

# Właściwości złączy różnoimiennych stopu niklu Incoloy 800H ze stalą odporną na korozję 316L

Properties of dissimilar joints between Incoloy 800HT nickel alloy and stainless steel 316L

## Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy związane z wykonywaniem połączeń różnoimiennych typu Incoloy 800HT – austenityczna stal odporna na korozję 316L. Wykonano badania nieniszczące oraz niszczące, których wyniki pozwoliły na weryfikację jakości wykonanych złączy próbnych. Nie stwierdzono występowania niezgodności spawalniczych oraz uzyskano wysokie właściwości wytrzymałościowe złączy. Badania metalograficzne ujawniły poprawne struktury w analizowanych obszarach złączy. Analiza EDS nie wykazała wydzielenia węglików chromu. Na tej podstawie wykazano poprawność zaproponowanej technologii spawania.

**Słowa kluczowe:** stop niklu; stal odporna na korozję; złącza różnoimiennie; metoda TIG; technologia spawania

## Abstract

In the article problems associated with making dissimilar joints made from nickel alloy Incoloy 800HT with stainless steel 316L were described. Performed non-destructive tests and destructive tests allowed for verifications of weld specimens. Not identified welding imperfections. Obtained mechanical properties above the assumed acceptance criteria. Metallographic microscope revealed the correct structure of the analyzed areas. EDS analysis showed no chromium carbides. Obtained findings confirmed the correctness of the applied welding procedure.

**Keywords:** nickel alloy; stainless steel; dissimilar joints; TIG; welding procedure

## Wstęp

Ciągły rozwój technologii związanych z pozyskiwaniem surowców naturalnych i ich przetwórstwem, produkcją energii oraz budową niezwodnych urządzeń wymusza na projektantach stosowanie materiałów spełniających ściśle określone wymagania. Często są to materiały, których odpowiednie właściwości mechaniczne (np.:  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A$ ) muszą być powiązane z innymi cechami, np. z bardzo dobrą odpornością na działanie silnie agresywnych środowisk (w szczególności chlorków, kwasu azotowego i fosforowego, gazów powstających w podczas prac wydobywczych, solanki, ługów itp.) [1]. Do materiałów spełniających przedstawione kryteria można zaliczyć nikiel i jego stopy. Lata 1930÷1960 to okres, w którym prowadzono intensywne badania nad niklem i jego stopami, podczas którego poszukiwano odpowiedniego materiału, który mógłby być zastosowany do budowy turbin gazowych oraz łopatek silników lotniczych. Doprowadziło to do rozwoju tej grupy materiałowej, o dobrych właściwościach mechanicznych w wysokiej temperaturze (często przekraczającej 1000 °C) powiązanych z odpornością na agresywne środowiska robocze. Rozwój tych materiałów przebiegał w kierunku doboru z szerokiej gamy dodatków stopowych (Cr, Cu, Fe, Co, Mo, Ti, Nb, W) [2÷7] oraz parametrów obróbki cieplnej, co pozwoliło

na uzyskiwanie materiałów spełniających określone wymagania technologiczno-eksploatacyjne. Typowe właściwości stopów niklu to: żaroodporność, żarowytrzymałość, dobra odporność na termiczne oraz mechaniczne zmęczenie materiału, odporność na utlenianie w wysokich temperaturach przy zachowaniu niskiego współczynnika rozszerzalności cieplnej, stosunkowo dobra spawalność oraz podatność na obróbkę skrawaniem [2÷8]. Badania nad niklem i jego stopami są prowadzone w bardzo szerokim zakresie. Dotyczą m.in. technologii lutowania [9,10], napawania elementów poddanych oddziaływaniu wysokich temperatur oraz agresywnych środowisk [11÷13], spawania stopów niklu ze stalami niestopowymi oraz analizy strukturalnej złączy spawanych [14-16], łączenia bimetałów z warstwą platerowaną stopami niklu, np. monelem [17], wytwarzania półfabrykatów będących elementami składowymi urządzeń energetycznych np. spawania laserowego rur ożebrowanych ze stopu Inconel 625 [18] oraz nanoszenia warstw wierzchnich przy zastosowaniu natryskiwania termicznego i zgrzewania [19,20]. Innym istotnym aspektem są badania związane z właściwościami eksploatacyjnymi stosowanych stopów niklu w zależności od warunków pracy oraz wykonywaniem połączeń różnoimiennych [3,4,20]. Wszystkie wspo-

Dr inż. Grzegorz Rogalski, dr inż. Dariusz Fydrych, dr hab. inż. Jerzy Łabanowski, prof. nadzw. PG – Politechnika Gdańska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: grzrogal@pg.gda.pl

mniane kierunki badań wskazują na bardzo dużą przydatność niklu i jego stopów w zastosowaniach przemysłowych, a odpowiednio opracowane technologie spawania, napawania czy lutowania pozwalają na bezawaryjną i bezpieczną eksploatację urządzeń wykonanych z tych materiałów.

