

# Badania zdolności kapilarnych lutu BNi2 metodą zmiennej szczeliny lutowniczej

## Study of capillary power of BNi2 braze by variable clearance method

### Streszczenie

Na podstawie badań zwilżalności i rozpląwności oraz próby klinowej określano właściwości kapilarne lutu niklowego BNi2 dla podłoży ze stopu Inconel 625 oraz stali nierdzewnej martenzytycznej 410 po różnym przygotowaniu powierzchni: polerowaniu ścierniwem, kulowaniu NicroBlasting® i obróbce strumieniowo-ścierniej. Lut miał postać litej folii i komercyjnej pasty lutowniczej. Stwierdzono, iż BNi2 ma korzystne właściwości kapilarne: dobrze zwilża i wypełnia szczeliny lutownicze o szerokości nawet powyżej 500 µm. Zastosowanie pasty lutowniczej w procesie próżniowym może powodować porowatość złączy i nadmierne wycieki lutu. Obróbka strumieniowo-ścierna nie jest zalecana przed lutowaniem, zwłaszcza dla stali 410.

**Słowa kluczowe:** lut BNi2; właściwości kapilarne; zmienna szczelina lutownicza

### Abstract

Capillary properties of BNi2 nickel braze were studied basing on the wettability and spreadability experiments along with the slope sample test for Inconel 625 and 410 stainless steel substrates with the surfaces prepared by abrasive polishing, NicroBlasting® shot-peening and abrasive blasting. The filler metal was employed in the form of the solid foil and of commercial brazing paste. It was found BNi2 features high capillary properties: good wetting and filling the gaps even of above 500 µm width. The application of brazing paste in a vacuum process can cause porosity of joints and excessive braze outflow. Abrasive blasting is not recommended prior to brazing, especially for 410 stainless steel.

**Keywords:** BNi2 braze; capillary properties; variable brazing clearance

### Wstęp

Poprzez właściwości kapilarne lutu rozumie się jego zdolność do wypełniania w stanie ciekłym szczelin, których szerokość jest na tyle mała, aby wytworzone zostało ciśnienie kapilarne  $\Delta P$ . Jest ono równe różnicy ciśnień po obu stronach zakrzywionej powierzchni cieczy. Generalnie uważa się, iż w danej temperaturze wpływanie ciekłego metalu do kapilary jest zależne z jednej strony od wielkości tego ciśnienia, stanowiącego siłę motoryczną procesu i będącego funkcją stopnia zwilżalności materiału ścianek i geometrii szczeliny oraz - z drugiej - siły oporu kinetycznego, związanego z lepkością i gęstością cieczy [1]. W praktyce technologicznej wielkość szczeliny lutowniczej dobiera się w zależności od składu stosowanego lutu, rodzaju materiału lutowanego (złącza jedno- i różnoimienne), konfiguracji złącza, techniki lutowania, stosowanego topnika lub atmosfery ochronnej, przygotowania powierzchni [2],

uwzględniając zarazem specyfikę procesu, jak np. blokowanie przepływu cieczy o składzie eutektycznym przez wydzielenia faz pierwotnie krystalizujących z ciekłego lutu [3,4].

W niniejszej pracy badano stopień wypełnienia lutem niklowym BNi2 szczeliny lutowniczej o zmiennej szerokości dla dwóch różnych materiałów, stopu Inconel 625 oraz stali 410, w zależności od postaci stosowanego lutu (folia, pasta) oraz metody przygotowania powierzchni.

### Stosowane materiały

Jako podłoża stosowano stop niklu Inconel 625 (AMS 5599) oraz stal martenzytyczną typu 410 (AMS 5504). Skład chemiczny obu materiałów podano w tablicy I i II.

