

# Wpływ metody spawania na żarowytrzymałość złączy spawanych cienkich blach ze stopu Inconel 718

The influence of the welding method on the heat resistance of welded joints of Inconel 718 thin metal sheets

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wpływ spawania metodą GTAW i laserem bez dodatku spoiwa, cienkich blach ze stopu Inconel 718 na żarowytrzymałość ich złączy. Technologiczne próby żarowytrzymałości próbek ze złączami spawanymi prowadzono przy użyciu pełzarki w stałej temperaturze wynoszącej  $860 \pm 2$  °C i przy stałym naprężeniu  $\sigma = 150$  MPa. Badania wykazały, że złącza spawane tych blach wykonane laserem zarówno w stanie ich dostawy, jak i po obróbce cieplnej posiadają o ok. 60÷80% większą żarowytrzymałość niż złącza wykonane metodą GTAW.

**Słowa kluczowe:** Inconel 718; spawanie metodą GTAW (nieopłowiwą elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych); spawanie laserem; wysokotemperaturowe pełzanie

## Abstract

The paper presents the influence of GTAW welding and laser without the addition of binders, thin sheets of Inconel 718 on the creep resistance of the connectors. Process sample creep resistance specimens of fused-fiber couplers were carried out using creep testing machine using a constant temperature of  $860 \pm 2$  °C and a constant stress  $\sigma = 150$  MPa. The tests have shown that welded joints of these sheets made with a laser, both in the state of their delivery and after heat treatment, have about 60-80% higher heat resistance than joints made using the GTAW method.

**Keywords:** Inconel 718; GTAW (gas tungsten arc welding) method; laser welding; high temperature creep test

## Wstęp

Stop na osnowie niklu, Inconel 718, należy do licznej grupy żaroodpornych i żarowytrzymałych tworzyw metalicznych stosowanych do wytwarzania różnych konstrukcji spawanych, zwłaszcza w przemyśle lotniczym na części wylotowe spalin w silnikach PW400 i CF6 [1÷4]. Stop ten jest dobrze spawalny, a także można go obrabiać cieplnie przez utwardzenie wydzieleniowe [5÷9]. Elementy wykonane z cienkich blach z Inconelu 718 mogą pracować w wysokiej temperaturze, która w przypadku komór spalania może wynosić do 1300 °C [2,8].

Podczas pracy, konstrukcje spawane z tego stopu oprócz oddziaływania wysokiej temperatury poddane są oddziaływaniu naprężeń. W związku z tym, żarowytrzymałe właściwości złączy spawanych tych konstrukcji mają bardzo duże znaczenie.

W artykule przedstawiono wpływ metody spawania cienkich blach ze stopu Inconel 718 na czas do zerwania złączy spawanych poddanych wysokotemperaturowemu pełzaniu.

## Materiał i metodyka badań

Materiałem do badań były cienkie blachy o grubościach 0,5; 0,9; 1,2 mm ze stopu Inconel 718, których skład chemiczny określono widmową analizą spektralną przy użyciu spektrometru emisyjnego Q4 Tasman (Bruker). W tablicy I zestawiono średni skład chemiczny blach użytych do badań.

Do technologicznych prób żarowytrzymałościowych przygotowano próbki blach ze złączami spawanymi wykonanymi łukiem elektrycznym w metodzie GTAW oraz przy użyciu strumienia monochromatycznego światła uzyskanego w laserze TruLaser 5020.

Badania wytrzymałości na pełzanie złączy spawanych cienkich blach (grubości 0,5; 0,9; 1,2 mm) ze stopu Inconel 718 polegały na określeniu czasu do ich zerwania podczas technologicznych prób wysokotemperaturowego pełzania prowadzonych w temperaturze  $860 \pm 2$  °C przy stałym naprężeniu  $\sigma = 150$  MPa [10]. Do tych badań dla potrzeb pracy przygotowano próbki (rys. 1) z otworami  $\varnothing 8$  w części chwytowej. Próbki w uchwytach mocowano przy pomocy trzpieni  $\varnothing 8$ .

Dr inż. Zenon A. Opiekun – BorgWarner, dr inż. Agnieszka Jędrusik – Politechnika Rzeszowska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: [agnieszkajedrusic@o2.pl](mailto:agnieszkajedrusic@o2.pl)

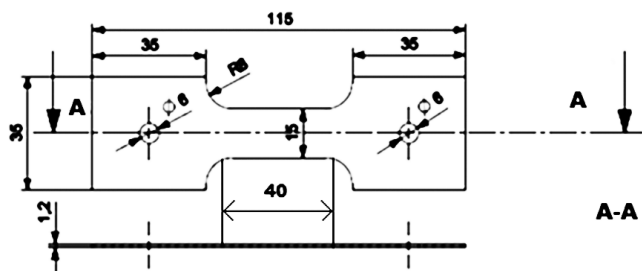
**Tablica I.** Skład chemiczny blach o grubościach 0,5; 0,9; 1,2 mm ze stopu Inconel 718 przeznaczonych do badań (średnia z 5-ciu pomiarów dla każdej grubości blachy)

