

# Lutowność wybranych nadstopów niklu

## Brazeability of selected nickel superalloys

### Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań mające na celu określenie lutowności spoiwem BNi2 wybranych nadstopów niklu Inconel 600, Inconel 625, Inconel 718 i Hastelloy X. Zamieszczono wyniki pomiarów rozpląwności, kątów zwilżania, wytrzymałości połączeń, mikrotwardości oraz omówione badania mikrostruktury połączeń z zastosowaniem mikroskopii świetlnej. Wyniki przeprowadzonych pomiarów pokazano w formie diagramów.

**Słowa kluczowe:** lutowanie twarde, stopy niklu

### Abstract

This paper presents the results of tests that specify the brazeability of selected nickel superalloys Inconel 600, Inconel 625, Inconel 718 and Hastelloy X. The article shows the results of spreading measurements, contact angles measurements, joint strength, microhardness and microstructure examinations. Metallographic examinations were supported by photographs made on the optical microscope. The results of the measurements are presented in the form of diagrams.

**Keywords:** brazing, nickel alloys

### Wstęp

Historia żarowytrzymałych nadstopów na bazie niklu jest ściśle związana z przemysłem lotniczym. Dynamiczny rozwój nadstopów nastąpił podczas drugiej wojny światowej. Związany był on z poszukiwaniem nowych materiałów na silniki lotnicze. Stal nierdzewna madażąc swoje ograniczenia przestała wystarczać konstruktorom. Zaczęły pojawiać się pierwsze nadstopy na osnowie niklu, które charakteryzowały się żarowytrzymałością i żaroodpornością, a także odpornością na korozję w wysokiej temperaturze [1+3].

Nowa grupa materiałów umożliwiła znaczny rozwój lotnictwa. W nowoczesnych konstrukcjach silników z nadstopów niklu wykonywane są części pracujące w temperaturze powyżej 500 °C. Ciągły rozwój tego typu materiałów dotyczy zmian składu chemicznego, technologii wytwarzania, otrzymywanych właściwości i zakresu zastosowań. Istotne są również technologie zajmujące się przetwarzaniem nadstopów. Należy tutaj uwzględnić cięcie, obróbkę plastyczną, obróbkę skrawaniem, odlewanie, spajanie, obróbkę cieplną, modyfikację powierzchni [2, 4].

W przypadku silników lotniczych nadstopy są powszechnie łączone metodą lutowania twardego i wysokotemperaturowego w piecach próżniowych. W związku z wysokimi wymaganiami przemysłu lotniczego oraz pojawiającymi się problemami podczas lutowania nie można ograniczać tej technologii do doboru parametrów procesu. Należy również brać pod uwagę inne powiązane ze sobą operacje, takie jak przygotowanie powierzchni (mycie, obróbka strumieniowo-ścierna, zastosowanie powłok), montaż i pozycjonowanie zestawów [3, 4].

Jednym z producentów silników lotniczych, który szeroko stosuje technologie lutowania twardego i wysokotemperaturowego, jest WSK „PZL-Rzeszów” S.A. Spółka we współpracy z Instytutem Mechaniki Precyzyjnej i Wydziałem Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej od wielu lat prowadzi badania mające na celu rozwój tej technologii [4+8].

W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań własnych, mające na celu określenie lutowności wybranych nadstopów niklu, czyli zdolności tworzenia połączeń o wymaganych właściwościach.

Mgr inż. Michał Baranowski – Instytut Mechaniki Precyzyjnej, dr inż. Jerzy Jakubowski – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: [michal.baranowski@imp.edu.pl](mailto:michal.baranowski@imp.edu.pl)

## Materiały do badań

W ramach eksperymentu badano lutowność czterech nadstopów na bazie niklu powszechnie stosowanych w przemyśle lotniczym:

- Inconel 600,
- Inconel 625,
- Inconel 718,
- Hastelloy X.