Nikiel i jego stopy można sklasyfikować m.in. ze względu na skład chemiczny, jednak taki sposób oznaczania w praktyce przemysłowej jest rzadko stosowany. Najczęściej używane są nazwy handlowe producentów (np. Inconel 625, Nicrofer 7216, Incoloy 800HT, Alloy C-22/Hastelloy C-22), oznaczenia wg Werkstoff Nr. (2.4856, 2.4816, 1.4959, 2.4602) oraz numery UNS (UNS N06625, UNS 06600, UNS 08811, UNS 06022). Dla procesów spawalniczych w przypadku np. kwalifikowania technologii spawania zgodnie z odpowiednimi normami przedmiotowymi stosuje się oznaczenia grup materiałowych zgodnie z TR ISO 15608.

Szczególną grupę stopów niklu stanowią odmiany oznaczone 1.4876; 1.4958; 1.4959, a powiązane z nazwami handlowymi Incoloy 800, 800H, 800HT, tablica I. Incoloy 800 jest umacnianym roztworem stałym stopem niklu, chromu i żelaza z dodatkiem małej zawartości aluminium i tytanu. Stop został opracowany przez amerykańską korporację Special Metals i wprowadzony na rynek w 1950 roku, w celu uzupełnienia zapotrzebowania na żaroodporne i odporne na korozję stopy ze stosunkowo niską zawartością niklu. Stopy 800H i 800HT powstały wskutek rozwoju stopu podstawowego.

Głównymi różnicami pomiędzy stopami 800, 800H i 800HT są właściwości mechaniczne. Różnice wynikają z zacieśnionego składu chemicznego stopów 800H i 800HT oraz z wysokotemperaturowego wyżarzania użytego do produkcji tych materiałów. Stop 800 ma lepsze właściwości mechaniczne w temperaturze pokojowej oraz podczas krótkiej ekspozycji w podwyższonych temperaturach. Natomiast stopy 800H i 800HT mają wyższą wytrzymałość na pełzanie i odporność na zerwanie w czasie długotrwałej eksploatacji w wysokich temperaturach. Właściwości wytrzymałościowe stopów Incoloy 800H i 800HT przedstawiono na rysunku 1. Ważną właściwością tych stopów jest względnie niska skłonność do formowania się pęknięć, będących efektem korozji naprężeniowej, w środowisku chlorków, co np. w przypadku stali austenitycznych jest bardzo częstym przypadkiem. Obszerne badania nad tymi pęknięciami w stopach o strukturze austenitycznej wykazały, że tendencja do pęknięcia spada wraz ze wzrostem zawartości niklu w stopie [21,22].

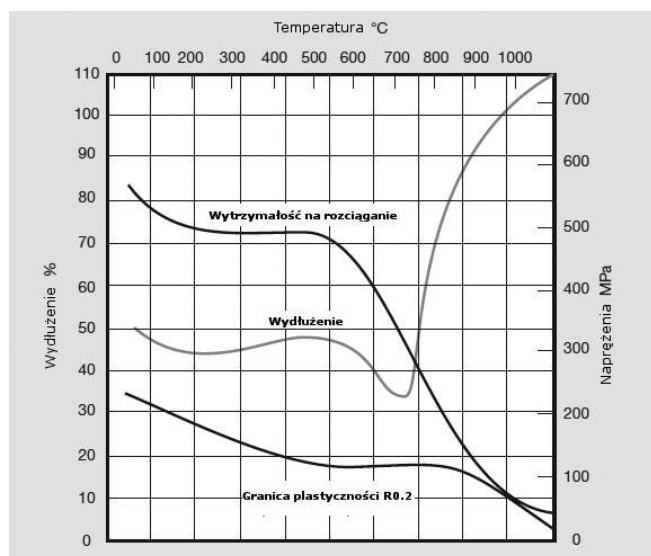
Ze względu na przedstawione właściwości stopy niklu typu Incoloy znalazły zastosowanie w budowie płaszczowo-rurowych wymienników ciepła. Wykonuje się z tych materiałów wkłady rurowe, węzownice, przyłącza w postaci króćców, ściany sitowe platerowane niklem i jego stopami oraz w przypadku szczególnym całe wymienniki ciepła. Z takim zastosowaniem można spotkać się np. w płaszczowo-rurowych wymiennikach ciepła JAD produkowanych przez firmę SECESPOL Sp. z o.o. [9].