**Table I.** Chemical composition of sheet thicknesses of 0.5, 0.9, 1.2 mm Inconel 718 to be tested (average of the 5 measurements for each sheet thickness)

Grubość blachy, mm	Składniki stopowe, % wagowy										
	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Si	C	B	N	Ni
0,5	17,30	16,20	5,20	2,45	1,0	0,55	0,16	0,050	0,022	0,040	reszta
0,9	17,20	16,30	5,25	2,50	1,20	0,57	0,17	0,061	0,021	0,038	reszta
1,2	17,28	16,15	5,30	2,38	1,18	0,54	0,14	0,059	0,023	0,041	reszta

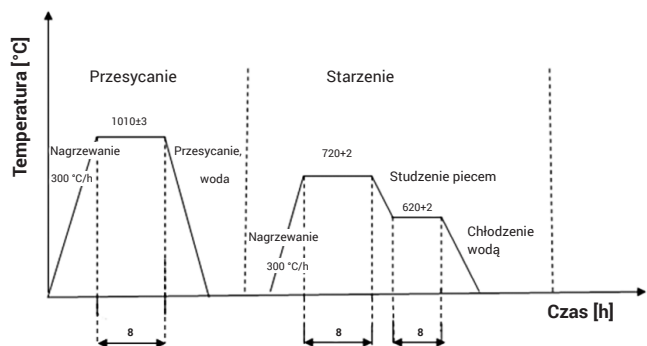
Uchwyty i trzpienie wykonano z żarowytrzymałego stopu na podstawie kobaltu MAR-M509 [11]. Pełzano próbki blach ze złączami spawanymi nieobrobionymi cieplnie (blachy w stanie dostawy) i obrobionymi cieplnie.

Obrobkę cieplną blach bez złączy spawanych i ze złączami spawanymi wykonano przy użyciu pieca Nabertherm N61/H z programowanym przebiegiem procesu wg schematu przedstawionego na rysunku 2.



**Rys. 1.** Przykładowa próbka do badań wytrzymałości na wysokotemperaturowe pełzanie

**Fig. 1.** Example of sample for testing high-temperature creep strength

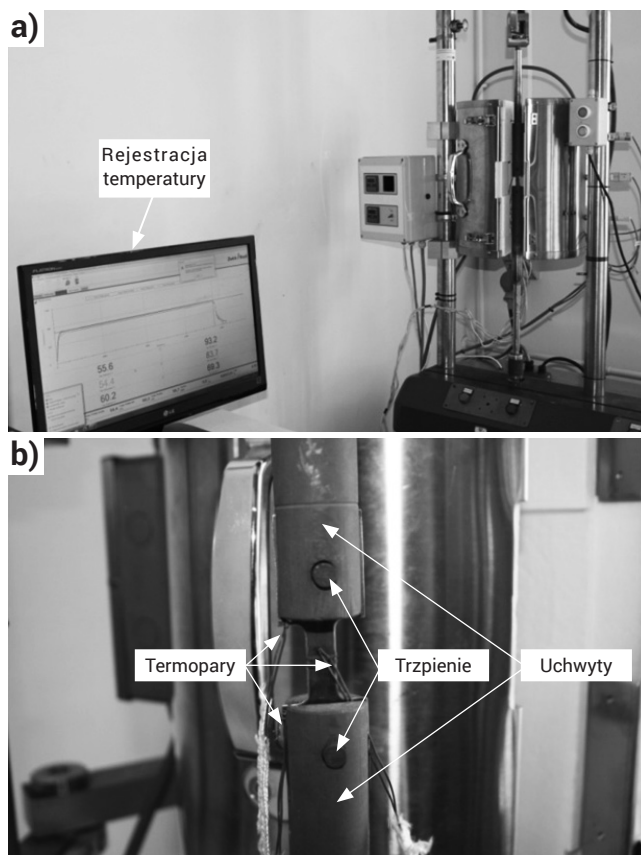


**Rys. 2.** Schemat przebiegu obróbki cieplnej blach ze stopu Inconel 718 ze złączami spawanymi wykonanymi metodą GTAW i laserem

**Fig. 2.** Flow chart of the heat treatment of metal alloy Inconel 718 with welded joints made using GTAW and laser

Próby pełzania wykonano, według normy [12] używając zmodernizowanej pełzarki WPM ZST3/3, firmy VEB Verktstoffprufmaschinen Leipzig wyposażonej w trójstrefowy piec grzewczy LAB TEMP, firmy Thermocraft Incorporated USA o maksymalnej temperaturze grzania 1200 °C (stosując po 3 próbki z każdej grubości spawanych metodą GTAW oraz przy użyciu lasera) oraz po obróbce cieplnej wg tych samych założeń (stosując po 3 próbki z każdej grubości blach spawanych metodą GTAW oraz przy użyciu lasera).