Trzy pierwsze z badanych materiałów, należące do nadstopów nikiel-chrom, charakteryzują się wysoką żarowytrzymałością i odpornością na korozję w wysokiej temperaturze. Inconel 600 jest nadstopem umacnianym roztworowo. W przypadku Inconelu 625 stosunkowo wysoka zawartość chromu i molibdenu powoduje, że materiał ten jest wyjątkowo odporny na utlenianie. Natomiast Inconel 718 jest nadstopem umacnianym wydzieleniowo. Swoje właściwości zawdzięcza przede wszystkim wydzieleniom faz  $\gamma''$  –  $Ni_3Nb$  oraz  $\gamma'$  –  $Ni_3(Al,Ti)$ . Czwarty materiał Hastelloy X należy do grupy nadstopów niklu z molibdenem, charakteryzujących się wysoką żaroodpornością oraz znaczną odpornością na korozję. Skład chemiczny badanych materiałów zamieszczono w tabelicy I [2, 9].

Jako spoiwo wybrano lut na osnowie niklu typu BNi2 (AMS 4777), powszechnie wykorzystywany w lotnictwie do lutowania lekkich, ruchomych części silników oraz ciężkich, nieruchomych elementów. Zalecany jest również do procesów spajania części stosowanych

w przemyśle medycznym i spożywczym. Jego skład chemiczny zamieszczono w tabelicy II. Temperatura solidus lutu BNi2 wynosi 970 °C, a likwidus 1000 °C. Wartość temperatury lutowania tym materiałem zawiera się w przedziale 1010÷1175 °C.

**Tablica II.** Skład chemiczny lutu BNi2, % [10]

**Table II.** Chemical composition of BNi2 brazing alloy, % [10]

Lut BNi2					
Ni	Si	Cr	B	Fe	C
Reszta	4,5	7	3,1	3	0,06

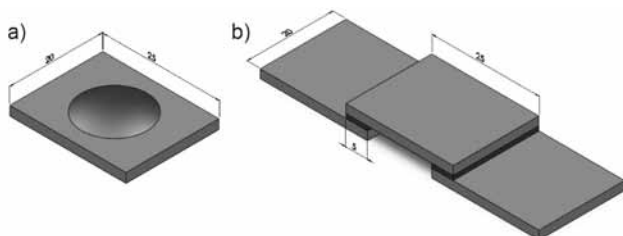
## Opis eksperymentu

Badania lutowności wykonano na dwóch typach próbek. Pierwszy typ (rys. 1a) posłużył do określenia rozpląwności i zwilżalności lutu. Na płytki o takich samych wymiarach wykonanych z różnych materiałów nałożono lut BNi2 w postaci pasty. W celu uzyskania jednakowej ilości spoiwa dla każdej próbki wszystkie płytki były ważone przed i po nałożeniu lutu. Drugi typ próbek wykorzystano do prób wytrzymałościowych. Próbki do badań składały się z trzech płytek lutowanych wg schematu pokazanego na rysunku 1b. Pomiędzy płytkami umieszczono lut w postaci taśmy o grubości 50  $\mu m$ .

**Tablica I.** Skład chemiczny wybranych stopów niklu, wag.% [9]

**Table I.** Chemical composition of selected nickel alloys, wt.% [9]

Pierwiastek	Inconel 600	Inconel 625	Inconel 718	Hastelloy X
Ni (+Co)	reszta (72,0 min.)	–	50,00÷55,00	–
Ni	–	reszta (58,0 min.)	–	reszta
Cr	14,0÷17,0	20,0÷23,0	17,00÷21,00	20,5÷23,0
Fe	6,00÷10,00	5,0 max.	reszta	17,0÷20,0
Nb (+Ta)	–	3,15÷4,15	4,75÷5,50	–
Mo	–	8,0÷10,0	2,80÷3,30	8,00÷10,00
Ti	–	0,40 max.	0,65÷1,15	–
Al.	–	0,40 max	0,20÷0,80	–
Co	–	1,0 max.	1,00 max.	0,50÷2,50
C	0,15 max.	0,10 max.	0,08 max.	0,05÷0,015
Mn	1,00 max	0,50 max.	0,35 max.	1,00 max.
Si	0,50 max.	0,50 max.	0,35 max.	1,00 max.
P	–	0,015 max.	0,015 max.	0,04 max.
S	0,015 max.	0,015 max.	0,015 max.	0,03 max.
B	–	–	0,006 max.	0,01 max.
Cu	0,50 max	–	0,30 max	–
W	–	–	–	0,20÷1,00



