

Spawalność tytanu Grade 2 na przykładzie płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła

Weldability of titanium Grade 2 on example of shell and tube heat exchanger

Streszczenie

W artykule scharakteryzowano właściwości, obszary zastosowania i problemy związane ze spawalnością tytanu i jego stopów. Opracowano technologię spawania metodą TIG płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła typu JAD B z tytanu Grade 2, zaprezentowano wyniki badań nieniszczących i niszczących złączy spawanych. Szczególną uwagę zwrócono na trudności związane z przygotowaniem krawędzi elementów do spawania i wynikające z nich niezgodności spawalnicze.

Słowa kluczowe: tytan, wymiennik ciepła, spawanie metodą TIG, spawalność, niezgodności spawalnicze

Abstract

The article describes the properties, application areas and problems with the weldability of titanium and its alloys. Procedure of TIG welding of shell and tube heat exchanger JAD B made of Grade 2 titanium was qualified and the results of non-destructive and destructive testing of welds were presented. Particular attention was paid to the difficulties associated with the preparation of edges before welding and as a result to the welding imperfections.

Keywords: titanium, heat exchanger, TIG welding, weldability, welding imperfections

Wstęp

Wymienniki ciepła to urządzenia, które znajdują zastosowanie w przemyśle energetycznym, farmaceutycznym, petrochemicznym, wydobywczym, spożywczym, maszynowym, chemicznym oraz biomedycznym [1,2]. Stanowią również elementy systemów wentylacyjnych, grzewczych i klimatyzacyjnych, np. w układach solarnych, ogrzewania kominkowego czy pomp ciepła. Innym obszarem implementacji takich urządzeń (np. wymienników płaszczowo-rurowych) są instalacje basenowe. Dają one możliwość podgrzewania wody nie powodując spadku ciśnienia w instalacji, co jest istotne ze względów eksploatacyjnych. W ostatnim czasie zaobserwowano bardzo duże zainteresowanie basenami z wodą słoną. Wymaga to stosowania materiałów konstrukcyjnych pozwalających na bezpieczną i bezawaryjną eksploatację, a więc cechujących się wysoką odpornością na działanie substancji zawartych w wodzie morskiej m.in.: chloru, fluoru i soli oraz umożliwiających pracę w warunkach wysokiej temperatury oraz wysokiego ciśnienia. W ostatnim czasie zaobserwowano bardzo duże zainteresowanie basenami z wodą słoną. Wymaga to stosowania materiałów konstrukcyjnych pozwalających na bezpieczną i bezawaryjną eksploatację, a więc cechujących się wysoką odpornością na działanie substancji zawartych w wodzie morskiej m.in.: chloru, fluoru i soli oraz umożliwiających pracę w warunkach wysokiej temperatury oraz wysokiego ciśnienia. Innym ważnym aspektem jest bardzo dobra odporność korozyjna, np. na korozję naprężeniową [1÷3]. Biorąc pod uwagę wymienione czynniki oraz możliwość łączenia przy zastosowaniu procesów spawania optymalnymi materiałami, które mogą być stosowane na takie urządzenia są tytan i jego stopy. Takie rozwiązanie stosuje firma SECESPOL Sp. z o.o. w produkcji płaszczowo rurowych wymienników ciepła

z serii TI (wymienniki tytanowe). Oprócz szeregu zalet związanych z zastosowaniem tytanu charakteryzują się one niskimi stratami ciśnienia przy wysokich przepływach oraz kompaktowymi rozmiarami. Dodatkowo zastosowanie rur karbowanych pozwala na zwiększoną turbulizację przepływu w obszarze warstwy przyściennej, co intensyfikuje wymianę ciepła. Przykład omawianego wymiennika przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Płaszczowo rurowy wymiennik ciepła typu TI 250 wykonany z tytanu Gr. 2 produkowany przez firmę SECESPOL [4]