**Tablica I.** Skład chemiczny stopu Inconel 625 (AMS 5599) [5]

**Table I.** Chemical composition of Inconel 625 alloy (AMS 5599) [5]

Materiał	Zawartość procentowa pierwiastków [% wag.]												
	Ni <sub>min</sub>	Cr	Fe <sub>max</sub>	Mo	Nb+Ta	C <sub>max</sub>	Mn <sub>max</sub>	Si <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	Al <sub>max</sub>	Ti <sub>max</sub>	Co <sub>max</sub>
Inconel 625	58	20÷23	5	8÷10	3,15÷4,15	0,1	0,5	0,5	0,015	0,015	0,4	0,4	1,0

Dr inż. Mariusz Bober; dr inż. Jerzy Jakubowski; prof. dr hab. inż. Jacek Senkara – Zakład Inżynierii Spajania, Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: mbober@wip.pw.edu.pl

Tablica II. Skład chemiczny stali 410 (AMS 5504) [6]  
Table II. Chemical composition of 410 steel (AMS 5504) [6]

Materiał	Zawartość procentowa pierwiastków [% wag.]						
	C max	Si max	Mn max	P max	S max	Cr	Fe
Stal 410	0,15	1,0	1,0	0,040	0,030	11,5-13,5	reszta

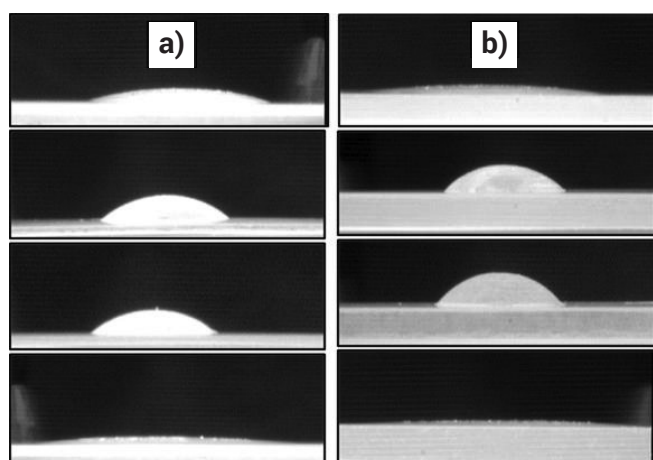
Tablica III. Skład chemiczny lutu BNi2 (AMS 4777) [7]  
Table III. Chemical composition of BNi2 braze (AMS 4777) [7]

	Zawartość procentowa pierwiastków [% wag.]						Temperatura [°C]	
	Cr	Fe	Si	C	B	Ni	solidus	likwidus
Inconel 625	7,0	3,0	4,5	0,06	3,1	reszta	971	999

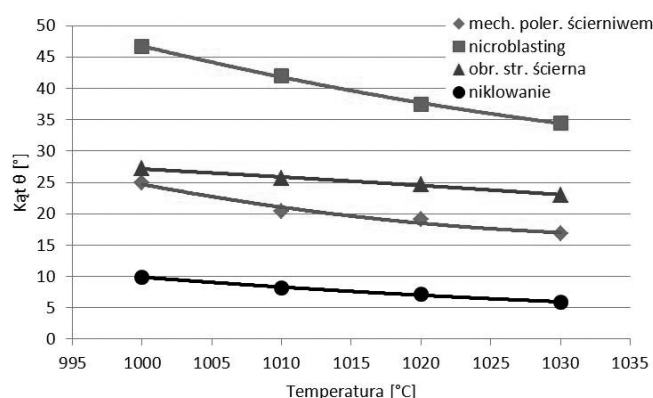
Materiał dodatkowy stanowił lut na bazie niklu o symbolu BNi2 (AMS 4777). Skład chemiczny oraz zakres temperatury solidus-likwidus przedstawiono w tablicy III. Lut stosowano w postaci pasty lutowniczej oraz folii o grubości 0,508 mm (0,02") i szerokości 25,4 mm (1,0"). W przypadku folii mamy do czynienia z „czystym” materiałem dodatkowym o danym składzie, natomiast pasta składa się jeszcze z nośnika, aktywatora i ewentualnie innych dodatków (producenci nie ujawniają składów past i proporcji składników).