Na rysunku 3 przedstawiono widok pełzarki z zamocowaną próbką i umocowanymi trzema termoparami na jej długości.



**Rys. 3.** Pełzarka WPM ZST 3/3 (a), widok otwartego pieca z umocowaną w uchwytach za pomocą trzpieni próbką w jego komorze i zainstalowanymi termoparami (b)

**Fig. 3.** Creep testing machine WPM ZST 3.3 (a), back from the furnace with cemented in the holders by means of bolts in the sample chamber and installed thermocouples (b)

## Wyniki badań

Na rysunku 4 i 5 przedstawiono przykładowe próbki zerwane w próbach wysokotemperaturowego pełzania.

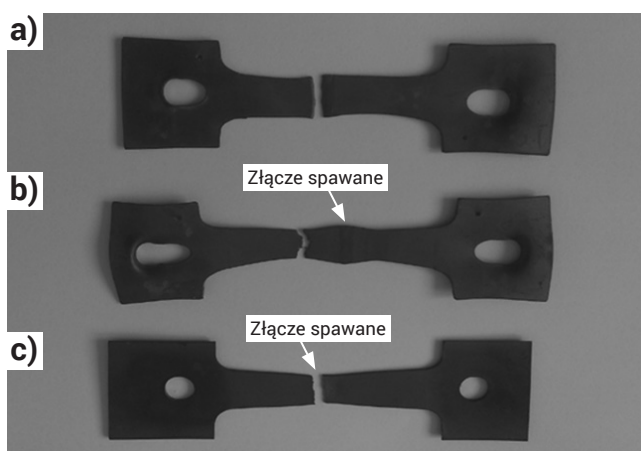
W tablicy II zestawiono wyniki prób wysokotemperaturowego pełzania, a na rysunku 6 w formie wykresu słupkowego czas do zerwania próbek blachy w stanie dostawy, obrobionych cieplnie i spawanych metodą GTAW i laserem.

Uzyskane rezultaty wskazują, że cienie blachy ze stopu Inconel 718 w stanie dostawy charakteryzują się znacznie krótszą wartością czasu do zerwania w próbie wysokotemperaturowego pełzania niż blachy obrobione cieplnie. Metoda spawania tych blach silnie wpływa na czas do zerwania w przyjętych warunkach wysokotemperaturowego

**Tablica II.** Czas do zerwania, wydłużenie trwałe i przewężenie próbek blach ze stopu Inconel 718 w próbie wysokotemperaturowe pełzanie. Średnia z trzech próbek

**Table II.** Time to break, elongation and contraction samples of sheet metal alloy Inconel 718 in a sample of high-temperature creep. The average of three samples

Blachy ze stopu Inconel 718	Czas do zerwania [h]	Wydłużenie [%]	Przewężenie [%]
Stan dostawy	12	48	55
Obrobione cieplnie	19,5	33	49
Stan dostawy spawane metodą GTAW	8,5	26	22
Obrobione cieplnie ze złączami spawanymi wykonanymi metodą GTAW	16	43	47
Stan dostawy spawany laserem	11	31	57
Obrobione cieplnie ze złączami spawanymi wykonanymi laserem	19,5	23	30

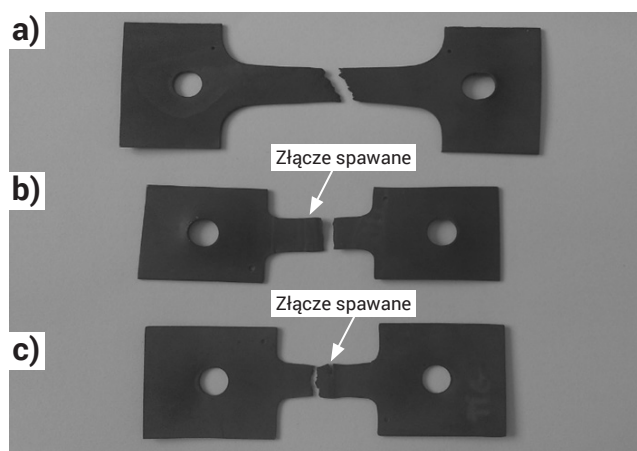


**Rys. 4.** Przykładowe próbki z blachy o grubości 0,9 mm w stanie dostawy zerwane po pełzaniu wysokotemperaturowym. MR (a), złącze spawane wykonane laserem (b), złącze spawane metodą GTAW (c), (MR-materiał rodzimy)

**Fig. 4.** Examples of sample sheet with a thickness of 0.9 mm, as supplied, broken after the high-temperature creep. MR (a), a laser welded joint is made (b), the welded joint is made by GTAW (c), (MR-native material)