**Tablica I.** Skład chemiczny stopów niklu Incoloy 800, 800H, 800HT [21,22]

**Table I.** Chemical composition of Incoloy 800, 800H, 800HT alloys

Stop Incoloy	800	800H	800HT
Nikiel	30-35	30-35	30-35
Żelazo	39,5 min.	39,5 min.	39,5 min.
Chrom	19-23	19-23	19-23
Węgiel	0,1 max.	0,05-0,10	0,06-0,10
Mangan	1,5 max.	1,5 max.	1,5 max.
Krzem	1,0 max.	1,0 max.	1,0 max.
Miedź	0,75 max.	0,75 max.	0,75 max.
Siarka	0,015 max.	0,015 max.	0,015 max.
Aluminium	0,15-0,60	0,15-0,60	0,25-0,60
Tytan	0,15-0,60	0,15-0,60	0,25-0,60
Al+Ti	0,3-1,20	0,3-1,20	0,85-1,20

Ze względu na przedstawione właściwości stopy niklu typu Incoloy znalazły zastosowanie w budowie płaszczowo-rurowych wymienników ciepła. Wykonuje się z tych materiałów wkłady rurowe, węzownice, przyłącza w postaci króćców, ściany sitowe platerowane niklem i jego stopami oraz w przypadku szczególnym całe wymienniki ciepła. Z takim zastosowaniem można spotkać się np. w płaszczowo-rurowych wymiennikach ciepła JAD produkowanych przez firmę SECESPOL Sp. z o.o. [9].



**Rys. 1.** Zależność właściwości wytrzymałościowych stopu typu Incoloy 800H i 800HT od temperatury [22]

**Fig. 1.** Temperature dependence of mechanical properties of Incoloy 800H and 800HT alloys

## Problemy związane ze spawaniem stopów niklu Incoloy 800/800H/800HT

Stopy Incoloy można uznać za dobrze spawalne pod warunkiem stosowania się do ogólnych wytycznych dla tej grupy materiałowej oraz ustalonego reżimu technologicznego podczas kwalifikowania technologii spawania. Do najważniejszych problemów zalicza się:

1. Możliwość formowania pęknięć gorących w spoinie lub SWC (podczas krzepnięcia metalu występuje błonka płynna lub krucha, pochodząca z segregacji zanieczyszczeń lub składników towarzyszących jak siarka, fosfor, tlen, krzem).
2. Wzrost kruchości spoin (kruchość wysokotemperaturowa wynikająca z obecności: siarki, fosforu, ołowiu oraz innych pierwiastków tworzących z niklem niskotopliwe eutektyki, np.: cynku, cyny, bizmutu).
3. Możliwość pojawienia się porowatości spoin (obecność azotu w ilości 0,025% generuje pęcherze w krzepnącym metalu, zbyt duże ilości wprowadzonego ciepła).
4. Możliwość występowania korozji międzykrystalicznej (w zależności od środowiska pracy).

## Cel badań

Głównym celem badań było określenie właściwości złączy spawanych różnoimiennych typu stop niklu Incoloy 800/800H/800HT - austenityczna stal odporna na korozję przy zastosowaniu procesu spawania 141 oraz identyfikacja zagrożeń związanych z ich wykonywaniem. Dodatkowym celem było opracowanie wytycznych umożliwiających kwalifikowanie technologii spawania płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 15614-1 (Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Badanie technologii spawania. Część 1: Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu).

## Badania własne

Na podstawie zmiennych istotnych dotyczących spawania stopów niklu, budowy płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła oraz postawionego celu pracy przyjęto następujący plan badań:

1. Dobór metody spawania w zależności o geometrii łączonych elementów tj.: średnicy zewnętrznej rur oraz grubości ścianki.
2. Wykonanie prób technologicznych spawania w celu ustalenia

parametrów prądowych, techniki spawania oraz pozostałych zmiennych istotnych.

3. Wykonanie docelowych złączy próbnych.
4. Przeprowadzenie badań nieniszczących (NDT) oraz niszczących (DT) zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-1: a) Badania wizualne VT, b) Badania penetracyjne PT, c) Badania radiograficzne RT, d) Badania metalograficzne makroskopowe, e) Badania metalograficzne mikroskopowe, f) Statyczna próba rozciągania złączy spawanych, g) Próba zginania.
5. Analiza wyników badań i sformułowanie wniosków.

