

W nowoczesnych gałęziach przemysłu (lotnictwo i kosmonautyka, motoryzacja, energetyka, elektronika) występuje zapotrzebowanie na nowe materiały inżynierskie o niskiej gęstości, wysokiej twardości i wytrzymałości, żarowytrzymałości i odporności na korozję, również gazowej w środowiskach agresywnych. Warunki takie spełniają, ciesząc się coraz większym zainteresowaniem od lat 90. ubiegłego wieku, stopy na podstawie uporządkowanych faz międzymetalicznych typu  $Ti_3Al$  ( $\alpha_2$ ) i  $TiAl$  ( $\gamma$ ) oraz  $NiAl$  ( $\beta$ ) i  $Ni_3Al$  ( $\gamma'$ ). Stopy powyższe tworzą nową generację tworzyw metalicznych (tzw. intermetaliki, intermetale), łączących cechy metali i ceramiki. Spośród faz Ti-Al najbardziej popularna jest faza  $\gamma$  (TiAl). Charakteryzuje się wysoką temperaturą topnienia (1460 °C), stosunkowo małą gęstością (3,8 kg/dm<sup>3</sup>), dużą wytrzymałością względną, dobrą odpornością na pełzanie i utlenianie oraz brakiem skłonności do samozapłonu. Wykazuje ona również dużą twardość lecz stosunkowo niską plastyczność (wydłużenie względne 1 ÷ 3 %). Reprezentująca układ Ni-Al faza  $Ni_3Al$  ( $\gamma'$ ) jest roztworem stałym wtórnym (faza niekongruentna), tworzącym się w wyniku przemiany perytektycznej (w temperaturze 1390 °C). Gęstość jej wynosi 7,4 kg/dm<sup>3</sup>, moduł Younga 200 GPa, wydłużenie względne w temperaturze pokojowej od kilku do 50 %, a temperatura maksymalna stosowania stopów na jej podstawie sięga 800÷1150 °C. Charakterystyczną cechą tej fazy jest wysoka wytrzymałość na pełzanie, wzrastająca wraz z temperaturą. Stopy na jej podstawie charakteryzują się także wysoką granicą plastyczności na ściskanie i odpornością na korozję gazową (odpornością na utlenianie i nawęglanie w atmosferach utleniających-redukujących), a także bardzo dobrą odpornością na ścieranie w temperaturach podwyższonych.

Przykłady zastosowań stopów na podstawie powyższych faz to: wirniki turbosprężarek, zawory i gniazda zaworów, denka tłoków oraz elementy układów wydechowych w silnikach samochodowych, podzespoły silników lotniczych i raketowych, łopaty turbin gazowych w energetyce i lotnictwie, części maszyn hutniczych i urządzeń w przemyśle petrochemicznym, części pomp i turbin wodnych, elementy aparatury chemicznej odporne na działanie związków siarki. Stanowią one również podstawę materiałów kompozytowych o podobnym zastosowaniu.

Łączenie metodami spawalniczymi takich materiałów jest dość trudne, a często ze względów metalurgicznych i konstrukcyjnych odbywać się może jedynie przez zastosowanie spawania elektronowego, zgrzewania dyfuzyjnego, lub lutowania twardego w tym również dyfuzyjnego. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań nad lutowaniem twardym stopów odlewniczych na podstawie powyższych faz międzymetalicznych.

### Warunki materiałowo technologiczne badań

Jako materiał podstawowy do badań użyto stopy na podstawie faz międzymetalicznych o następujących składach chemicznych:

- stop na podstawie fazy TiAl ( $\gamma$ ): Al 48 %, Cr 2%, Nb 2 %, reszta Ti,
- stop na podstawie fazy  $Ni_3Al$  ( $\gamma'$ ): Ni 87 %, Al 13 %.