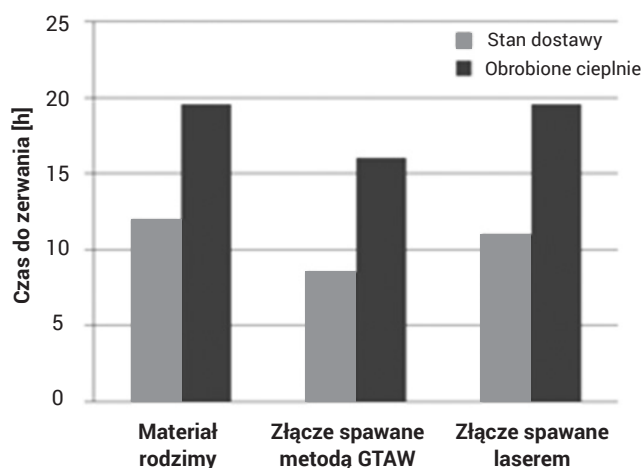
pełzania zarówno blach w stanie dostawy, jak i obrobionych cieplnie. Złącza spawane blach wykonane laserem, posiadają prawie dwukrotnie większą wartość czasu do zerwania, niż złącza spawane wykonane łukiem elektrycznym argonowym w metodzie GTAW. Blachy cienkie ze stopu Inconel 718 spawane laserem i obrobione cieplnie wykazują taką samą wartość czasu do zerwania jak materiał rodzimy (blachy obrobione cieplnie poddane wysokotemperaturowemu pełzaniu).

Cienkie blachy ze stopu Inconel 718 spawane metodą GTAW i obrobione cieplnie zrywają się (podobnie jak blachy spawane tą metodą w stanie dostawy) w obszarach złączy spawanych podczas prób wysokotemperaturowego pełzania. Złącza spawane tych blach wykonane łukiem elektrycznym charakteryzuje mniejsza żarowytrzymałość, a ich czas do zrywania w próbie wysokotemperaturowego pełzania ma mniejszą wartość ok. 30% niż czas do zrywania blach w stanie dostawy. Złącza spawane metodą GTAW blach obrobionych cieplnie mają większą wartość czasu do zrywania w tych próbach pełzania. Wartość czasu do zerwania złączy spawanych blach metodą GTAW i obrobionych cieplnie jest podobna do wartości czasu do zerwania materiału rodzimego bez obróbki cieplnej (w stanie dostawy).



**Rys. 5.** Przykładowe próbki z blachy o grubości 0,9 mm obrobione cieplnie, zerwane po pełzaniu wysokotemperaturowym. MR (a), złącze spawane wykonane laserem (b), złącze spawane metodą GTAW (c) (MR-materiał rodzimy)

**Fig. 5.** Examples of sample sheet with a thickness of 0.9 mm heat treated, broken off after the high-temperature creep. MR (a), a laser welded joint is made (b), the welded joint is made by GTAW (c) (MR-native material)



**Rys. 6.** Czas do zerwania w próbach wysokotemperaturowego pełzania próbek blach ze stopu Inconel 718. Warunki pełzania  $T = 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 150\text{ MPa}$

**Fig. 6.** Time to break into the high-temperature creep tests samples of sheet metal alloy Inconel 718. Terms of creeping  $T = 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 150\text{ MPa}$