**Rys. 1.** Próbkę stosowane w badaniach: a) próbka I, b) próbka II  
**Fig. 1.** The samples used in tests: a) sample I, b) sample II

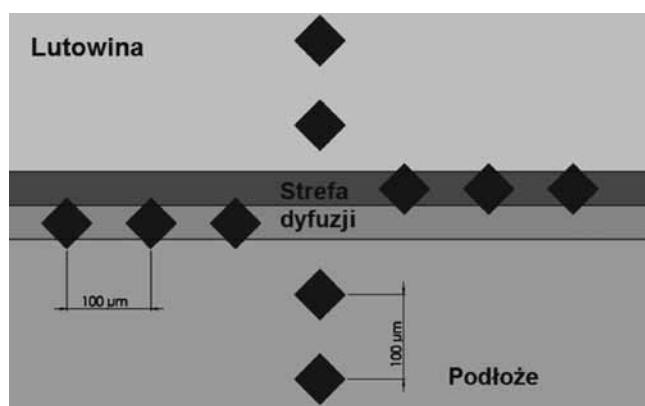
W ramach przygotowania do procesu dwa typy próbek zostały umyte acetonem w myjce ultradźwiękowej. Lutowanie nadstopów niklu wykonano w laboratoryjnym piecu próżniowym produkcji Instytutu Mechaniki Precyzyjnej. Parametry procesu lutowania były następujące:

- wysokość próżni –  $10^{-2}$  mbar,
- temperatura lutowania –  $1050^{\circ}\text{C}$ ,
- czas wytrzymania w temp. lutowania – 15 min,
- studzenie wraz z piecem.

Badania rozpląwności przeprowadzono na mikroskopie stereoskopowym Olympus SZX9. Za pomocą programu analySIS, wyznaczono pola wszystkich powierzchni nadstopów niklu zwilżonych lutem BNi2.

Obserwację mikrostruktury oraz pomiary kątów zwilżania prowadzono na zglądach próbek, które wykorzystano wcześniej w badaniach rozpląwności. Przygotowane zglądy obserwowano na mikroskopie metalograficznym Olympus IX 70 przy powiększeniach 50x, 100x, 200x, w zależności od pola powierzchni zwilżonej lutem. Możliwość rejestracji obrazów z zapisem cyfrowym pozwoliło na wykorzystanie programu analySIS do pomiarów kątów zwilżania.

Na zglądach próbek zostały wykonane również pomiary mikrotwardości metodą Vickersa na urządzeniu firmy Leitz przy obciążeniu 100 g. Twardość była mierzona w materiale rodzimym, stanowiącym podłoże, oraz w strefie przejściowej i lutowninie (rys. 2).

