŁĄCZU ZE STOPU INCONEL 718 PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	134
RYS. 162. TWARDOŚCIOMIERZ ZHV10, FIRMY ZWICK/ROELL	135
RYS. 163. LOKALIZACJA PUNKTÓW POMIAROWYCH WZDŁUŻ LINII A-A`, ORAZ SPOSÓB PRZEDSTAWIENIA WYNIKÓW NA WYKRESIE	136
RYS. 164. ROZKŁAD TWARDOŚCI W PRÓBNYM ZŁĄCZU SPAWANYM ZE STALI 17-4 PH.....	136
RYS. 165. OBSZARY MIKROSTRUKTURY A, B, C I D WRAZ Z NANIESIONYM WYKRESEM TWARDOŚCI	137
RYS. 166. ROZKŁAD TWARDOŚCI SPOINY WYKONANEJ NA PRÓBCE Z MATERIAŁU INCONEL 718	137
RYS. 167. MIEJSCE POBIERANIA PRÓBEK DO BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE	138
RYS. 168. PRZYKŁADOWY WIDOK PRÓBEK DO BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE: A - STAL 17-4PH PO OBRÓBCE CIEPLNEJ, B - STAL 17-4PH PRZED OBRÓBKĄ CIEPLNĄ, C – STOP INCONEL 718 PO OBRÓBCE CIEPLNEJ, D - STOP INCONEL 718 PRZED OBRÓBKĄ CIEPLNĄ	139
RYS. 169. STANOWISKO DO BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE	139
RYS. 170. KRZYWE NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA W STATYCZNEJ PRÓBIE ROZCIĄGANIA DLA PRÓBEK ZE STALI 17-4PH PO SPAWANIU: A) RĘCZNYM, B) AUTOMATYCZNYM	141
RYS. 171. KRZYWE NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA W STATYCZNEJ PRÓBIE ROZCIĄGANIA DLA PRÓBEK ZE STOPU INCONEL 718 PO SPAWANIU,: A) RĘCZNYM, B) AUTOMATYCZNYM.....	142
RYS. 172. KRZYWA NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA W STATYCZNEJ PRÓBIE ROZCIĄGANIA DLA PRÓBEK ZE STALI 17-4PH PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	143
RYS. 173. KRZYWA NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA W STATYCZNEJ PRÓBIE ROZCIĄGANIA DLA PRÓBEK ZE STOPU INCONEL 718 PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	143

Spis tabel

TAB. 1. SKŁAD NOMINALNY WYBRANYCH STALI UTWARDZALNYCH WYDZIELENIOWO [13].....	11
TAB. 2. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE WYBRANYCH STALI UTWARDZALNYCH WYDZIELENIOWO [13]	11
TAB. 3. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE WYBRANYCH STALI UTWARDZANYCH WYDZIELENIOWO [13]	12
TAB. 4. OZNACZENIE STALI 17-4 PH ZE WZGLĘDU NA POSTAĆ DOSTAWY [24]	15
TAB. 5. SKŁAD CHEMICZNY STALI AMS 5604 [24]	15
TAB. 6. SKŁAD CHEMICZNY KUTYCH STOPÓW NIKLU [11]	17
TAB. 7 SKŁAD CHEMICZNY STOPU INCONEL 718 [24]	18
TAB. 8 WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE WYBRANYCH STOPÓW NIKLU UTWARDZALNYCH WYDZIELENIOWO [13]	19
TAB. 9. OZNACZENIE STOPU INCONEL 718 ZE WZGLĘDU NA POSTAĆ DOSTAWY [24]	20
TAB. 10. TYPOWE ŹRÓDŁA LASEROWE WYKORZYSTYWANE DO SPAWANIA O DUŻEJ MOCY [52]	32
TAB. 11 WYBRANE DANE TECHNICZNE ŹRÓDŁA PRĄDU P6 [108]	62
TAB. 12. PARAMETRY WYKONANIA SPOIN SCZEPNYCH	76
TAB. 13 WYSOKOŚĆ ZŁĄCZY PRÓBNYCH PO SCZEPIANIU, PRZED SPAWANIEM	79
TAB. 14. PARAMETRY SPAWANIA RĘCZNEGO TIG	84
TAB. 15. PARAMETRY SPAWANIA AUTOMATYCZNEGO TIG	85
TAB. 16. WYNIKI POMIARU GEOMETRII SPOIN PRÓBNYCH ZŁĄCZY SPAWANYCH	89
TAB. 17. WYSOKOŚĆ ZŁĄCZY PO SPAWANIU, PRZED OBRÓBKĄ CIEPLNĄ	90
TAB. 18. KRYTERIA AKCEPTACJI KONTROLI WIZUALNEJ, ORAZ WYNIKI KONTROLI.....	94
TAB. 19. PROCES PRZESYCANIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH Z MATERIAŁU 17-4PH	98
TAB. 20. PROCES PRZESYCANIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH Z MATERIAŁU INCONEL 718.....	98
TAB. 21. PARAMETRY PROCESU STARZENIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH Z MATERIAŁU 17-4PH.....	98
TAB. 22. PROCES STARZENIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH Z MATERIAŁU INCONEL 718.....	99
TAB. 23. WYSOKOŚĆ ZŁĄCZY PRÓBNYCH PO OBRÓBCE CIEPLNEJ	102
TAB. 24. WARTOŚCI KĄTA DEFORMACJI A W PRÓBNYCH ZŁĄCZACH SPAWANYCH.....	112
TAB. 25 ENERGIA LINIOWA ORAZ ŚREDNIA WARTOŚĆ DEFORMACJI KĄTOWEJ PRÓBNYCH ZŁĄCZY SPAWANYCH.....	113
TAB. 26. WARTOŚĆ SKURCZU POPRZECZNEGO ZŁĄCZY PRÓBNYCH PO SPAWANIU	114
TAB. 27. WARTOŚĆ SKURCZU POPRZECZNEGO ZŁĄCZY PRÓBNYCH PO OBRÓBCE CIEPLNEJ.....	115

TAB. 28. WYNIKI POMIARÓW SZEROKOŚCI OBSZARÓW STREFY WPŁYWU CIEPŁA, ZŁĄCZY PRÓBNYCH ZE STALI 17-4PH WYKONANYCH RĘCZNIE I METODĄ AUTOMATYCZNĄ	122
TAB. 29. WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE – ZŁĄCZE SPAWANE ZE STALI 17-4PH.....	140
TAB. 30. WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE – ZŁĄCZE SPAWANE ZE STOPU INCONEL 718	140