### Mikrostruktura złączy spawanych blach w stanie dostawy i po obróbce cieplnej

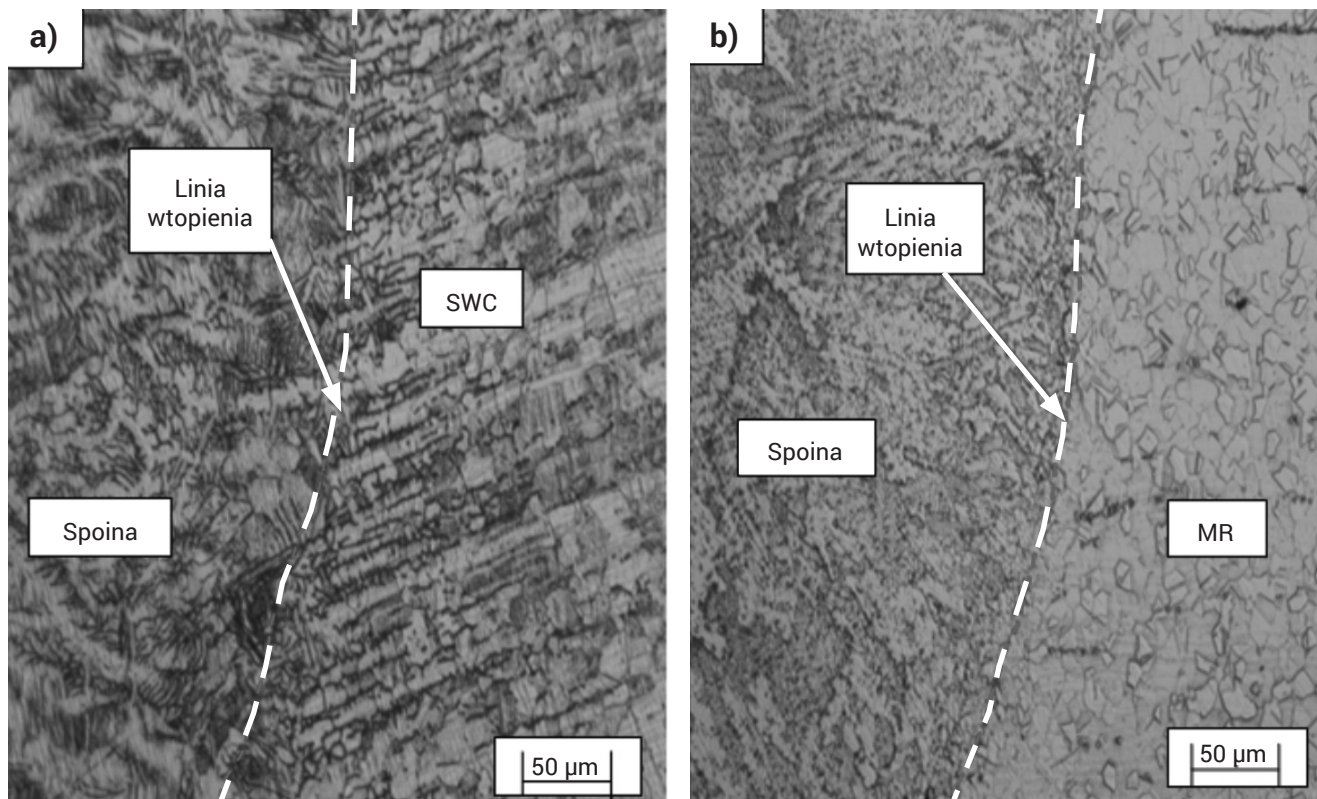
Przykładowe wyniki badań mikrostrukturalnych złączy spawanych cienkich blach ze stopu Inconel 718 w stanie dostawy przedstawiono na rysunku 7, a po obróbce cieplnej na rysunku 8. Zgłady trawiono odczynnikami Kallings'a.

Przykładowe wyniki badań mikrostrukturalnych złącza spawanego cienkich blach ze stopu Inconel 718 po obróbce cieplnej przedstawiono na rysunku 8. Zgłady trawiono odczynnikami Kallings'a.