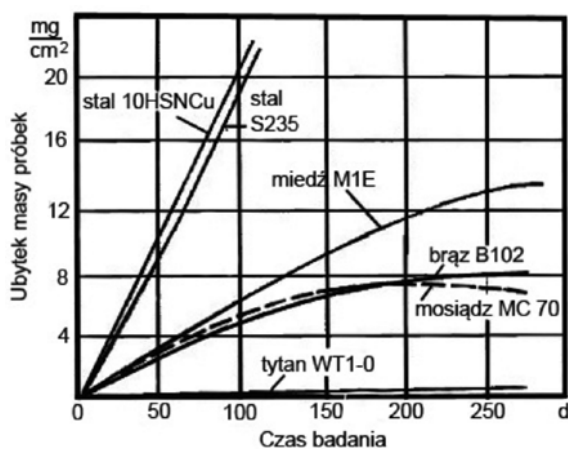
Fig. 1. Tube and shell heat exchanger type TI 250 made of titanium Gr. 2 manufactured by SECESPOL

Tytan i jego stopy można sklasyfikować wg struktury w stanie normalizowanym na trzy podstawowe gatunki: stopy jednofazowe α , stopy dwufazowe $\alpha+\beta$ oraz stopy jednofazowe β . Wyróżnić można również dwie grupy prze-

ściowe: stopy pseudo α (składają się z fazy α , a także małej zawartości (<5%) pierwiastków stabilizujących fazę β), stopy pseudo β (składają się z fazy metastabilnej β_M , jednak właściwościami są porównywalne do stopów $\alpha+\beta$ o znacznej zawartości fazy β). Mając na uwadze zastosowanie przemysłowe najczęściej stosuje się oznaczenia zgodne z American Society for Testing and Materials (ASTM). Organizacja ta stworzyła podział tytanu i jego stopów na klasy w skali od 1 do 31. Tytan techniczny występuje w czterech klasach o numerach od 1 do 4. Wraz ze wzrostem numeru klasy rośnie twardość oraz wytrzymałość stopu tytanu, natomiast maleje jego plastyczność. W przemyśle najbardziej popularną odmianą jest klasa nr 2 (Grade 2). Tytan techniczny w temperaturze pokojowej posiada strukturę α . W przypadku kwalifikowania technologii spawania (PN-EN ISO 15614-5) oraz certyfikowania spawaczy (PN-EN ISO 9606-5) tytan i jego stopy został podzielony na grupy materiałowe, co zostało przedstawione w raporcie technicznym PN-CR ISO 15608. Wyróżnia się cztery grupy główne (51, 52, 53, 54) oraz dla grupy 51 cztery podgrupy (51.1; 51.2; 51.3; 51.4 – podgrupy różnią się między sobą zawartością O_2).

Tytan i jego stopy w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi charakteryzuje się [5÷8]:

- wysoką wytrzymałością względną (R_m/γ) w stosunkowo szerokim zakresie temperatur (do ok. 500 °C),
- wysoką odpornością korozyjną w środowiskach agresywnych, np. w wodzie morskiej (rys. 2),
- wysoką temperaturą topnienia (1668 °C±5 °C),
- paramagnetycznością,
- niskim współczynnikiem rozszerzalności liniowej,
- niską bioaktywnością,
- niskim stopniem pochłaniania fali akustycznej (ok. czterokrotnie niższym niż stali).



Rys. 2. Porównanie odporności na korozję stopu tytanu WT1-0 z innymi materiałami w wodzie morskiej [5]

Fig. 2. Comparison of corrosion resistance of titanium alloy WT1-0 with other materials in seawater

Wykonywanie połączeń nierozłącznych z tytanu i jego stopów może być realizowane przy zastosowaniu różnych metod spawania, tzn.: spawania, zgrzewania, lutowania oraz klejenia. Najczęściej stosowane obecnie procesy spawania to 141 (TIG), 131 (MIG), 15 (PAW), spawanie laserowe i spawanie wiązką elektronów. W przypadku zgrzewania stosowane jest zgrzewanie elektryczne oporowe punktowe oraz liniowe, zgrzewanie z mieszaniem (FSW), zgrzewanie tarciove, zgrzewanie wybuchowe oraz zgrzewanie dyfuzyjne. Do lutowania wykorzystuje się piece próżniowe z kontrolowaną atmosferą. Stosując każdą z wymienionych metod należy bezwzględnie pamiętać o specyficznych właściwościach tego materiału, które determinują różne trudności wpływające na spawalność tytanu. Do podstawowych zalicza się [6÷8]:

- bardzo wysoką aktywność chemiczną w podwyższonej temperaturze z węglem, azotem, tlenem i wodorem. Źródła literaturowe podają różne (w zakresie 260 °C÷400 °C) wartości temperatury krytycznej [6]. Z tego względu wymagana jest osłona obszaru spawania przy zastosowaniu gazu obojętnego (Ar, He) oraz specjalnych komór albo nakładek spawalniczych ograniczających dostęp powietrza (rys. 3),
- niskie przewodnictwo cieplne, które prowadzi do rozrostu ziaren ze względu na wydłużony czas przebywania spoiny oraz SWC w wysokiej temperaturze,
- skłonność do rozrostu ziaren podczas nagrzewania do wysokich temperatur, co jest charakterystyczne dla procesu spawania. Ma to szczególne znaczenie w zakresie stabilności fazy β (>880 °C),
- konieczność stosowania skoncentrowanych źródeł ciepła, co wynika z wysokiej temperatury topnienia tytanu.
- Badania technologii łączenia i właściwości eksploatacyjnych tytanu i jego stopów prowadzone są od wielu lat. Dotyczą spawania skoncentrowanymi źródłami ciepła [9÷11], spawalności tytanu [10÷12], odporności korozyjnej [13], metalizacji natryskowej [14,15], jak również implementacji w medycynie i biomateriałach [16,17].



Rys. 3. Stała komora spawalnicza (a) oraz komory wodzące (b) służące do ochrony obszaru spawania [18]

Fig. 3. Permanent welding chamber (a) and the trailing chamber (b) designed to protect the weld area

Badania własne

Cel i zakres badań

Celem badań było opracowanie wytycznych umożliwiających kwalifikowanie technologii spawania płaszczoworurowego wymiennika ciepła wykonanego z tytanu Grade 2

zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 15614-5 [19]. Dodatkowym celem było określenie sposobu przygotowania elementów do spawania oraz jego wpływu na generowane niezgodności spawalnicze.

Po analizie trudności związanych ze spawaniem tytanu i jego stopów oraz konstrukcji płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła typu JAD B przyjęto następujący plan badań:

- 1) Dobór metody spawania.
- 2) Wykonanie prób technologicznych spawania z zastosowaniem komór wodzących w celu ustalenia parametrów prądowych oraz stopnia utlenienia powierzchni po spawaniu.
- 3) Wykonanie złączy próbných o wymiarach zgodnych z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-5 [19].
- 4) Przeprowadzenie badań nieniszczących (NDT) oraz niszczących (DT) zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 15614-5 [19]:
 - badania wizualne VT,
 - badania penetracyjne PT,
 - badania radiograficzne RT,
 - badania metalograficzne makroskopowe,
 - badania metalograficzne mikroskopowe,
 - statyczna próba rozciągania złączy spawanych.
 - próba zginania.
 - pomiary mikrotwardości w obszarze złącza spawanego (badania dodatkowe).
- 5) Analiza wyników badań i sformułowanie wniosków.

Charakterystyka tytanu Grade 2

Do badań zastosowano najbardziej rozpowszechniony w przemyśle gatunek tytanu technicznego oznaczony jako ASME SB-265 Gr 2, gdzie: SB-265 – oznaczenie postaci wyrobu: płaskowniki i płyty, Gr 2 – określenie klasy materiału: Grade 2 (gatunek 2). Nie zmienia on mikrostruktury α na skutek obróbki cieplnej. Charakteryzuje się doskonałą równowagą pomiędzy wytrzymałością i plastycznością. W przypadku zachowania odpowiednich warunków spawania uznaje się go za łatwo spawalny oraz zgrzewalny. Odporny jest również na działanie środowisk utleniających. Według raportu technicznego PN-CR ISO 15608 [20] tytan techniczny Gr 2 należy do grupy 51.1.

Jej właściwości wytrzymałościowe wg normy ASTM B-265 Gr 2 oraz atestu materiałowego oraz skład chemiczny przedstawiono w tablicach I oraz II.