## Materiały zastosowane w badaniach

Po uwzględnieniu budowy płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła, grubości oraz średnic zastosowanych elementów wytypowano metodę spawania oraz typ złącza próbnego. Do spawania zastosowano proces 141 (TIG). Materiał podstawowy to rury z austenitycznej stali odpornej na korozję 316L (1.4404) oraz stopu niklu Incoloy 800HT (1.4959) o wymiarach 60,3×2,0 mm. Ze względu na przyjętą metodę spawania dobrano odpowiedni materiał dodatkowy, w postaci prętów o oznaczeniu wg PN-EN ISO 18274: SNI6082 (Werkstoff Nr. 2.4806). Charakterystykę

**Tablica II.** Skład chemiczny stali 316L oraz stopu niklu Incoloy 800HT [22]

**Table II.** Chemical composition of 316L stainless steel and Incoloy 800HT alloy

Skład chemiczny, wag. %										
Ni	Cr	C	Si	Mn	P	S	Al	Co	Cu	Ti
Stop niklu Incoloy 800HT										
31,22	20,08	0,076	0,59	0,82	0,011	< 0,001	0,49	0,11	0,15	0,47
Austenityczna stal odporna na korozję 316L										
11,02	16,69	0,015	0,11	0,91	0,028	0,003	-	-	-	Mo, 2,00

**Tablica III.** Właściwości mechaniczne austenitycznej stali odpornej na korozję 1.4404 (316L) oraz stopu niklu Incoloy 800HT (1.4959) wg atestów materiałowych

**Table III.** Mechanical properties of stainless steel 316L grade and Incoloy 800HT acc. to inspection certificate

Właściwości mechaniczne		
R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
Stop niklu Incoloy 800HT		
575	213	55,9
Austenityczna stal odporna na korozję 316L		
557	213	50

**Tablica IV.** Skład chemiczny oraz właściwości wytrzymałościowe spoiwa SNI6082 wg PN-EN ISO 18274

**Table IV.** Chemical composition and mechanical properties of SNI6082 consumable acc. to PN-EN ISO 18274

Skład chemiczny, wag. %							
Ni	Cr	Mn	C	Si	Fe	Nb	Ti
≥ 67,0	20,0	3,0	≤ 0,03	≤ 0,3	≤ 1,7	2,5	+
Właściwości mechaniczne <sup>1)</sup>							
R <sub>e</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A <sub>5</sub> [%]	KV [J]		<sup>1)</sup> bez obróbki cieplnej, po spawaniu, gaz osłonowy: I1 (99,999%Ar)		
440	680	42	190 (+20 °C)	100 (-196 °C)			

Tablica V. Parametry wykonania złączy próbných  
Table V. Welding parameters for welded specimens

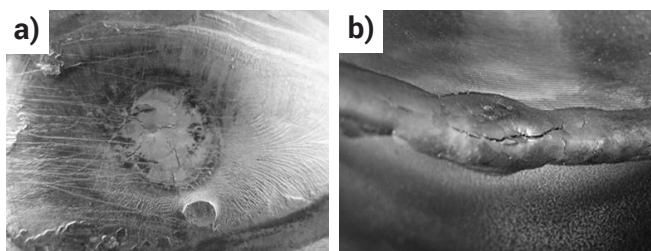
Ścieg	Proces spawania	Wymiar spoiwa [mm]	Natężenie prądu spawania [A]	Napięcie łuku [U]	Rodzaj prądu/biegunowość	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]
1	141	1,6	90-95	10,5-11	DC (-)	0,26-0,32
2	141	1,6	75-85	9,0-10	DC (-)	0,27-0,32

materiałów zastosowanych w badaniach przedstawiono w tablicach II÷IV.

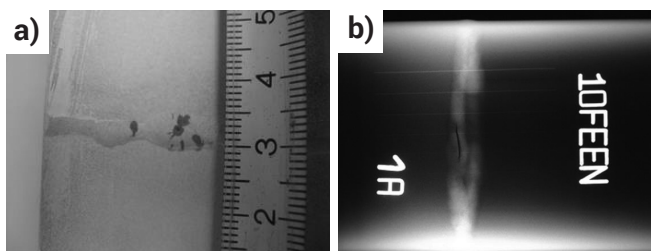
## Wstępne próby spawania

Wstępne próby spawania miały na celu ustalenie właściwych parametrów technologicznych umożliwiających wykonanie złączy próbných. Jako gaz osłonowy oraz gaz formujący zastosowano I1 wg PN-EN ISO 14175 (99,99%Ar). Krawędzi próbek nie ukosowano, zastosowano odstęp pomiędzy elementami 1,0÷1,5 mm. Złącza próbne wykonano w pozycji H-L045. W tablicy V przedstawiono prądowe parametry spawania ustalone po wykonaniu złączy próbných oraz weryfikacji czynników wpływających na formowanie się jeziorka ciekłego metalu.