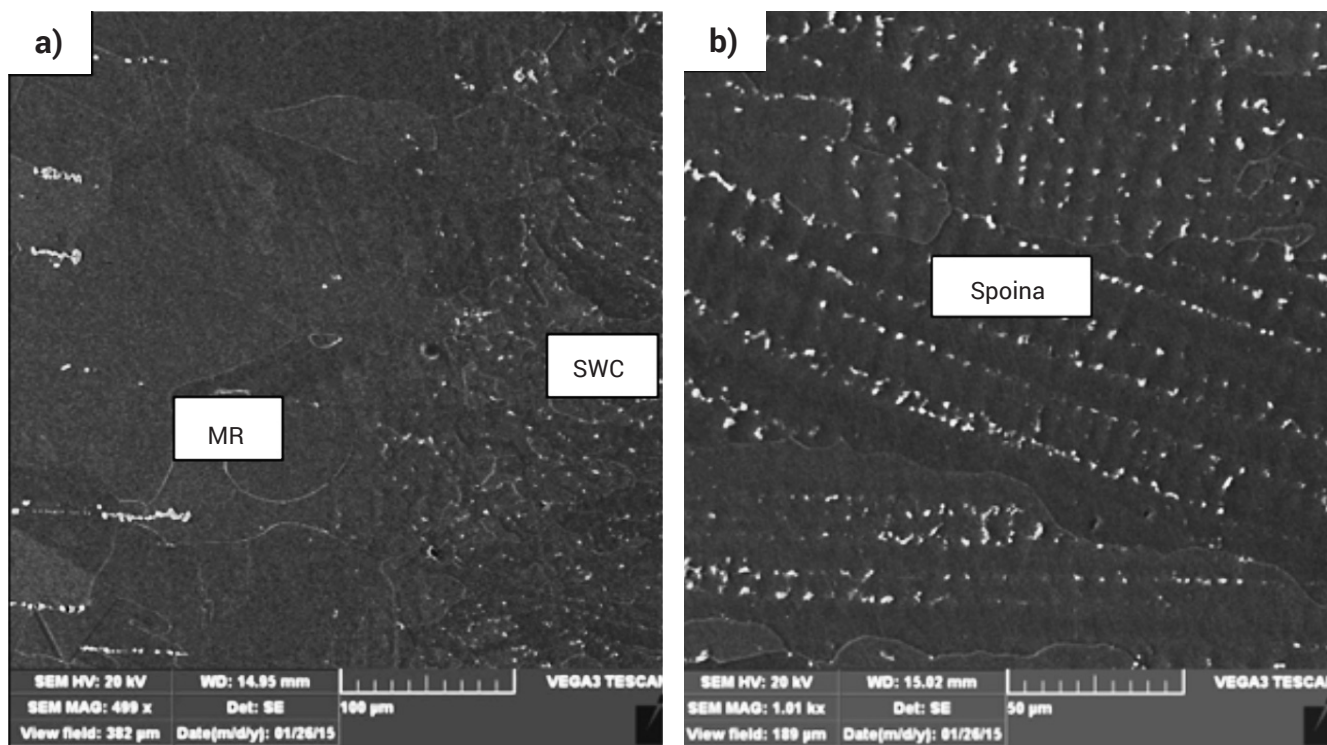
### Badania fraktograficzne

Dla zobrazowania przebiegu pęknięcia podczas prób rozciągania próbek blach w stanie dostawy, obrabionych cieplnie i spawanych metodą GTAW i laserem przeprowadzono badania fraktograficzne powierzchni przełomów.

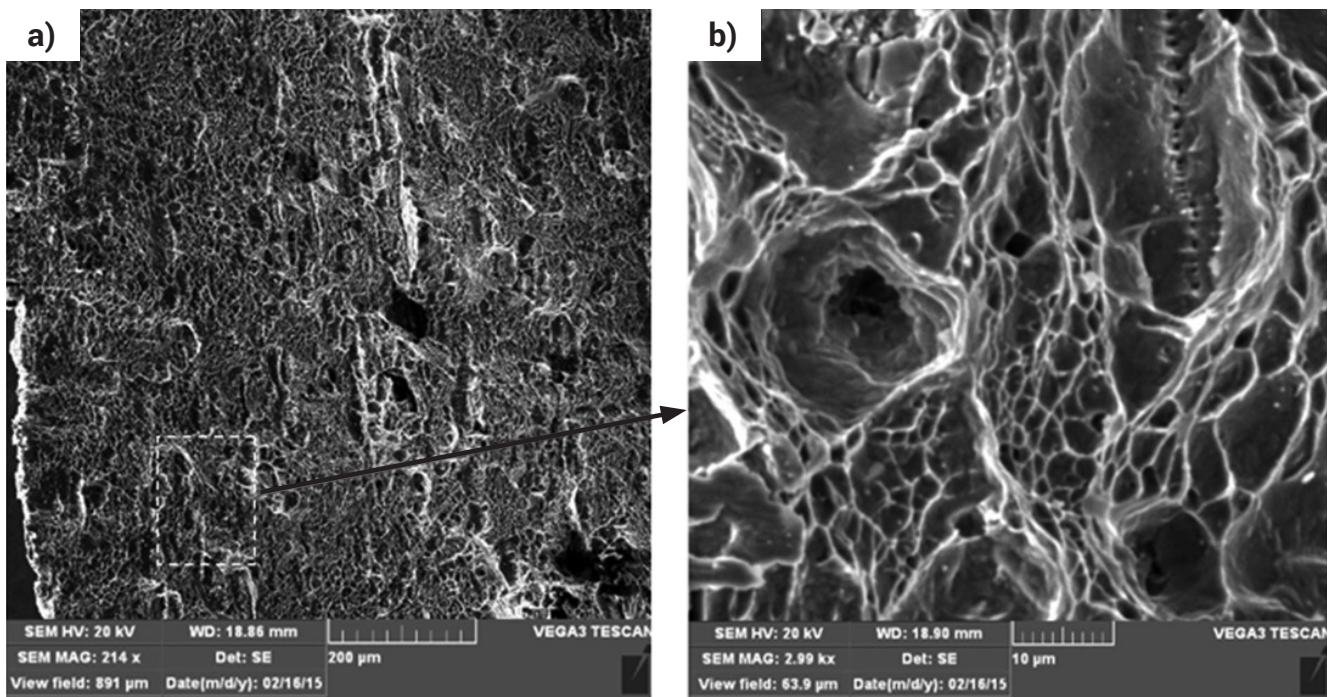
Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przykładowe przełomy uzyskane po zerwaniu rozciąganych statycznie próbek.