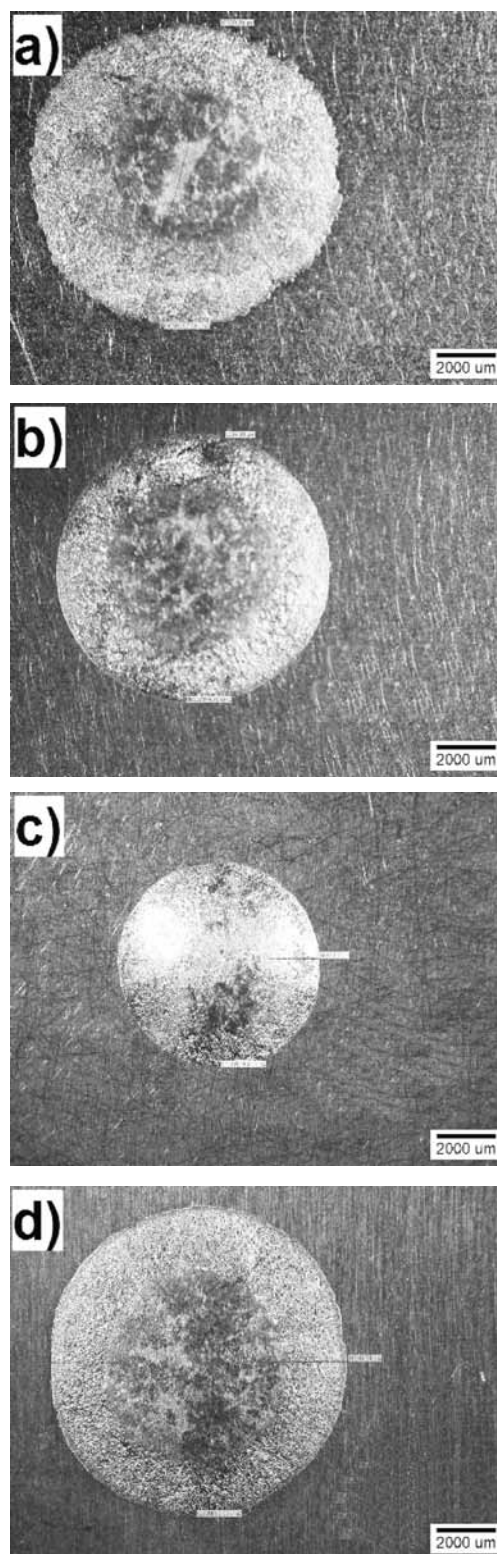


**Rys. 2.** Pomiar mikrotwardości  
**Fig. 2.** Microhardness measurement

Próbki drugiego typu (złącza zakładkowe) poddano statycznej próbie ścinania podczas rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Instron 1115 w celu wyznaczenia wytrzymałości połączeń. Próby przeprowadzono w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$ .

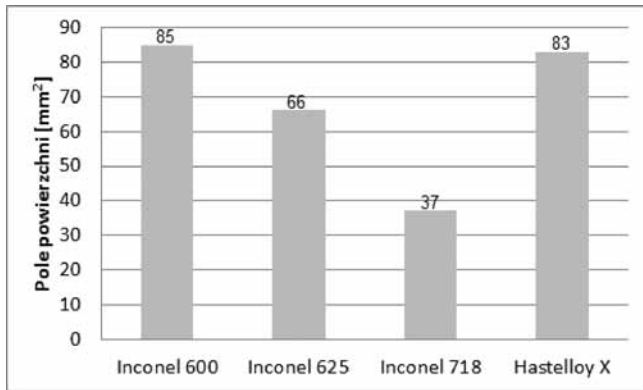
## Rozpląwność

Analizę rozpląwności lutu wykonano na podstawie zdjęć makroskopowych przy powiększeniu 8x (rys. 3). Wyniki pomiarów pól powierzchni zwilżonych lutem zamieszczono na rysunku 4.



**Rys. 3.** Rozpląwność wybranych nadstopów niklu: a) Inconel 600, b) Inconel 625, c) Inconel 718, d) Hastelloy X

**Fig. 3.** Spreading of selected nickel superalloys: a) Inconel 600, b) Inconel 625, c) Inconel 718, d) Hastelloy X



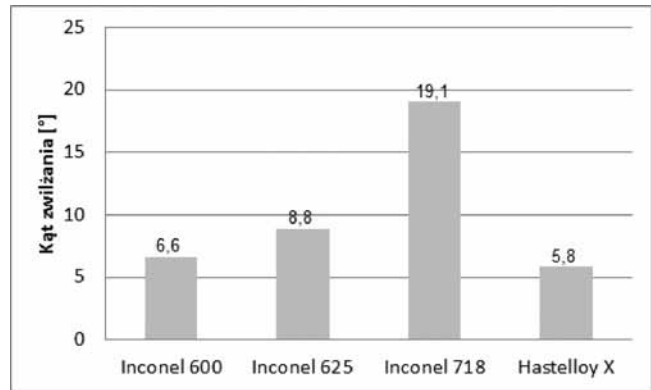
Rys. 4. Wyniki rozplywnosci  
Fig. 4. Spreading results

Największe pole powierzchni zwilżone lutem, a tym samym najlepszą rozplywnosc uzyskano dla materialow Inconel 600 oraz Hastelloy X. Dla nadstopu Inconel 625 pole pokryte lutem bylo mniejsze o ok. 20 mm<sup>2</sup>. Zdecydowanie najnizsza rozplywnosc otrzymano dla nadstopu Inconel 718. Pole powierzchni zwilżone lutem dla tego materialu bylo ponad dwa razy mniejsze niz w przypadku nadstopow Inconel 600 i Hastelloy X.