Tablica I. Właściwości mechaniczne tytanu technicznego wg ASTM B-265 Gr 2 oraz atestu materiałowego 30589

Table I. Mechanical properties of pure titanium acc. to ASTM B-265 Gr 2 and the certificate of material 30589

Właściwość	R _m [MPa]	Re [MPa]	HV	A [%]
ASTM B-265 Gr 2	345	275	145	20
atest materiałowy 30589	415	323	-	34

Tablica II. Skład chemiczny tytanu technicznego wg ASTM B-265 Gr 2 oraz atestu materiałowego 30589

Table II. Chemical composition of pure titanium acc. to ASTM B-265 Gr 2 and the certificate of material 30589

	%N	%C	%H	%Fe	%O	%Pd	%Al	%Mo	%V	%Ni	%Ti
ASTM B-265 Gr 2	<0,03	<0,1	<0,015	<0,3	<0,25	-	-	-	-	-	~99,305
atest materiałowy 30589	0,008	0,01	0,001	0,095	0,12	-	-	-	-	-	~99,766

Wykonanie złączy próbných

Ze względu na zakres grubości elementów, z których wykonany jest wymiennik oraz jego konstrukcję do spawania wytypowano proces 141 (TIG). Do wykonania złączy próbných zastosowano pręt o oznaczeniu wg AWS A5.16: ER Ti-2 i średnicy 2,0 mm. Skład chemiczny oraz właściwości wytrzymałościowe stopiwa przedstawiono w tablicy III.

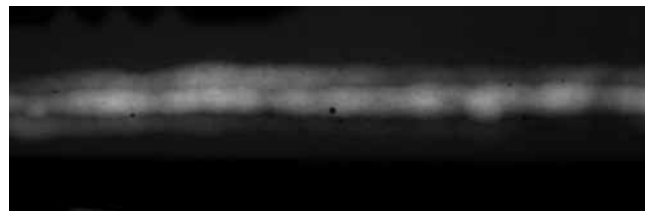
Próbki w postaci blach o wymiarach zgodnych z PN-EN ISO 15614-5 [19] zostały przed spawaniem dokładnie oczyszczone oraz szczipione. Krawędzi elementów nie ukosowano (spoina na I), boczne powierzchnie przeszlifowano. Gaz zastosowany do osłony spoiny, grani (gaz formujący) oraz w komorze wodzącej to I1 (99,99% Ar) wg PN-EN ISO 14175 [21]. Zastosowano prąd stały o biegunowości ujemnej DC(-) oraz elektrodę nietopliwą WL15 o średnicy 3,2 mm. Ilość wprowadzonego ciepła była na poziomie 0,24÷0,32 kJ/mm. Pierwsze złącza wykonane w ramach prób technologicznych zostały poddane badaniom wizualnym oraz radiograficznym. Podczas badań wizualnych nie stwierdzono niezgodności spawalniczych. Badania radiograficzne ujawniły w spoinie pojedyncze pęcherze gazowe zlokalizowane w obszarze przejścia lica spoiny w materiał rodzimy (rys. 4).

Na podstawie analizy sposobu przygotowania elementów przed spawaniem ustalono, że stosowanie szlifierek szybkoobrotowych prowadzi do lokalnego nadtopienia obszarów na bocznych krawędziach próbek i formowania związków międzymetalicznych. W czasie stapiania krawędzi powstają gazy, które są przyczyną formowania pęcherzy gazowych. Po zastosowaniu szlifowania wolnoobrotowego niezgodności te nie pojawiały się. Następnie wykonano złącza próbne, które zostały poddane badaniom zgodnie z ustalonym planem.

Tablica III. Skład chemiczny oraz właściwości wytrzymałościowe stopiwa wg atestu materiałowego 902485

Table III. Chemical composition and mechanical properties of filler material acc. to material certificate 902485

Skład chemiczny					
%C	%Fe	%O	%H	%N	%Ti
0,015	0,03	0,09	0,004	0,007	reszta
Skład chemiczny					
Rp _{0,2} [MPa]		R _m [MPa]		A [%]	
275		540		20	



Rys. 4. Fragment radiogramu z widocznymi pęcherzami gazowymi w postaci ciemnych kropek

Fig. 4. Part of radiograph with visible porosity (dark spots)