## Oddziaływanie lutu z powierzchnią płaską

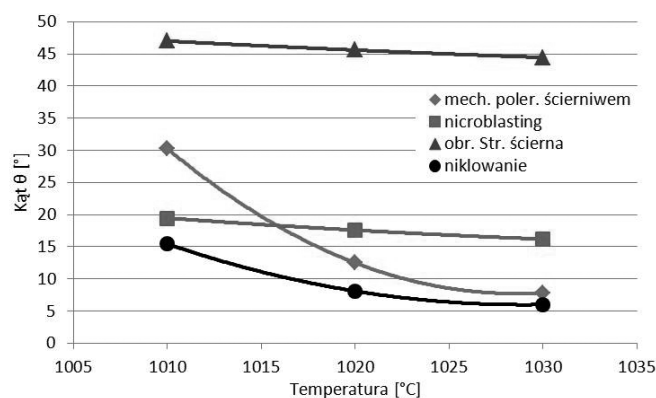
Badania w tym zakresie polegały na wykonaniu prób zwilżania i rozpląwności lutu na powierzchniach płaskich próbek z obu badanych materiałów. Testowano podłoża o wymiarach 20x20x1 mm po różnych, typowo stosowanych w przemyśle wariantach przygotowania powierzchni: polerowaniu ścierniwem No 120, obróbce strumieniowo-ścierniej (piaskowaniu ziarnami 120 μm), kulowaniu śrutem niklowym (technologia MicroBlasting®) i niklowaniu galwanicznym. Lut w postaci taśmy cięto na odcinki o równej długości i masie 0,11 g, które zwijano w kształt pobocznic walca dla zapewnienia jednakowej wyjściowej formy geometrycznej. Testy zwilżania i rozpląwności prowadzono w próżni 10<sup>-4</sup> hPa w specjalnym urządzeniu do badań zjawisk powierzchniowych [8].



Rys. 1. Kształt kropli ciekłego lutu BNi2 na podłożu ze stopu Inconel 625 (a) i stali 410 (b) w temperaturze 1030 °C. W kolejności od góry powierzchnie po: polerowaniu ścierniwem, kulowaniu MicroBlasting®, obróbce strumieniowo-ścierniej, niklowaniu galwanicznym  
Fig. 1. Shapes of the liquid BNi2 braze droplets over the substrate of Inconel 625 alloy (a) and 410 stainless steel (b) at a temperature of 1030 °C. Surfaces from the top are: after abrasive polishing, after MicroBlasting® shot peening, abrasive blasting, and nickel plating



Rys. 2. Zależność kąta zwilżania od temperatury dla układu lut BNi2 – Inconel 625 po wariantowym przygotowaniu powierzchni  
Fig. 2. Relationship between the contact angle and temperature for BNi2 braze - Inconel 625, after the different surface preparation