Pierwsze próby spawania nie dały zadowalających wyników. W złączach próbných zidentyfikowano niezgodności spawalnicze typu pęknięcia oraz pęcherze gazowe. Dodatkowo lico spoiny charakteryzowało się wklęśnięciem. Zaobserwowane wady przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Niezgodności typu pęknięcia w złączu próbným: a) pęknięcie promieniste, b) pęknięcie w grani spoiny  
Fig. 2. Welding imperfection in weld specimens: a) radial crack, b) longitudinal crack



Rys. 3. Niezgodności spawalnicze w złączu próbným: a) por gazowy z pęknięciem, b) pęknięcie w osi spoiny  
Fig. 3. Welding imperfection in weld specimens: a) radial crack, b) longitudinal crack

Analiza procesu wykonywania złączy wstępnych oraz wykrytych niezgodności spawalniczych pozwoliła na identyfikację przyczyn ich powstawania. Stwierdzono, że zastosowana technika spawania odpowiednia dla stali austenitycznej nie pozwala na otrzymanie poprawnych złączy. Jest to związane z dużą gęstością jeziorka ciekłego metalu. Należy w takim przypadku zmienić technikę spawania

umożliwiającą poprawne zwilżanie krawędzi spawanych elementów. Kolejnym istotnym elementem jest właściwe czyszczenie elementów przed spawaniem oraz czyszczenie międzyściegowe. Zalecono zastąpienie ręcznego czyszczenia szczotką drucianą przez szlifowanie. Tlenki, które powstają w wyniku oddziaływania temperatur wyższych od 540 °C można usunąć tylko poprzez szlifowanie (zaleca się, aby proces spawania wykonać w ciągu osiemdziesięciu godzin od oczyszczenia powierzchni, aby zmniejszyć ryzyko samoistnego zanieczyszczenia). Stwierdzono również, że zbyt wysokie natężenie prądu spawania nie poprawia zwilżalności, a jedynie może spowodować przegrzanie jeziorka ciekłego metalu. To z kolei prowadzi do wyparowania pierwiastków odtleniających i powstania pęcherzy gazowych, które mogą stanowić miejsce inicjowania pęknięć (rys. 3). Stwierdzono również, iż obecność azotu (ok. 0,025%) powoduje powstanie porów w zastygającym metalu. Najczęściej spowodowane jest to niedostateczną osłoną gazową jeziorka ciekłego metalu.

## Wyniki badań właściwych złączy próbných

Uwzględniając zalecenia po wykonaniu złączy wstępnych przystąpiono do wykonania złączy docelowych zgodnie z parametrami podanymi w tablicy V. Następnie wykonano badania nieniszczące (NDT) oraz niszczące (DT) zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 15614-1.

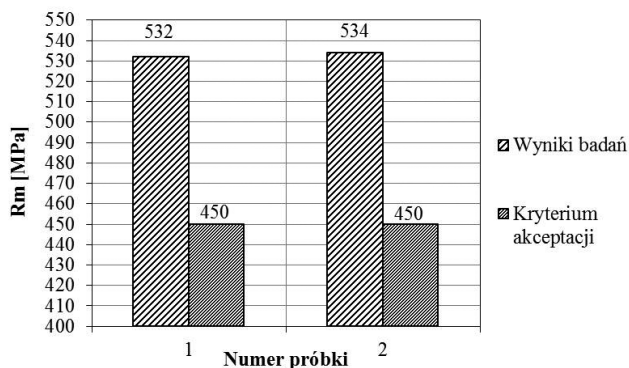
## Badania nieniszczące

Badania nieniszczące wykonano zgodnie z odpowiednimi normami przedmiotowymi dla danej metody badania. Badania wizualne (VT), penetracyjne (PT) oraz radiograficzne (RT) złączy próbných nie ujawniły niezgodności spawalniczych. Złącza zostały sklasyfikowane na poziomie jakości B zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5817 poza nadmiernym nadlewem, który sklasyfikowano na poziomie jakości C. Zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 15614-1 ta niezgodność jest dopuszczalna na wskazanym poziomie jakości.

## Badania niszczące

### Statyczna próba rozciągania złączy spawanych

Badania złączy próbných wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 4136. Próby przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej ZDM50. Temperatura otoczenia podczas badań wynosiła 25 °C. Celem było określenie wytrzymałości na rozciąganie (Rm) badanych złączy próbných. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań. Kryterium akceptacji ustalono na poziomie Rm=450 MPa, co odpowiada wartości dla Incoloy 800HT, zgodnie z ASTM B 407, jako materiału o niższej wytrzymałości na rozciąganie.