Wyniki badań i ich analiza

Badania nieniszczące

Badania wizualne (VT), penetracyjne (PT) oraz radiograficzne (RT) złączy próbnych wykonano zgodnie z zaleceniami przedmiotowych PN-EN ISO 17637 [22], PN-EN ISO 3452-1 [23] oraz PN-EN ISO 17636 [24]. Badania nie ujawniły niezgodności spawalniczych, np. podtopienia lica i grani, pęcherzy gazowych, pęknięć i innych. Nie stwierdzono występowania tlenku tytanu (rutylu) na powierzchni lica spoiny oraz grani, co jest wynikiem poprawnie dobranego natężenia przepływu gazu osłonowego oraz zastosowania komór. Pozwoliło to na sklasyfikowanie badanych złączy na poziomie jakości B zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 5817 [25].

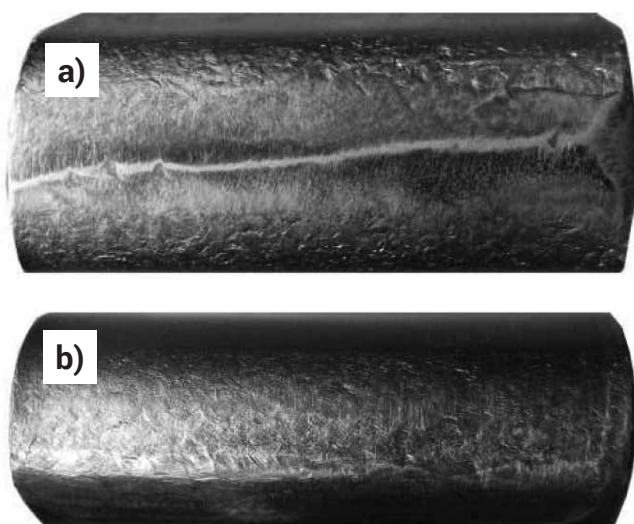
Badania niszczące

Badania wytrzymałości na rozciąganie

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono zgodnie z PN-EN ISO 4136 [26] oraz PN-EN ISO 6892-1 [27]. Temperatura badania wynosiła 23 ± 5 °C. Do badań zastosowano uniwersalną maszynę wytrzymałościową ZD30. Uzyskano wartości (tablica IV) powyżej założonego kryterium akceptacji ($R_m = 345$ MPa), a zerwanie próbek nastąpiło w materiale rodzimym, co potwierdza właściwy dobór materiału dodatkowego, techniki i parametrów spawania.

Tablica IV. Wyniki statycznej próby rozciągania złączy próbnych
Table IV. The results of the tensile test

Nr próbki	Seria	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Średnia wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Miejsce zerwania próbki
T-01	1	574	576,33	Materiał rodzimy
	2	581		Materiał rodzimy
T-02	3	524	521,33	Materiał rodzimy
	4	520		Materiał rodzimy



Rys. 5. Widok spoiny po próbie zginania: a) lico; b) grani
Fig. 5. View of weld after bending test: a) face; b) root

Próba zginania

Statyczną próbę zginania przeprowadzono wg PN-EN ISO 5173 [28]. Próbkę pobrano zgodnie z PN-EN ISO 15614-1. Wykonano po dwie próby z rozciąganiem lica (TFBB) oraz z rozciąganiem grani (TRBB). Wyniki badań przedstawiono w tablicy V. Na podstawie obserwacji próbek okiem uzbrojonym (lupa 5x) nie stwierdzono pęknięć oraz naderwań (rys. 5). Świadczy to o poprawnie wykonanych złączach próbnych bez niezgodności spawalniczych i jednocześnie charakteryzujących się dobrą plastycznością.

Tablica V. Wyniki próby zginania
Table V. The results of the bending tests

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

Badania metalograficzne makroskopowe

Badania metalograficzne makroskopowe przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 17639 [29]. Na rysunku 6 przedstawiono zgląd metalograficzny badanego złącza spawanego. Nie stwierdzono występowania niezgodności spawalniczych typowych dla spawania metodą 141 tytanu, np. podtopień lica i grani, pęcherzy gazowych oraz pęknięć. Próbkę charakteryzują się symetryczną budową spoiny i prawidłowym przetopieniem krawędzi. Stwierdzono intensywny rozrost ziaren w spoinie i zmniejszanie ich rozmiaru w kierunku materiału rodzimego.