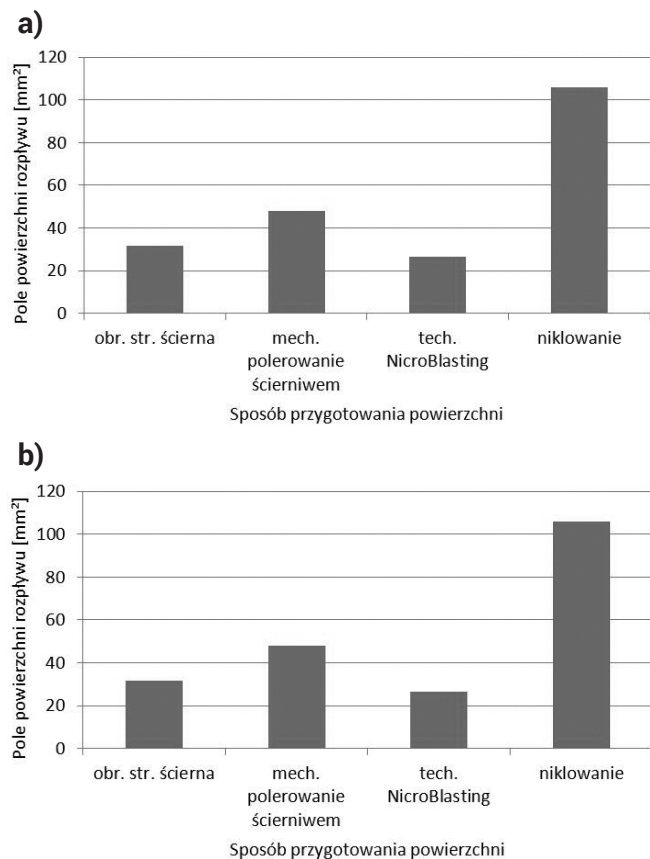


Rys. 3. Zależność kąta zwilżania od temperatury dla układu lut BNi2 – stal 410 po wariantowym przygotowaniu powierzchni  
Fig. 3. Relationship between the contact angle and temperature for BNi2 braze - 410 steel, after the different surface preparation

Próbki podłoża z nałożonym lutem nagrzewano z szybkością 200 °C/min do temperatury 960 °C, a następnie 20 °C/min aż do osiągnięcia temperatury 1050 °C, zakładając iż mała szybkość nagrzewania po pojawieniu się stanu ciekłego umożliwia ciągłe osiągnięcie przez kroplę kształtu równowagowego w miarę wzrostu temperatury. Co 30 sekund rejestrowano kontur kropli za pomocą kamery CCD. Badania powtarzano trzykrotnie dla każdego układu podłoża-lut. Przykładowy kształt kropli ciekłego lutu pokazano na rysunku 1. Za pomocą programu komputerowego mierzono kąty zwilżania z obu stron kropli i uśredniano. Wyniki testów zwilżania dla stopu Inconel 625 oraz stali 410 przedstawiono odpowiednio na rysunku 2 i 3.

Najlepszą zwilżalność wykazują, zgodnie z oczekiwaniami, podłoża niklowane, a następnie po polerowaniu mechanicznym. Większe kąty zwilżania występują dla powierzchni po obróbce MicroBlasting® oraz strumieniowo-ścierniej.

Rozpływność określana była po krystalizacji lutu i wyjęciu próbek z pieca, na stanowisku wyposażonym w mikroskop stereoskopowy z cyfrowym zapisem obrazu. Pole powierzchni rozplwy mierzone przy pomocy odpowiedniego programu komputerowego. Wyniki w postaci średniej arytmetycznej z pomiaru trzech próbek przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Pole powierzchni rozplwy lutu BNI2 na podłożu ze stopu Inconel 625 (a) oraz na stali 410 (b) po wariantowym przygotowaniu powierzchni

Fig. 4. The surface area of BNI2 braze spread over Inconel 625 substrate (a) and over 410 steel (b) after the different surface preparation

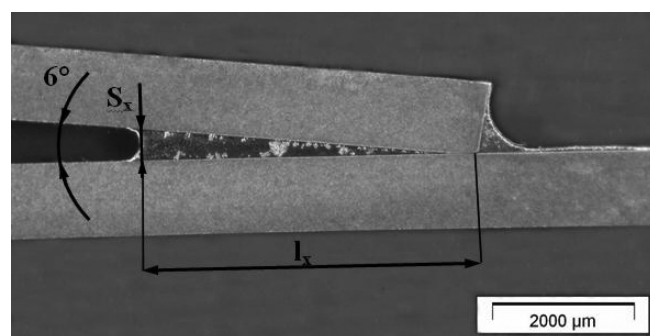
Wyniki badań rozplwy odpowiadają poszczególnym przejawom zwilżalności. Najmniejsze pola rozplwy lutu występują na powierzchniach po obróbce strumieniowo-ścierniej i obróbce MicroBlasting®, największe - po niklowaniu galwanicznym.