Rys. 4. Wyniki statycznej próby rozciągania złączy próbnych  
Fig. 4. Results of tensile tests for welded specimens

Złącza próbne uległy zerwaniu w materiale rodzimym o niższej wytrzymałości na rozciąganie (Incoloy 800HT). Uzyskano wyniki powyżej założonego kryterium akceptacji. Świadczy to o poprawnie dobranym materiale dodatkowym do spawania, parametrach spawania, wysokich kwalifikacjach spawacza oraz właściwych pozostałych zmiennych istotnych dla danej technologii spawania.

## Próba zginania

Statyczną próbę zginania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5173. Próby przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej ZDM50. Kryterium akceptacji, czyli kąt gięcia równy 180°, ustalono na podstawie PN-EN ISO 15614-1. Wyniki badań z próby zginania przedstawiono w tabelicy VI.

Tabela VI. Wyniki badań złączy po próbie zginania  
Table VI. Results of bend test of welded joints

Nr próbki	Średnica trzpienia gnącego [mm]	Kąt zginania [°]	Wynik
TRBB 1	8,0	180	Pozytywny
TRBB 2	8,0	180	Pozytywny
TFBB 1	8,0	180	Pozytywny
TFBB 2	8,0	180	Pozytywny

TRBB – próba zginania z rozciąganiem grani;  
TFBB – próba zginania z rozciąganiem lica

Na powierzchniach rozciąganych badanych próbek, nie zidentyfikowano pęknięć, naderwań oraz innych niezgodności spawalniczych. Wyniki badań pozwalają stwierdzić, że zastosowana technologia spawania (spoiwo, ilość wprowadzonego ciepła, przygotowanie do spawania itp.) zapewnia uzyskanie odpowiednich właściwości plastycznych złączy spawanych.

## Badania metalograficzne makro i mikroskopowe

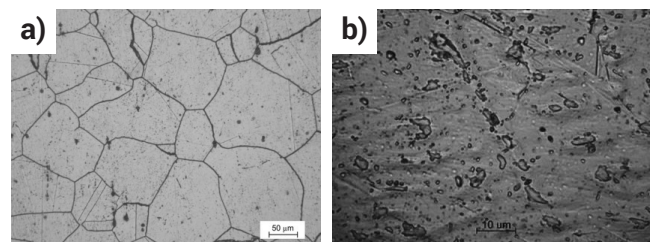
Badanie metalograficzne makroskopowe oraz mikroskopowe przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 17639. Powierzchnie próbek zostały przygotowane przy użyciu papieru ściernego o ziarnistości: 100÷2000 oraz zastosowaniu polerowania mechanicznego. Trawienie przeprowadzono

po jednej stronie próbki w taki sposób, aby była wyraźnie widoczna linia wtopienia, strefa wpływu ciepła i ułożenie ściągów. Badaniom makroskopowym poddano również materiał podstawowy nie objęty oddziaływaniem ciepła. Trawienie chemiczne odbyło się poprzez zanurzenie zglądu w odczynniku trawiącym – skład objętościowy odczynnika: 80 ml wody destylowanej, 12 ml kwasu azotowego HNO<sub>3</sub>, 8 ml kwasu fluorowodorowego HF. Temperatura trawienia wynosiła 70 °C, czas trawienia do 45 s. Na rysunku 5 przedstawiono widok zglądu metalograficznego badanego złącza próbnego.



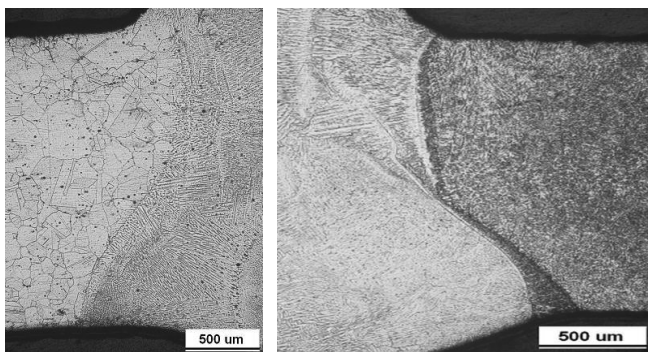
Rys. 5. Złącze spawane Incoloy 800HT/316L, pow. x5  
Fig. 5. A cross section for dissimilar welding Incoloy 800HT/316L joint, mag. x5

Badania metalograficzne makroskopowe nie wykazały niezgodności spawalniczych na badanym przekroju. Nie stwierdzono występowania pęknięć, pustek i wtrąceń. Złącze charakteryzuje się równomiernym przetopieniem. Można zaobserwować nadmierny nadlew lica, co wykazały również badania wizualne oraz wyraźnie zaznaczony obszar przejścia spoiny w materiał rodzimy stali austenitycznej.