## Zwilzalnosc

Zwilzalnosc oceniono na zgladach wykonanych w plaszczynie prostopadlej do powierzchni podloza. Pomiarow katow zwilżania przeprowadzono na bazie zdjec mikroskopowych (rys. 5) przy powiekszeniu 100x, stosujac program analySIS. Wszystkie wyniki pomiarow katow zwilżania pokazano na rysunku 6.

Wyniki pomiarow pokazujac scislaz zaleznośc pomiedzy zwilżalnoscia, a rozplywnoscia lutu BNi2. Wraz ze wzrostem pola powierzchni pokrytej lutem maleje kat zwilżania. W przypadku pomiarow katow zwilżania najlepsze wyniki uzyskano dla nadstopow Inconel 600

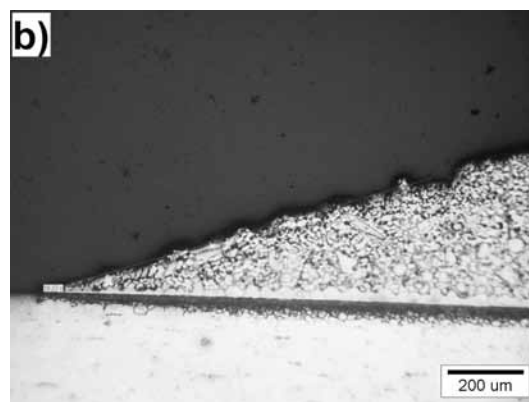
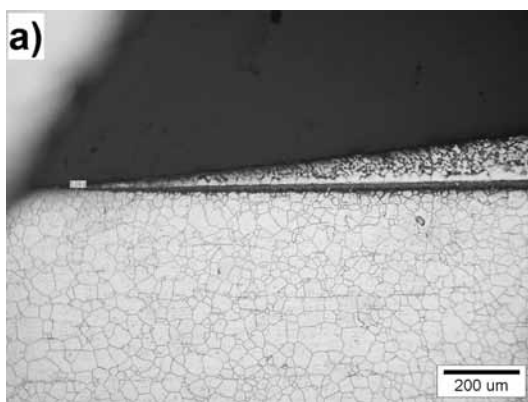


Rys. 6. Pomiarow katow zwilżania  
Fig. 6. Measurements of contact angles

i Hastelloy X. Dla tych materialow otrzymano najmniejsze wartosci katow – ok. 6°. Wiecej kat zwilżania ok. 9° uzyskano dla Inconelu 625. Najgorsza zwilżalnosc zarejestrowano dla nadstopu Inconel 718. W tym przypadku zmierzono najwieksza wartosc kata zwilżania – ok. 19°.