## Wpływanie lutu do szczelin kapilarnych

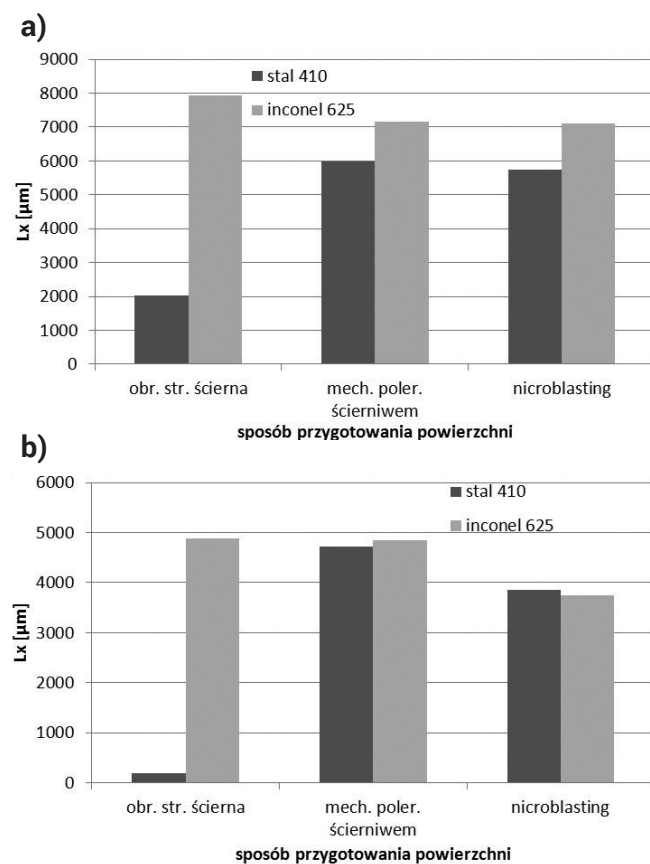
Badania prowadzono dla szczelin o zmiennej szerokości (tzw. próba klinowa) według znanej metodyki, stosowanej uprzednio np. do badań lutowności materiałów trudno-topliwych [9], a także dla lutów niklowych [10], po niewielkiej jej modyfikacji. Pomiedzy końcami dwu jednakowych płytek sytuowano specjalny element dystansowy, którego wysokość i odległość od przeciwległego końca styku płytek była dobierana w taki sposób, aby uzyskać szczelinę o kącie rozwarcia 6°. W celu zachowania geometrii i stabilności całego układu końce płytek łączono w miejscu ich styku dwiema mikrozgrzeinami punktowymi.

Podobnie jak poprzednio, stosowano płytki ze stopu Inconel 625 i stali 410 po polerowaniu ścierniwem o ziarnistości 120, obróbce strumieniowo-ścierniej i obróbce MicroBlasting®, o wymiarach 76,2x25,4x0,61 mm (3"x1"x0,024"). Lut w postaci taśmy o stałej masie układano na płycie dolnej, a pasta lutownicza aplikowana była za pomocą dozownika w obszar przed klinem. Próbkę nagrzewano w przemysłowym piecu próżniowym do temperatury 1065 °C w próżni 3x10<sup>-3</sup> hPa, wytrzymało 15 min i chłodzono, początkowo z piecem, a później forsownie w atmosferze argonu do temperatury pokojowej.

Próbki cięto w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni płytek w części środkowej klina i wykonywano zglady metalograficzne. Z pomocą programu komputerowego wyznaczano charakterystyczne parametry: głębokość penetracji  $l_x$  oraz szerokość szczeliny  $S_x$  w miejscu menisku (rys. 5). Uśrednione wyniki pomiarów pokazano na rysunkach 6÷10.