Rys. 6. Struktury materiałów podstawowych: a) Incoloy 800HT, b) 316L  
Fig. 6. The structures of base materials: a) Incoloy 800HT, b) 316L

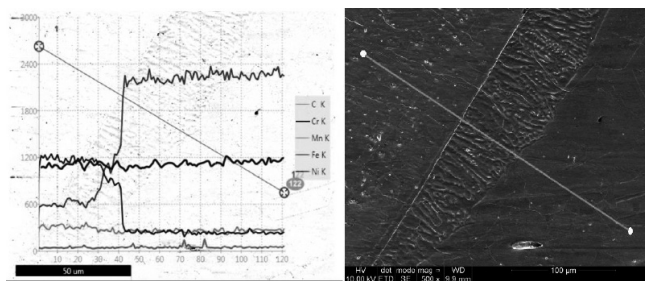
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wyniki badań metalograficznych makroskopowych. Struktura materiału rodzimego Incoloy 800HT (rys. 6a) po przesycaniu to gruboziarnista struktura austenityczna z charakterystycznymi utworami bliźniaczymi oraz widocznymi wydzieleniami azotków Ti. Struktura jest prawidłowa i charakterystyczna dla tego rodzaju materiału. Na rysunku 6b zaobserwowano równoosiową strukturę austenityczną z licznymi wydłużonymi wydzieleniami ferrytu delta. Mikrostruktura spoiny składa się ze struktury austenitycznej w układzie dendrytycznym (rys. 7a, 7b – środkowa część złącza). Dla zastosowanego powiększenia nie wykryto niezgodności np. mikropęknięć. Widok linii wtopienia Incoloy 800HT – spoina przedstawiono na rysunku 7a. Strefa przejścia spoiny w materiał 800HT nie wykazuje SWC. Zaobserwowano nieznaczny rozrost ziaren austenitu w materiale rodzimym. Nie stwierdzono istotnego wzrostu wydzieleni węglików w SWC. Dendryty układają się prostopadle głównymi osiami do linii wtopienia, co odwzorowuje kierunek rozchodzenia się ciepła. Widok linii wtopienia spoina – stal odporna na korozję 316L przedstawiono na rysunku 7b. Zaobserwowano wyraźnie widoczną strefę przejściową oraz pasmo o zwiększonej zawartości ferrytu delta. W celu identyfikacji rozkładu pierwiastków stopowych, które mogą świadczyć o zubożeniu warstwy przejściowej w chrom wykonano analizę rozkładu liniowego EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometry). Wyniki badań przedstawiono na rysunku 8.



**Rys. 7.** Struktury stref przejściowych złącza spawanego: a) stop niklu Incoloy 800HT- spoina, b) spoina- austenityczna stal odporna na korozję 316L

**Fig. 7.** The structure of the transition zones of welded joint: a) nickel alloy Incoloy 800HT-weld, b) 316L austenitic stainless steel weld

Wykonane badania umożliwiły zidentyfikowanie zmiany ilości pierwiastków stopowych w obszarze linii wtopienia. Zgodnie z oczekiwaniami zaobserwowano gwałtowną zmianę zawartości żelaza oraz niklu. Wynika to ze składu chemicznego spoiwa oraz stali odpornej na korozję 316L.



**Rys. 8.** Analiza rozkładu liniowego EDS strefy przejściowej: spoina- stal austenityczna 316L

**Fig. 8.** The analysis of the linear distribution of EDS of transition zone: weld - 316L

Nie wykryto wzrostu zawartości węgla przy jednoczesnym spadku zawartości chromu. Pozwala to na wysunięcie wniosku, że w badanym obszarze nie doszło do wydzielenia węglików chromu ( $Cr_{23}C_6$ ), które są przyczyną korozji międzykrystalicznej. Świadczy to o poprawnie dobranej ilości wprowadzonego ciepła, która zapewnia uzyskanie pełnego przetopienia elementów przy jednoczesnym braku przegrzania newralgicznych obszarów złącza spawanego.

## Wnioski

Badania wstępnej technologii spawania stopu Incoloy 800HT ze stalą odporną na korozję 316L pozwoliły na określenie przyczyn generowania niezgodności spawalniczych:

- wpływ gęstości jeziorka ciekłego metalu na uzyskanie przetopienia i generowanie przyklejeń – dobór optymalnej techniki spawania (zwiększenie zwilżalności krawędzi spawanych elementów),
- zbyt wysokie natężenie prądu spawania (przegrzanie jeziorka ciekłego metalu, co prowadzi do generowania porowatości, pęcherzy gazowych),
- odpowiednia czystość spawanych elementów (usuwanie tlenków, związków zawierających pierwiastki tworzące niskotopliwe eutektyki).