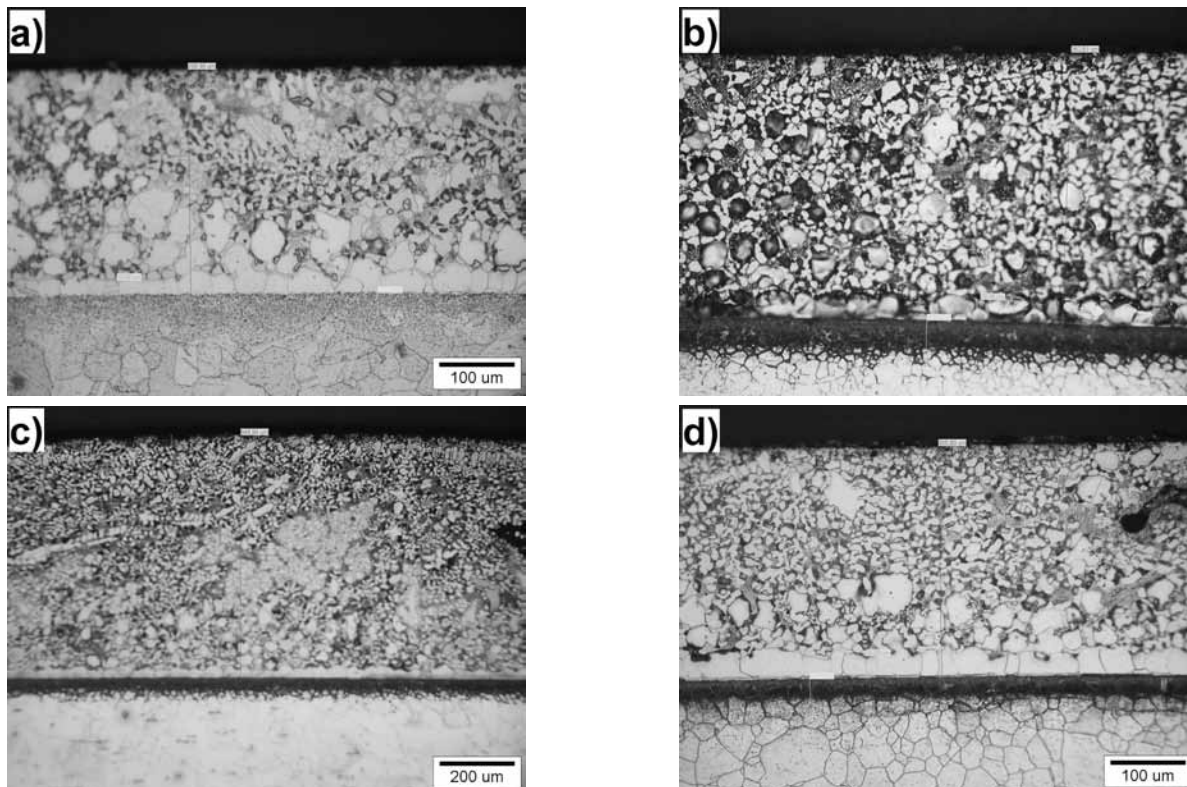
## Mikrostruktura

Mikrostruktury stref przejscia na granicy lutowina – nadstopow niklu pokazano na rysunku 7. Badania mikroskopowe wykazaly w miejscu polaczenia nadstopow niklu i lutu BNi2 obecnośc wyraźnej warstwy dyfuzyjnej. Stosunkowo mniejsze glębokości warstwy dyfuzyjnej zarejestrowano dla Inconelu 600 i Hastelloy X. Dla tych nadstopow uzyskano glębokośc warstw dyfuzyjnych w materiale lutowanym odpowiednio 27 i 25 μm. Glębsza warstwe zaobserwowano dla Inconelu 625 i Inconelu 718. Dla tych materialow otrzymano glębokośc warstw dyfuzyjnych w materiale podloza odpowiednio 39 i 40 μm. Dodatkowo w przypadku nadstopu Inconel 718 wystapila porowatosc w lutowinie.



Rys. 5. Pomiarow katow zwilżania: a) najmniejszy uzyskany kat – Hastelloy X, b) najwiekszy uzyskany kat – Inconel 718  
Fig. 5. Measurements of contact angles: a) the smallest resulting angle – Hastelloy X, b) the largest resulting angle – Inconel 718

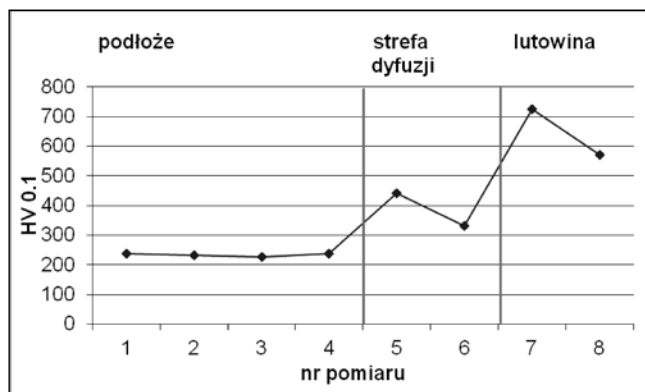




**Rys. 7.** Mikrostruktura złączy lutowanych: a) Inconel 600, b) Inconel 625, 200x, c) Inconel 718, d) Hastelloy X  
**Fig. 7.** The microstructure of brazed joints: a) Inconel 600, b) Inconel 625, 200x, c) Inconel 718, x100, d) Hastelloy X,