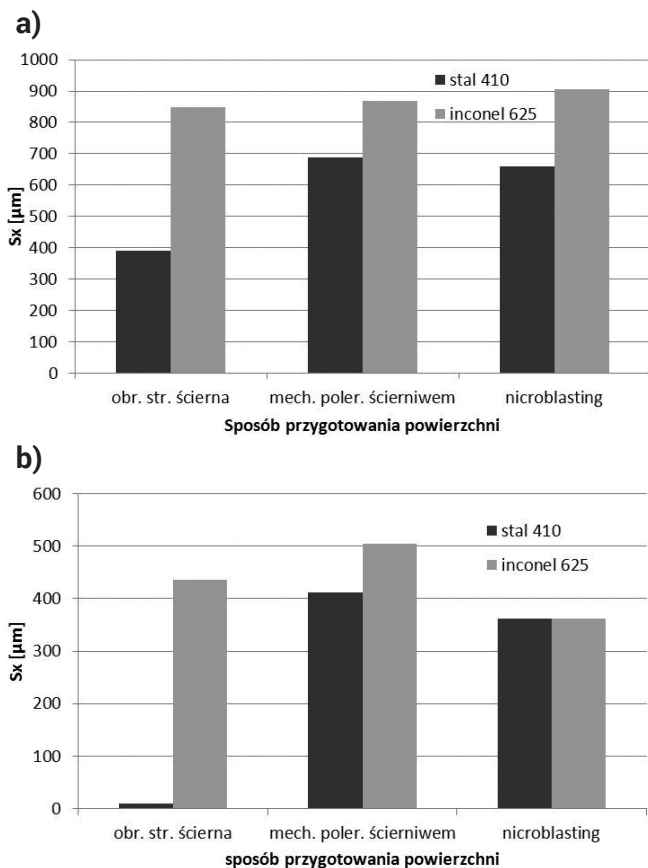


Rys. 5. Zgląd próbki Inconel 625 - lut BNI2 po próbie klinowej z zaznaczonymi wielkościami  $l_x$  i  $S_x$  (stan wyjściowy lutu - pasta)  
Fig. 5. Metallographic cross-section of Inconel 625 - BNI2 braze specimen after the slope sample test,  $l_x$  and  $S_x$  sizes are marked. The initial state of the braze was paste



Rys. 6. Zasięg penetracji lutu BNI2 w próbie klinowej; stan wyjściowy lutu: folia (a), pasta (b)

Fig. 6. The range of BNI2 braze penetration after the slope sample test: (a) the initial state of the braze was foil; (b) paste



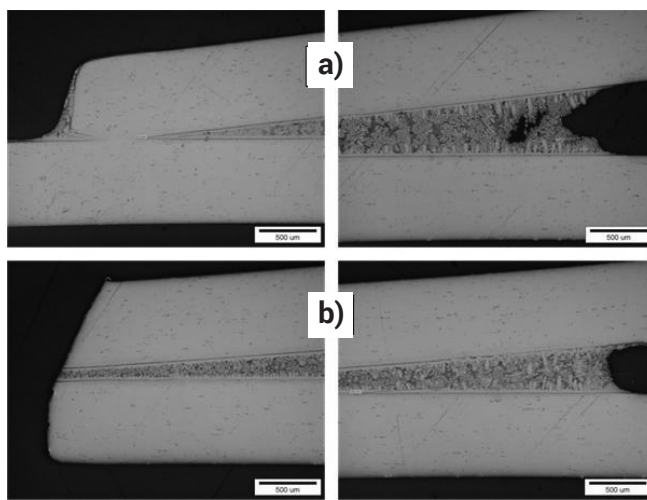
Rys. 7. Maksymalna szerokość szczeliny wypełnionej lutem BNi2; stan wyjściowy lutu: folia (a), pasta (b)

Fig. 7. The maximum gap width (Sx) filled with BNi2 braze: (a) the initial state of the braze - foil; (b) paste

Badania struktury próbek wskazują na dobre wypełnienie szczelin we wszystkich wariantach, dla obu spajanych materiałów, przy czym dla lutu w formie pasty lutowniczej występuje z reguły w spoinie lokalna porowatość. Jest to niewątpliwie efekt pozostałości gazowych produktów rozkładu nośnika pasty, trudnych do usunięcia z kapilar, nawet przy prowadzeniu procesu w próżni. Można było zaobserwować również wyraźne efekty oddziaływania lut – podłoże w po-

staci strefy przejściowej na granicy międzyfazowej. Na rysunku 8 przedstawiono dla ilustracji typową mikrostrukturę lutowin dla stopu Inconel 625.