Do lutowania zastosowano spoiwa w gatunkach:

- B-Ag72Cu-780 (lut Ag72Cu28 o składzie zbliżonym do eutektycznego, temperatura topnienia 780 °C),
- B-Cu100-1085 (czysta miedź, temperatura topnienia 1083 °C).

Do badań wytrzymałości na ścinanie oraz badań strukturalnych połączeń lutowanych – ze stopów na podstawie ww. faz międzymetalicznych zastosowano lutowane doczołowo złącza próbne, wykonane z elementów walcowych o wymiarach  $\phi$  13 x 15 mm, z ułożonymi pomiędzy nimi kształtkami spoiwa.

Wszystkie próbki lutowano w piecu próżniowym S 16 firmy TORVAC w próżni w zakresie  $10^{-3} + 10^{-5}$  mbar (rys.1). Dobór temperatury i czasu lutowania był zależny od rodzaju stosowanego lutu i został ustalony w wyniku dostępnych informacji literaturowych oraz po analizie właściwości łączonych stopów i odpowiednich układów równowagi fazowej ich składników i składników spoiw (Ni, Ti, Al, Ag, Cu).

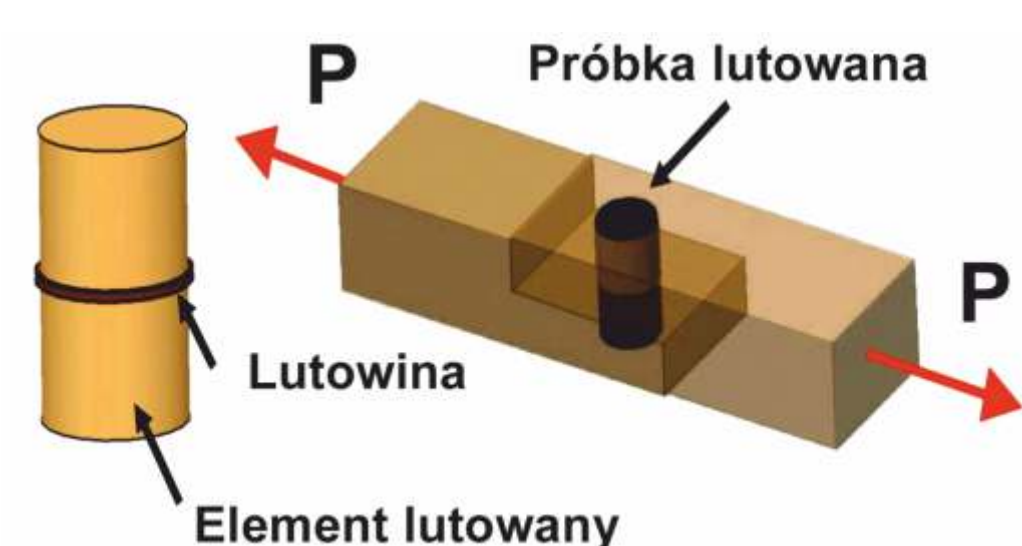
Próbki ze stopu Ni87Al13 lutowano w podanych poniżej temperaturach lutowania i czasach wytrzymałości:

- w przypadku spoiwa miedzianego B-Cu100-1085 (czysta miedź, temperatura topnienia 1083°C) - temperatura 1150°C, czas wytrzymałości 60 ÷ 180 min,
- w przypadku spoiwa srebrnego B-Ag72Cu-780 (lut Ag72Cu28 o składzie zbliżonym do eutektycznego, temperatura topnienia 780°C) – temperatura 1000 ÷ 1150°C, czas wytrzymałości 30 ÷ 180 min.

Próbki ze stopu TiAl48Cr2Nb2 wykonano:

- w przypadku spoiwa miedzianego B-Cu100-1085 w temperaturach lutowania 1000 i 1050°C, czas wytrzymałości 1 ÷ 5 min.,
- w przypadku spoiwa srebrnego B-Ag72Cu-780 w temperaturach 850 ÷ 950 °C, czas wytrzymałości 1 ÷ 5 min.