Rys. 6. Zgląd makroskopowy złącza próbnego, trawienie HCl/HF
Fig. 6. Macro section of welded specimen, etching HCl/HF

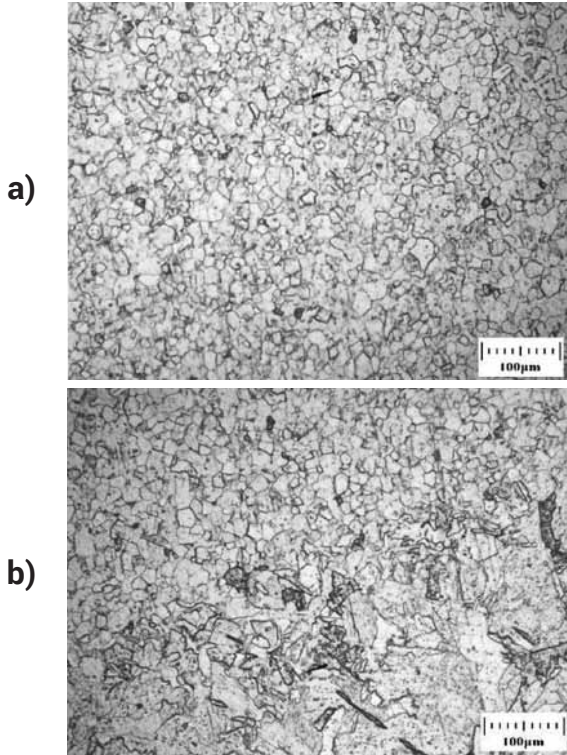
Badania metalograficzne mikroskopowe

Badania metalograficzne mikroskopowe przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 17639 [29]. Próbkę zostały przygotowane wg standardowej procedury (szlifowanie, polerowanie, trawienie). Do trawienia zastosowano odczynnik HCl/HF. Przykładowe wyniki badań mikroskopowych przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Na rysunku 7a przedstawiono strukturę materiału rodzimego, drobne ziarna fazy α charakterystyczne dla tytanu technicznego. W obszarze przejścia (rys. 7b) zidentyfikowano gruboziarniste fazy α' (struktura iglasta) i α (struktura ziarnista) w linii wtopienia oraz strefę częściowej rekrytalizacji fazy β . Występowanie tych faz jest konsekwencją oddziaływania cyklu cieplnego spawania. Rysunek 8a i 8b przedstawia makrostrukturę SWC w pobliżu linii wtopienia oraz spoiny. W obszarze tym zaobserwowano wzrost wielkości ziarna, co charakteryzuje fazy gruboziarniste (α'). W rozpatrywanym przypadku taki

wzrost wielkości ziarna nie spowodował spadku plastyczności, o czym świadczą poprawne wyniki próby zginania, jak również wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie.

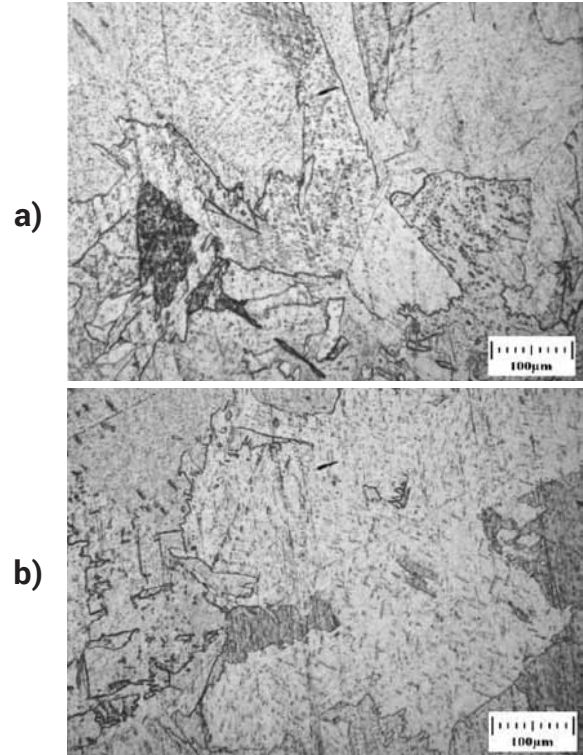
Pomiary mikrotwardości

Pomiary mikrotwardości złączy spawanych wykonano metodą Vickersa zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 6507-1 [30].