## Wyniki pomiarów mikrotwardości

Rozkład mikrotwardości materiału podłoża, strefy dyfuzyjnej i lutowiny dla nadstopu Hastelloy X zamieszczono na rysunku 8.



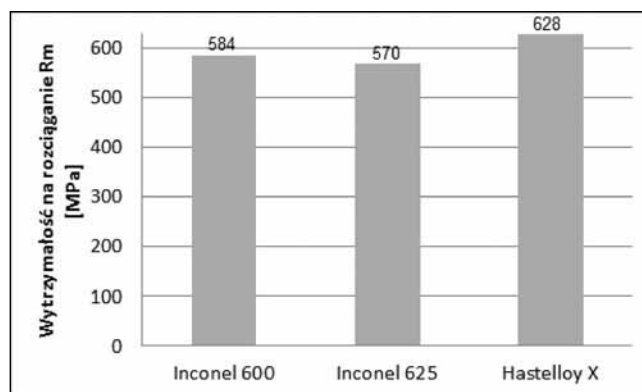
**Rys. 8.** Rozkład mikrotwardości, Hastelloy X  
**Fig. 8.** Microhardness distribution, Hastelloy X

W zależności od zastosowanego nadstopu uzyskano twardość materiału rodzimego w zakresie 119-322 HV<sub>0.1</sub>. Najtwardszym materiałem okazał się Inconel 718, zaś najniższą twardość uzyskano dla Inconelu 600. W przypadku pomiarów w strefie dyfuzyjnej dla Inconelu 718 uzyskano taką samą twardość jak w materiale rodzimym. Dla pozostałych nadstopów natomiast zanotowano wzrost twardości w stosunku do materiału podłoża. Twardość wzrosła od 33% dla Inconelu 625 do 65% dla nadstopu Hastelloy X. Jeszcze większy wzrost twardości

w stosunku do materiału rodzimego zarejestrowano dla pomiarów w lutowinie. Największy wzrost uzyskano dla Inconelu 600 – o 285%. Dla nadstopów Inconel 718 i Hastelloy X twardość wzrosła o odpowiednio 92% i 178%. Najmniejszy wzrost otrzymano dla Inconelu 625 – o 29%.

## Badania wytrzymałościowe

Statyczną próbę ścinania przeprowadzono dla trzech materiałów: Inconel 600, Inconel 625, Hastelloy X. Zrezygnowano z Inconelu 718 z powodu problemów ze zwilżaniem jego powierzchni lutem BNi2 oraz znaczącą porowatością w lutowinie. Wyniki z prób wytrzymałościowych przedstawiono na rysunku 9.



**Rys. 9.** Wytrzymałość na rozciąganie nadstopów niklu  
**Fig. 9.** Tensile strength of nickel superalloys

## Podsumowanie

Przy ośmiokrotnym powiększeniu wykonano pomiar pola powierzchni zwiłzonych lutem. Zastosowanie większych powiększeń (50x, 100x, 200x) umożliwiło spostrzeżenie zmian strukturalnych w strefie oddziaływania ciekłego lutu z nadstopami. Głębokość warstw dyfuzyjnych określono na 25÷40 µm.

W wynikach pomiarów mikrotwardości zauważono znaczący wzrost twardości w strefie przejścia i lutowninie w porównaniu do materiału podłoża badanych nadstopów niklu. Powodem takich różnic była obecność w lutowninie faz międzymetalicznych, które znacząco zwiększyły twardość tej strefy względem materiałów podłoży.

Badania wytrzymałościowe lutowanych nadstopów Hastelloy X i Inconel w temperaturze 20 °C wykazały, że przy prawidłowo wykonanych połączeniach ich wytrzymałość przewyższyła wytrzymałość materiałów rodzimych – zerwanie następowało w materiale, a nie w lutowninie.