### Wytrzymałość na ścinanie lutowanych złączy próbnych



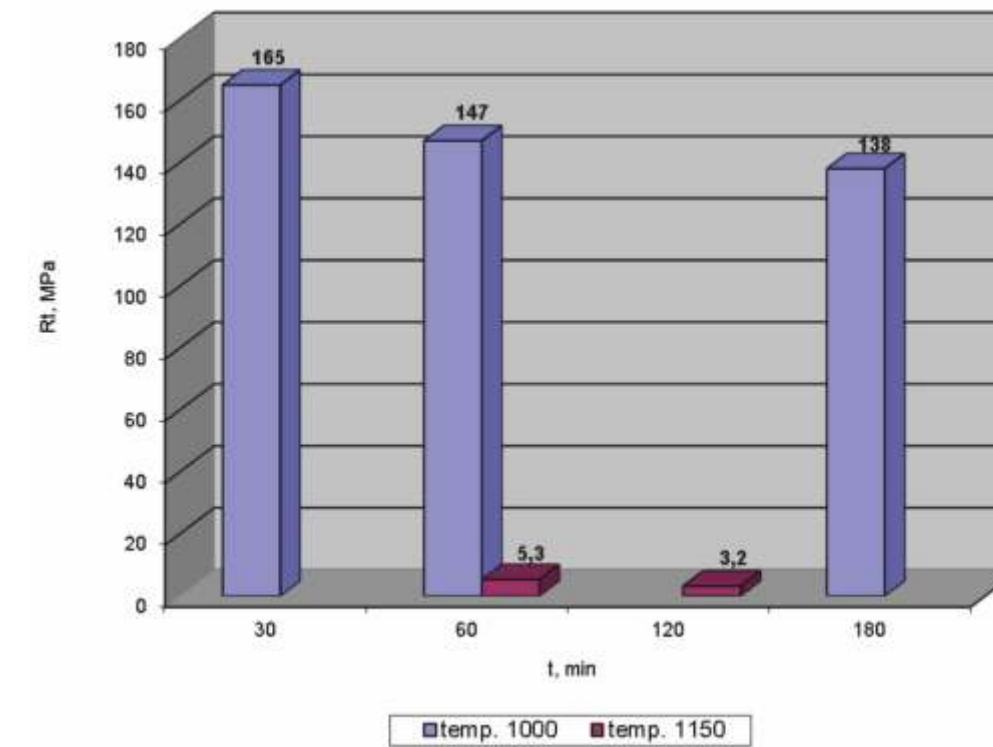
Rys. 2. Próbkę i oprzyrządowanie pomocnicze do statycznej próby ścinania

Właściwości wytrzymałościowe polutowanych próbek o postaci walcowej ze stopu Ni87Al13 i TiAl48Cr2Nb2 badano na maszynie wytrzymałościowej firmy Instron model 4210 poprzez ich ścinanie w specjalnych uchwytach zaprojektowanych tak, aby próbki poddawane były jedynie siłom ścinającym, bez zginania (rys. 2).