Wyniki badań wskazują na łatwe spełnienie wymagań dotyczących wielkości szczeliny dla lutów na osnowie Ni (do 130 µm [1]), ale przy doborze jej optymalnej szerokości należy brać pod uwagę wytrzymałość złącza (rekomendacja AWS do 20 µm [2]). Generalnie wartości wskaźników lx i Sx wypełnienia szczeliny są nieco lepsze dla Inconelu 625 niż stali 410 we wszystkich wariantach (z wyjątkiem obróbki strumieniowo-ściernej, podczas której powstają na powierzchni stali trudne do usunięcia tlenki) i wyraźnie większe dla lutu w postaci litej niż w formie pasty (rys. 6-7). Jest to jednak mylące, gdyż w przypadku pasty lutowniczej obecność aktywatora w nośniku zapewnia tak doskonałą zwilżalność, iż lut penetruje poprzez styk obu płytek formując menisk po drugiej stronie i rozplywa się po płaskiej powierzchni (rys. 5 oraz 8a), powodując deficyt objętości cieczy dla dalszego wypełnienia szczeliny o zwiększonej szerokości. Jest to z jednej strony korzystne (dobre wypełnienie małych szczelin), z drugiej - kłopotliwe w praktyce przemysłowej (nadmierne wycieki lutu ze złącza).



Rys. 8. Mikrostruktura połączenia stopu Inconel 625 lutem BNi2 w postaci pasty (a) oraz litej folii (b)

Fig. 8. The microstructure of Inconel 625 joint performed by BNi2 braze in the initial form of the paste (a) and the solid foil (b)

## Wnioski

- Analizując przytoczone wyniki można ogólnie stwierdzić, iż lut BNi2 ma bardzo dobre właściwości kapilarne, o czym świadczy zdolność wypełniania szczelin lutowniczych o dużej szerokości, nawet powyżej 500 µm, dla stopu Inconel 625 i stali 410.
- Zastosowanie lutu BNi2 w postaci pasty dla przypadku lutowania próżniowego powinno być kontrolowane z uwagi na możliwość powstawania porowatości w złączach oraz nadmierne wyciekanie lutu wymuszające konieczność stosowania środków zapobiegających (np. pasta stop-off).
- Przygotowanie powierzchni poprzez zastosowanie obróbki strumieniowo-ściernej nie jest zalecane, zwłaszcza w przypadku stali stopowej 410.

*Badania były finansowane z grantu NCBiR nr PBS 177902, nr umowy PBS1/B5/11/2012.*

## Literatura

- [1] Eustathopoulos N., Nicholas M.G., Drevet B.: „Wettability at High Temperatures”, Pergamon Material Series, Pergamon 1999
- [2] AWS Brazing Handbook, 5th Edition, AWS 2007
- [3] 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, 44-52, 2007
- [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 81 (10), 77-80, 2009
- [5] „Nickel Alloy, Corrosion and Heat-Resistant, Sheet, Strip, and Plate, 62Ni - 21.5Cr - 9.0Mo - 3.7 Cb (Nb), Solution Heat Treated”. AMS Standard No 5599.
- [6] High Temp. Metals. Technical Data. <http://www.hightempmetals.com>
- [7] „Steel, Corrosion and Heat-Resistant, Sheet, Strip, and Plate, 12.5Cr (SAE 51410), Annealed”. AMS Standard No 5504. <http://www.aircraftmaterials.com>
- [8] „Nickel Alloy, Brazing Filler Metal 82Ni 4.5Si 7.0Cr 3.1B 3.0Fe, 1780 to 1830°F (971 to 999°C) Solidus-Liquidus Range”. AMS Standard No 4777. <http://princeizant.com/product/ams-4777>
- [9] Bober M.: „Oddziaływania międzyfazowe w technologii napawania plazmowego warstw na osnowie Ni z węglkami metali przejściowych”. Rozprawa doktorska WIP PW, Warszawa, 2009
- [10] Mirski Z.: „Sterowanie szerokością szczeliny lutowniczej w procesach spajania materiałów różnorodnych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [11] Miyazawa Y., Saito K., Fukikoshi T., Ariga T.: „Brazing of ferritic stainless steel and microstructure of the brazed joints”. Proc. of 5th IBSC Conference, Las Vegas 2012, pp. 236-239