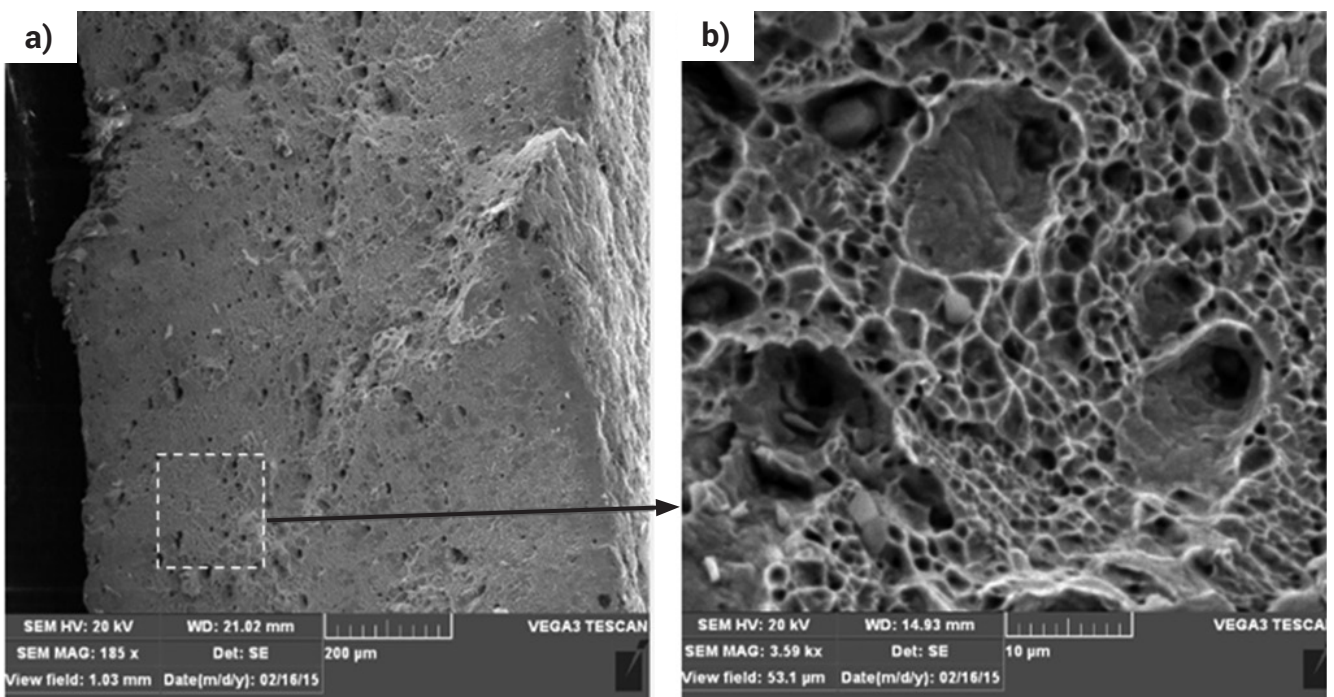
Rys. 7. Mikrostruktura złącza spawanego blachy o grubości 0,9 mm wykonanego łukiem elektrycznym (a), laserem (b). Mikroskop świetlny  
Fig. 7. The microstructure of the weld joint sheet with a thickness of 0.9 mm made of the cetric arc (a) laser (b). Optical microscope



Rys. 8. Mikrostruktura złącza spawanego blachy o grubości 1,2 mm wykonanego laserem. SWC-MR (a), spoina (b)  
Fig. 8. The microstructure of the welded joint sheet with a thickness of 1.2 mm made by laser. SWC-MR (a), the seal (b)



**Rys. 9.** Przykładowy przełom ciągliwy rozciąganej statycznie blachy o grubości 1,0 mm w stanie dostawy (a). Charakterystyczne krater z płaskimi strefami pęknięcia utworzone wokół węglików i faz międzymetalicznych zalegających w ich dnie (b)  
**Fig. 9.** An example of a breakthrough ductile statically stretched sheet with a thickness of 1.0 mm able to supply (a). Craters flat fracture zones formed around the carbides and intermetallic phases inside in their base (b)



**Rys. 10.** Przykładowy przełom ciągliwy rozciąganej statycznie blachy o grubości 1,2 mm obrabianej cieplnie (a). Drobne i duże krater z zalegającymi wewnątrz nich fazami międzymetalicznymi i węglnikami (z ciągliwymi i płaskimi strefami pęknięcia łupliwego) (b)  
**Fig. 10.** An example of a breakthrough ductile statically stretched sheet with a thickness of 1.2 mm heat-treated (a). Small and large craters overhang inside them intermetallic phases and carbides (with gluey and flat zones cleavage fracture) (b)

## Podsumowanie

Wejściowym materiałem do badań, były cienkie blachy w stanie dostawy, o grubości 0,5÷1,2mm, wykonane ze stopu na osnowie niklu Inconel 718. W składzie chemicznym blach z tego stopu występuje ok. 17% Cr, 16% Fe, 5,0% Nb, 2,5% Mo, 1,0% Ti, 0,60% Al i 0,05% C. Suma innych pierwiastków jak, Si, Mn, B i N nie przekracza 0,25%. W wyniku spawania, z zastosowaniem różnych skoncentrowanych strumieni ciepła, łuku elektrycznego argonowego i wiązki światła laserowego, uzyskano złącza spawane blach, które charakteryzują się trójstrefowością, spoinami, strefami wpływu ciepła (SWC) i strukturą materiału rodzimego (MR).