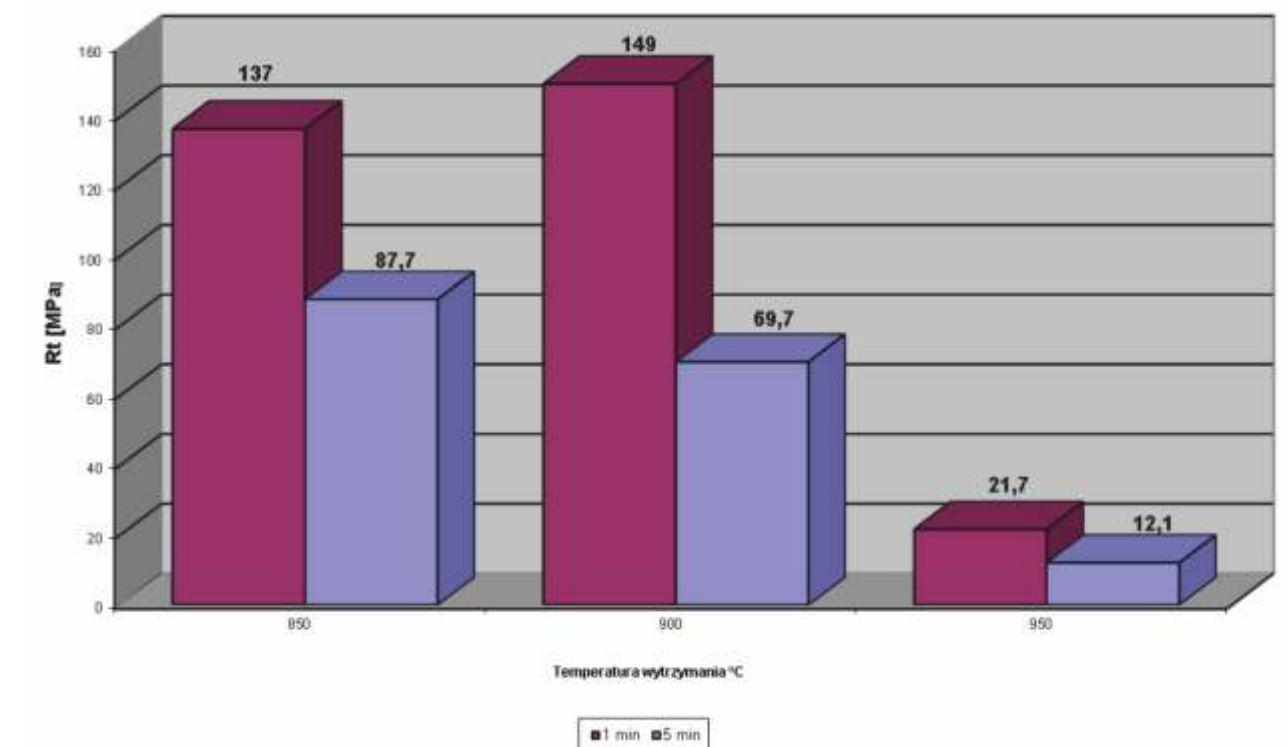
## Lutowanie twarde stopów na podstawie faz międzymetalicznych typu Ti-Al i Ni-Al

Autorzy:  
dr inż. Andrzej Winiowski, dr inż. Maciej Różański

### Wyniki badań wytrzymałości:



Rys. 3. Wytrzymałość na ścinanie połączeń stopu Ni87Al13 wykonanych przy użyciu spoiwa B-Ag72Cu-780 w różnych temperaturach i czasach



Rys. 4. Wytrzymałość na ścinanie połączeń stopu TiAl48Cr2Nb2 wykonanych przy użyciu spoiwa B-Ag72Cu-780 w różnych temperaturach i czasach