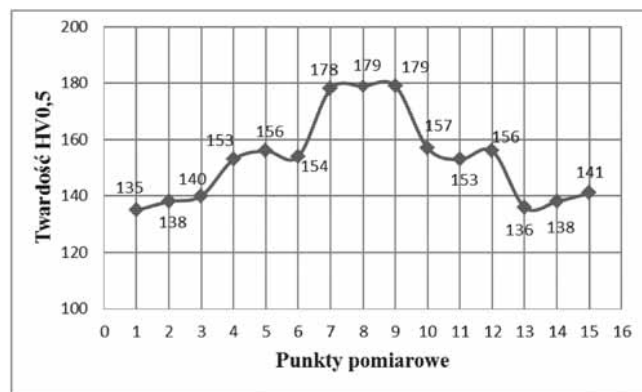


Rys. 7. Mikrostruktura materiału rodzimego tytanu Gr. 2 (a) oraz strefy przejściowej MR-SWC-SPOINA (b), trawienie HCl/HF
Fig. 7. The microstructure of the base material of titanium Gr. 2 (a) and transition zone BM-HAZ-WM (b), etching HCl/HF

Zastosowano siłę obciążającą 4,9 N (HV0,5). Wykonano po trzy pomiary w materiale rodzimym, strefie wpływu ciepła oraz spoinie (15 punktów pomiarowych). Wyniki badań przedstawiono na rysunku 9. Największy wzrost twardości stwierdzono w spoinie (179 HV0,5). Jest to charakterystyczna cecha tego materiału ze względu na występowanie w tym obszarze gruboziarnistej fazy (faza α' i α). Stwierdzone wartości maksymalne twardości HV0,5 nie powodują wzrostu kruchości spoiny, co potwierdziły badania wytrzymałościowe i próba zginania.



Rys. 8. Mikrostruktura SWC (a) oraz spoiny (b), trawienie HCl/HF
Fig. 8. The microstructure of the HAZ (a) and WM (b), etching HCl/HF



Rys. 9. Rozkład twardości złącza próbnego
Fig. 9. Hardness distribution across test joint

Wnioski

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

Zastosowana technologia spawania pozwoliła na pozytywne kwalifikowanie technologii spawania zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 15614-5.

Istotnym aspektem procesu technologicznego spawania jest właściwe przygotowanie krawędzi elementów (ukosowanie). Należy zwrócić uwagę na stosowanie odpowiednich narzędzi, np. tarczy do stali nierdzewnej austenitycznej

oraz dobór parametrów obróbki ściernej lub skrawaniem. Nieodpowiednie przygotowanie prowadzi do formowania się niezgodności spawalniczych, np. pęcherzy gazowych.

Wyniki próby zginania oraz wytrzymałości na rozciąganie pozwalają stwierdzić, że zastosowana ilość wprowadzonego ciepła oraz rodzaj spoiwa zapewniają właściwą plastyczność złącza spawanego.

W spoinie zidentyfikowano fazy gruboziarniste o najwyższej twardości. W obszarze SWC doszło do zmniejszenia rozmiaru ziarna i spadku twardości. Uzyskane struktury nie spowodowały niedopuszczalnego spadku właściwości wytrzymałościowych i plastycznych.