Ziarna w spoinach złącza posiadają różną morfologię (kształt i rozmiar) zależnie od metody i parametrów spawania. Także strefy wpływu ciepła (SWC) złącza spawanych mają różne szerokości i rozmiary ziarn zależne od metod spawania i ich parametrów takich jak: natężenie prądu, mocy lasera i prędkość spawania.

Uzyskane rezultaty wskazują, że cienkie blachy ze stopu Inconel 718 w stanie dostawy po badaniu wytrzymałości na rozciąganie charakteryzują się przelomami ciągliwymi z nieregularnymi o różnych rozmiarach kraterami, wewnątrz których zalegają fazy międzymetaliczne i węgliki. Po obróbce cieplnej przelomy blach charakteryzują przelomy ciągliwe, gdzie dominują pęknięcia łupliwe i rozrywanie mostków międzywarstw (rys. 10b).

Rozciągane blachy ze złączami spawanymi wykonanymi metodą GTAW zrywają się przeważnie w obszarach SWC i spoiny. Przelomy obejmujące obszary SWC mają przeważnie charakter międzykrystaliczny z niewielkim udziałem obszarów ciągliwych. Pękanie próbek blach spawanych laserem przebiega w spoinach lub w materiale rodzimym. Przelomy obejmujące spoinę mają charakter międzydendrytyczny ciągliwy z charakterystycznymi dołkami, wewnątrz których zalegają drobne fazy międzymetaliczne fazy i węgliki.

Miarą właściwości żarowytrzymałych cienkich blach ze stopu Inconelu 718 w stanie dostawy, obrabionych cieplnie i spawanych metodą GTAW oraz laserem jest czas do zerwania przy przyjętych warunkach wysokotemperaturowego pełzania (tablica II, rys. 6). Uzyskane rezultaty w powiązaniu z wynikami badań mikrostruktury złączy spawanych przed i po obróbce cieplnej wskazują, że spawanie laserem pozwala uzyskać niemal 62% wzrost wartości czasu do zerwania próbek ze złączami spawanymi obrabionymi cieplnie w porównaniu do MR w stanie dostawy i ok. 80% wzrost wartości czasu do zerwania próbek ze złączami spawanymi wykonanymi laserem w porównaniu do próbek ze złączami spawanymi blach wykonanymi w stanie dostawy metodą GTAW.

Próbki blach spawane laserem w stanie dostawy i obrabione cieplnie zrywają się poza złączami spawanymi (rys. 4b i 5b). Można zatem wnioskować, że złącza spawane wykonane laserem mają większą żarowytrzymałość niż materiał rodzimy.

## Literatura

- [1] Ruedl E.: Phase transformation in the alloy Hastelloy B, *Materials Research Bulletin* 10, 1975, pp. 16-22.
- [2] Agarwal D.C.: Chronology of Developments in Ni-Mo Alloys: The Last 70 Years, *Corrosion* 58, 2002, pp. 27-29.
- [3] Bloom D.S., Putnam. J.W., Grant.N.: *Trans. AIME, Journal of Metals* 194, 1, 626, 1952.
- [4] Lancaster J.: *Handbook of structural welding: processes, materials and methods used in the welding of major structures, pipelines and process plant*, Abington Publishing, Cambridge, 1992, pp. 56-58.
- [5] Hong J.K., Park J.H., Park N.K., Eom J.S., Kim M.B., Kang G.Y.: Microstructures and mechanical properties of Inconel 718 welds by CO<sub>2</sub> laser welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, pp. 1132-1138.
- [6] Gozlan E., Bamberger M.S., Dirnfeld F., Prinz B., Klodt J.: Topologically close-packed precipitations and phase diagrams of Ni-Mo-Cr and Ni-Mo-Fe and of Ni-Mo-Fe with constant additions of chromium, *Materials Science and Engineering A* 141,85,1991.
- [7] Durand-Charne M.: *The microstructure of superalloy*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997, pp. 48-52.
- [8] Yukawa N., Hida M., Imura T., Kawamura M., Mizuno Y.: Structure of Chromium Rich Cr-Ni, Cr-Fe, Cr-Co and Cr-Ni-Fe Alloy Particles Made By Evaporation In Argon, *Metallurgy Transaction* 3, 47,1972.
- [9] Klein J.H., Brooks C.R., Stansbury E.E.: The establishment of long-range order in NiCr using electron microscopy, *Physica Status Solidi* 38, 831, 1970.
- [10] Jędrusik A.: *Technologia cięcia, oczyszczania i spawania laserowego cienkich blach ze stopu Inconel 718*, Rozprawa doktorska, PRz, Rzeszów, 2015.
- [11] Opiekun Z.: Temperature influence of ceramic form on the structure of cobalt alloy MAR-M509 castings, *Acta Metallurgica Sinica (English letters)*.24(1):23-33, 2011.
- [12] E-139-00. *Standard Test Methods Conducting Creep. Creep-Rupture, and Stress-Rupture Test of Metallic Materials*