Przeprowadzone badania lutu potwierdziły ścisłą zależność pomiędzy rozplywnością oraz zwiłzalnością. Te dwa zjawiska miały również największe znaczenie przy ocenie lutowności. Najlepsze wyniki pomiarów w badaniach rozplywności oraz zwiłzalności, a tym samym najlepszą lutowność uzyskano dla Inconelu 600 oraz Hastelloy X. Natomiast najmniejszą zwiłzalność i rozplywność, a zatem też najgorszą lutownością spośród badanych stopów charakteryzuje się Inconel 718.

## Literatura

- [1] Paulonis D.F., Schirra J.J.: Alloy 718 at Pratt&Whitney – historical perspective and future challenges; Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives, TMS, 2001.
- [2] Donachie M.J., Donachie S.J.: Superalloys: A Technical Guide, Second edition; ASM International, 2002.
- [3] Dul I.: Zastosowanie i przetwarzanie stopów niklu w przemyśle lotniczym; Przegląd Spawalnictwa nr 7-8/2009, s. 67÷73.
- [4] Dul I., Kopeć J., Poradka A., Turowska L., Babul T., Kowalski S., Jakubowski J., Senkara J.: Wpływ wybranych czynników technologicznych na proces lutowania próżniowego stopów Ni i stali wysokostopowej 18-8; Przegląd Spawalnictwa nr 10/2009, s. 77÷80.
- [5] Babul T., Kowalski S.: Lutowanie przewodów hydraulicznych pneumatycznych i paliwowych do silników lotniczych; Inżynieria Powierzchni, 2006, nr 3, s. 26÷31.
- [6] Babul T., Kowalski S., Senkara J., Jakubowski J., Gancarczyk T.: Zastosowanie lutów na bazie srebra i złota do lutowania wybranych części silników lotniczych; Inżynieria Powierzchni, 2007, nr 3, s. 44÷52.
- [7] Babul T., Jakubowski J., Kopeć J., Kowalski S., Senkara J., Turowska L.: Lutowanie próżniowe uszczelnień ulowych w aparatach kierujących wykonanych ze stopów Hastelloy i Inconel z zastosowaniem lutu NiCrSiB; Przegląd Spawalnictwa nr 9/2007, s. 124÷129.
- [8] Dul I., Senkara J., Bober M., Jakubowski J.: Wpływ wysokotemperaturowego wygrzewania próżniowego na lutowność Inconelu 718 lutem Palnico 36; Przegląd Spawalnictwa nr 9/2013, s. 15÷19.
- [9] High Temp Metals, Technical Data, [www.hightempmetals.com](http://www.hightempmetals.com)
- [10] Johnson Matthey Metal Joining, Product Datasheet, [www.jm-metaljoining.com](http://www.jm-metaljoining.com)

## PLANY SPAWANIA - TEORIA I PRAKTYKA – JACEK SŁANIA

### Cena

1 egzemplarz książki Jacka Słania:

**Plany spawania – teoria i praktyka** wynosi:  
80 zł (w tym 5% VAT)

**W celu zamówienia książki w Redakcji należy wypełnić formularz zamieszczony obok i przesłać go w formie faksu, skanu lub listu na adres:**

### REDAKCJA – Przegląd Spawalnictwa AW SIMP

ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa  
tel.: 22 827 25 42, faks: 22 336 14 79  
e-mail: [redakcja@pspaw.pl](mailto:redakcja@pspaw.pl)

### Wpłaty należy dokonać na rachunek bankowy:

Bank BPH S.A. Oddział w Warszawie  
**45 1060 0076 0000 3200 0043 1836**

Zamawiam książkę *Plany spawania – teoria i praktyka*  
w Redakcji Przegląd Spawalnictwa w liczbie .... egz.

Imię i nazwisko

Firma

Adres

NIP

Kontakt do osoby zamawiającej:

Oświadczam, że jestem podatnikiem VAT i upoważniam firmę do wystawienia faktury bez podpisu

Podpis