Wyniki badań NDT wykazały poprawność złączy próbných wykonanych wg zmodyfikowanej technologii. Nie stwierdzono występowania pęknięć, pęcherzy gazowych, porów oraz innych niezgodności spawalniczych.

Wyniki badań z próby rozciągania oraz próby zginania potwierdzają, że zmiana techniki spawania, parametrów spawania oraz sposobu przygotowania pozwala na uzyskanie właściwości spełniających kryteria akceptacji i spełnienie wymagań odpowiednich norm przedmiotowych.

Badania metalograficzne makro- i mikroskopowe pozwoliły na identyfikację struktur w poszczególnych obszarach złącza spawanego, które charakteryzują się prawidłową budową. Nie stwierdzono wydzielenia węglików chromu w obszarze przegrzania.

*Wykonane badania złączy próbných pozwoliły na kwalifikowanie technologii spawania zgodnie z wymaganiami odpowiedniej normy przedmiotowej (PN-EN ISO 15614-1) przy udziale trzeciej strony (Urzędu Dozoru Technicznego).*

## Literatura

- Rogalski G., Łabanowski J., Fydrych D., Świerczyńska A.: Wpływ obróbki cieplnej na właściwości spawanych austenitycznych rur wymienników ciepła. Przegląd Spawalnictwa 6/2014.
- Dobrzański L. A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Warszawa, WNT 2002.
- Davis J. R.: ASM Specjalny Handbook: Nickel, cobalt, and their alloys. ASM International, USA 2000.
- Lippold J. C., Kiser S. D., DuPont J. N.: Welding metallurgy and weldability of nickel- base alloys. New Jersey, Wiley 2009.
- Brózda J., Łomozik M.: Stopy niklu stosowane w budowie urządzeń służących ochronie środowiska i ich spawalność. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 2/99.
- David S. A., Siefert J. A., DuPont J. N., Shingledecker J. P.: Weldability and weld performance of candidate nickel base superalloys for advanced ultrasuper-critical fossil power plants part I: fundamentals. Science and Technology of Welding and Joining 7/2015.
- Turowska A., Adamiec J.: Zakres kruchości wysokotemperaturowej złączy spawanych stopu Inconel 625. Przegląd Spawalnictwa 10/2015.
- Pilarczyk J. (red.): Poradnik inżyniera. Spawalnictwo, T.1. Warszawa, WNT 2003.
- www.secespol.com
- Baranowski M., Jakubowski J.: Lutowność wybranych nadstopów niklu. Przegląd Spawalnictwa 7/2014.
- Golański G., Lachowicz M., Słania J., Kępa J., Marszałek P.: Napoiny z nadstopu Haynes®625 na ścianach szczelnych ze stali 16Mo3. Przegląd Spawalnictwa 8/2014.
- Rutzinger B.: Influence of the welding process to the dilution rate of weld overlays on unalloyed steel using the weld consumable ERNiCrMo-3 (Alloy 625). Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 5/2014.
- Adamiec P., Adamiec J.: Aspekty napawania stopami Inconel 625 i 686 elementów w kotłach do spalania odpadów. Przegląd Spawalnictwa 5-6/2006.
- Ziewiec A., Stępiński J., Tasak E.: Mikrostruktura połączeń różnorodnych stali 17-4PH ze stopami niklu. Przegląd Spawalnictwa 4/2013.
- Tuz L., Pańcikiewicz K., Tasak E., Adamiec J.: Ocena mikrostruktury wybranych stopów niklu. Przegląd Spawalnictwa 5/2014.
- Barrera O., Pfeifer T., Żak A.: Budowa strukturalna różnorodnych połączeń spawanych stali i stopu niklu. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 4/2013.
- Rogalski G., Prokop K., Fydrych D., Łabanowski J.: Badania złączy spawanych bimetalu zgrzewanego wybuchowo stali niestopowej grade 60 ze stopem monel 400. Przegląd Spawalnictwa 6/2014.
- Adamiec J., Więcek M.: Technologia spawania laserowego rur ożebrowanych ze stopu niklu Inconel 625. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 5/2014.
- Chmielewski T., Jakubowski J.: Żaroodporne powłoki INCONEL 625 natryskiwane termicznie na podłoża ze stali stopowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika 229/2009.
- Chmielewski T., Jakubowski J.: Zgrzewanie rezystancyjne uszczelnień typu "plaster miodu". Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika 229/2009.
- Incoloy 800. Materiały informacyjne. Special Metals Corporation, 2010.
- Incoloy 800H/HT. Materiały informacyjne. Special Metals Corporation, 2010.