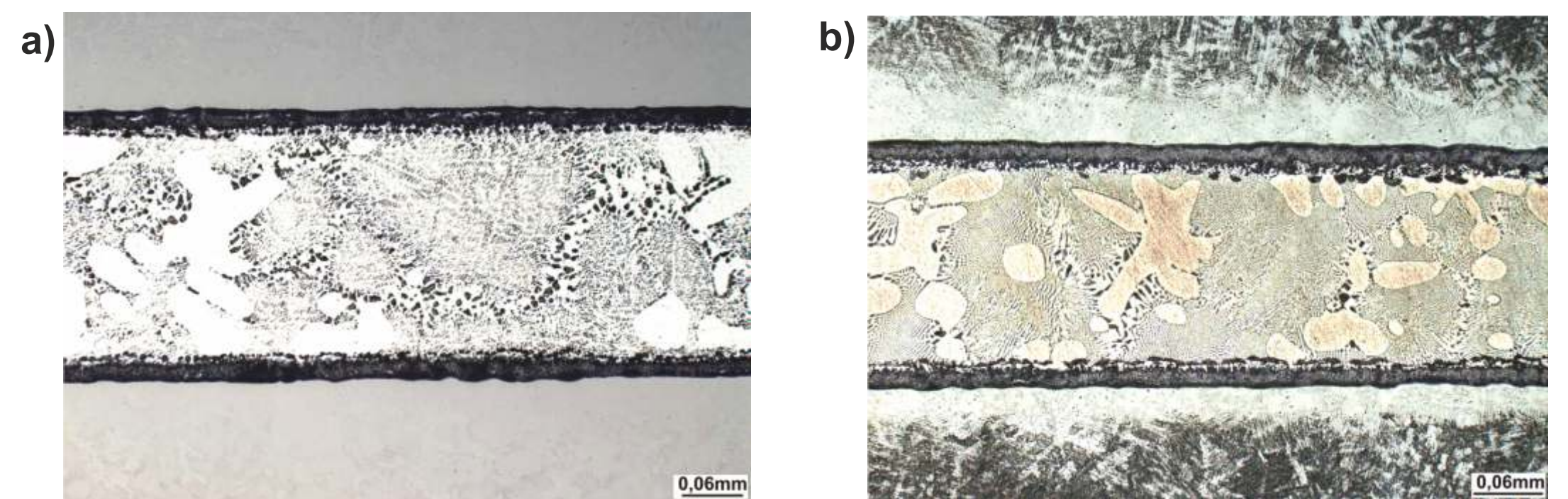
### Struktury lutowanych złączy próbnych



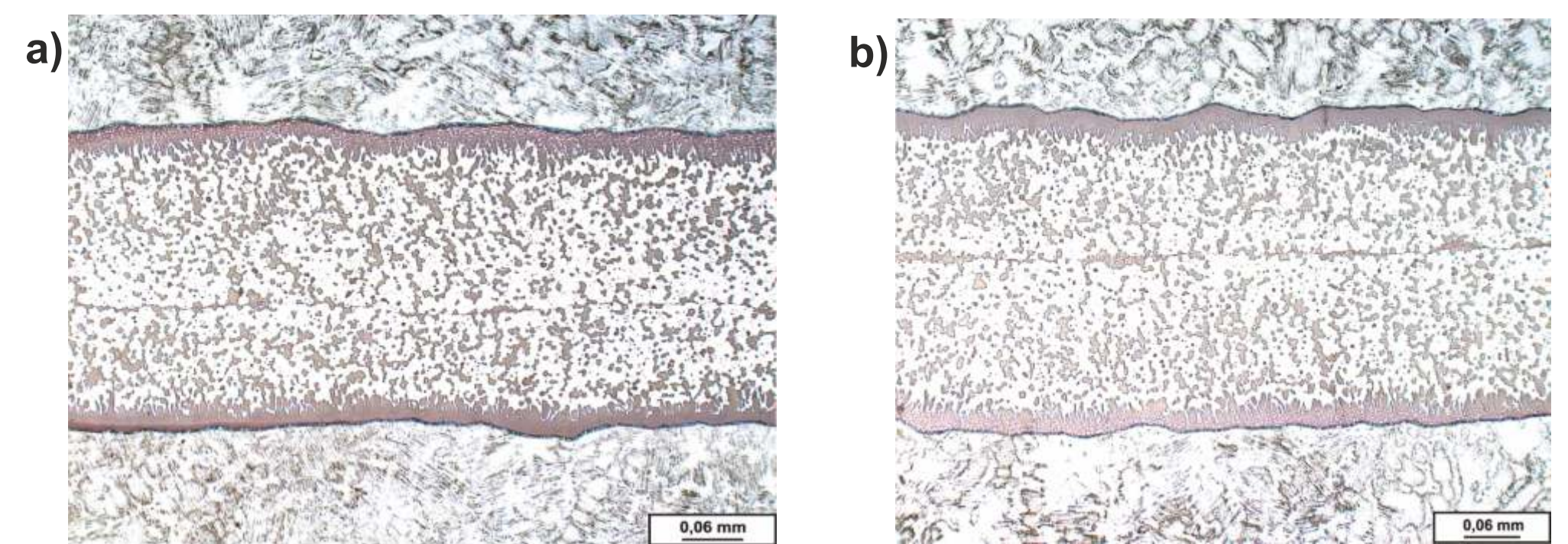
Rys. 5. Struktura połączenia lutowanego stopu Ni87Al13 wykonanego lutem B-Ag72Cu-780 w temperaturze lutowania 1000 °C i czasie 30 min. Traw. 10 ml HNO<sub>3</sub> + 20 ml HCl + 30 ml glicerol