Autorzy dziękują firmie SECESPOL Sp. z o.o. z Nowego Dworu Gdańskiego za pomoc w wykonaniu złączy próbnych wykorzystanych w badaniach

Literatura

- [1] Świerczyńska A., Rogalski G., Fydrych D.: Badania właściwości i struktury spawanych austenitycznych rur wymienników ciepła. Przegląd Spawalnictwa 6/2010.
- [2] Rogalski G., Fydrych D.: Kwalifikowanie technologii spawania wg PN-EN ISO 15614-8 na przykładzie płyt sitowych w U-rurowych wymiennikach ciepła. Przegląd Spawalnictwa 2/2012.
- [3] Rogalski G., Łabanowski J., Fydrych D., Świerczyńska A.: Wpływ obróbki cieplnej na właściwości spawanych austenitycznych rur wymienników ciepła. Przegląd Spawalnictwa 6/2014.
- [4] www.secespol.pl
- [5] Bylica A., Sieniawski J.: Tytan i jego stopy. Warszawa, PWN 1985.
- [6] Tubielewicz K., Zaborski A.: Specyfika łączenia (spawania) stopów tytanu. Technologia i Automatyzacja Montażu 2-3/2007.
- [7] Banasik M., Szczok E.: Osiągnięcia i problemy w zakresie spawania tytanu i jego stopów Cz. I. Tytan tworzywo stosowane na konstrukcje spawane. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 6/1996.
- [8] Osip H., Wójcik J.: Zastosowanie stopów tytanu na konstrukcje okrętowe. Przegląd Spawalnictwa 12/1994.
- [9] Szymlek.: Spawanie elektronowe i spawanie TIG blach z tytanu technicznego. Advances in Materials Science 1/2008.
- [10] Lacki P., Adamus K.: Specyfika spawania cienkich blach tytanowych o różnych właściwościach mechanicznych. Obróbka Plastyczna Metali 3/2012.
- [11] Szymlek K.: Spawanie laserowe blach z tytanu technicznego. Przegląd Spawalnictwa 3/2009.
- [12] Szczok E.: Badania i zastosowanie łukowego spawania grubych blach tytanowych. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 5/1997.
- [13] Szymlek K., Kania C.: Fouling of titanium and stainless steel in sea water. Advances in Materials Science 2/2009.
- [14] Chmielewski T., Golański D.: Modelowanie numeryczne naprężeń własnych w złączach Al_2O_3-Ti oraz $Al_2O_3-(Ti+Al_2O_3)$ formowanych podczas natryskiwania detonacyjnego. Przegląd Spawalnictwa 9/2009.
- [15] Chmielewski T., Golański D.: Selected properties of Ti coatings deposited on ceramic AlN substrates by thermal spraying. Welding International 8/2013.
- [16] Orlicki R., Kłaptocz B.: Tytan i jego stopy – właściwości w stomatologii oraz sposoby przetwarzania. Inżynieria Stomatologiczna. Biomateriały. Tom 11/2003.
- [17] Jażdżewska M., Zieliński A.: Modyfikacja struktury i właściwości warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti-6Al-4V otrzymywanej techniką nadtapiania laserowego w warunkach ultraszybkiej krystalizacji. Inżynieria Materiałowa 5/2009.
- [18] <http://www.rywal.com.pl>
- [19] PN-EN ISO 15614-5:2008 Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Badanie technologii spawania. Część 5: Spawanie łukowe tytanu, cyrkonu i ich stopów.
- [20] PN-CR ISO 15608:2002 Spawanie. Wytyczne systemu podziału materiałów metalowych na grupy.
- [21] PN-EN ISO 14175:2009 Materiały dodatkowe do spawania. Gazy i mieszaniny gazów do spawania i procesów pokrewnych.
- [22] PN-EN ISO 17637:2011 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne złączy spawanych.
- [23] PN-EN ISO 3452-1:2013-08 Badania nieniszczące. Badania penetracyjne. Część 1: Zasady ogólne.
- [24] PN-EN ISO 17636:2013-06 Badania nieniszczące spoin. Badania radiograficzne. Część 1: Techniki promieniowania X i gamma z błoną.
- [25] PN-EN ISO 5817:2014-05 Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
- [26] PN-EN ISO 4136:2013-05 Badania niszczące złączy spawanych metali. Próba rozciągania próbek poprzecznych.
- [27] PN-EN ISO 6892-1:2010 Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia.
- [28] PN-EN ISO 5173:2010 Spawalnictwo. Badania niszczące spoin w materiałach metalowych. Badanie na zginanie.
- [29] PN-EN ISO 17639:2013-12 Badania niszczące spawanych złączy metali. Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych.
- [30] PN-EN ISO 6507-1:2007 Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badań