Rys. 6. Struktura połączenia lutowanego stopu Ni87Al13 wykonanego lutem B-Ag72Cu-780 w temperaturze lutowania 1000 °C i czasie 180 min. Traw. 10 ml HNO<sub>3</sub> + 20 ml HCl + 30 ml glicerol

Rys. 7. Struktura połączenia lutowanego stopu Ni87Al13 wykonanego lutem miedzianym (Cu) w temperaturze lutowania 1150 °C i czasie 180 min. Traw. 10 ml HNO<sub>3</sub> + 20 ml HCl + 30 ml glicerol



Rys. 8. Mikrostruktura połączeń stopu TiAl48Cr2Nb2 lutowanych dyfuzyjnie z przekładką ze spoiwa B-Ag72Cu-780 lutowanych w temperaturze 850 °C i czasach wytrzymałości 1 (a) i 5 (b) min.



Rys. 9. Mikrostruktura połączeń stopu TiAl48Cr2Nb2 lutowanych dyfuzyjnie z przekładką ze spoiwa miedzianego w temperaturze 1150 °C i czasach wytrzymałości 1 (a) i 5 (b) min.

### Wnioski

- Dobrą jakość i najwyższą wytrzymałość na ścinanie (165 MPa) połączeń Ni87Al13 zapewnia lutowanie próżniowe spoiwem srebrnym w gat. B-Ag72Cu-780 w temperaturze 1000°C i czasie wytrzymałości 30 min.,
- Niższą wytrzymałość na ścinanie (110 MPa) uzyskano dla połączeń lutowanych spoiwem miedzianym B-Cu100-1085 w temperaturze 1150°C i czasie wytrzymałości 180 min.,
- Podwyższenie temperatury lutowania i wydłużenie czasu wytrzymałości podczas lutowania badanych połączeń spoiwem srebrnym i miedzianym powodowało obniżenie wytrzymałości i ich jakości, związane z powstawaniem znacznej ilości kruchych faz międzymetalicznych i niezgodności lutowniczych,
- Dla połączeń lutowanych stopu TiAl48Cr2Nb2 największą wytrzymałość na ścinanie (149 MPa) i dobrą jakość uzyskano w przypadku stosowania spoiwa B-Ag72Cu-780, temperatury procesu 900 °C i czasu lutowania 1 min.,
- Badania wykazały brak przydatności warstwy przekładkowej ze spoiwa B-Cu100-1085 do lutowania stopu TiAl48Cr2Nb2 z powodu występowania niekorzystnych zjawisk dyfuzyjnych i wynikających stąd bardzo niskich właściwości wytrzymałościowych połączeń.

**Kontakt:**  
Instytut Spawalnictwa  
Zakład Technologii Spawalniczych

ul. Bł. Czesława 16-18  
44 - 100 Gliwice  
tel.: 32 33 58 235, -245; fax: 32 33 58 302  
www.is.gliwice.pl, is@is.gliwice.pl