Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym
Modern material technologies in aerospace industry

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

KONFERENCJA ROCZNA
Projektu Kluczowego
12-13 Grudnia 2011

ZB 8

Plastyczne kształtowanie lotniczych stopów Al (w tym Al - Li) oraz Ti
Plastic forming of aeronautical Al (including Al - Li) and Ti alloys

Politechnika Śląska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska, Politechnika Częstochowska

Wyniki badań
Results

Wstęp
Wytwarzanie bimetalu Ni-Ti z wykorzystaniem wysokoenergetycznego odkształcenia plastycznego (zgrzewania wybuchowego).

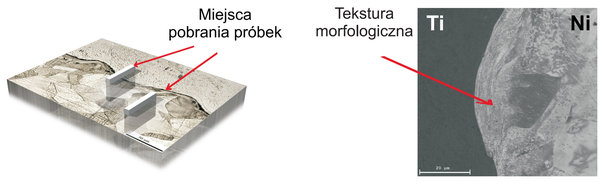
Zgrzewanie wybuchowe jest procesem, który wykorzystuje w sposób kontrolowany energię wybuchu do łączenia dwu lub więcej metali w stanie stałym w warunkach wysokiego ciśnienia. Platerowanie wybuchowe metali jest procesem o dużym znaczeniu technologicznym dla możliwości produkcji nowoczesnych kompozytów metalowych. Stanowi ono istotne uzupełnienie tradycyjnych metod produkcji platerów, takich jak napawanie lub walcowanie hutnicze. Uzyskiwane tą drogą bimetale, także kompozyty wielowarstwowe, składające się z więcej niż dwóch materiałów, posiadają unikalne własności konstrukcyjne. Cechuje je wysoka wytrzymałość, odporność korozyjna, doskonałe warunki przewodnictwa prądowego. Spajać wybuchem można materiały możliwe do połączenia metodami tradycyjnymi, jak i metale oraz ich stopy, dla których technologia ta nie ma alternatywy. Łączone materiały mogą się znacząco różnić swoimi właściwościami, jak np. stal-aluminium, lub stal-tytan. Oprócz możliwości produkcji nowych materiałów główną przesłanką przemawiającą za stosowaniem tej technologii są efekty ekonomiczne w postaci dużych oszczędności wynikających ze zmniejszenia zużycia drogich metali i ich stopów o szczególnych cechach, jak wysoka odporność korozyjna, odporność na wysokie temperatury. Bimetal NiTi otrzymywany z wykorzystaniem wysokoenergetycznego odkształcenia plastycznego wchodzi w zakres zainteresowań WSK „PZL – Rzeszów".

Introduction
Preparation of Ni-Ti bimetal using high-plastic deformation (explosive welding).

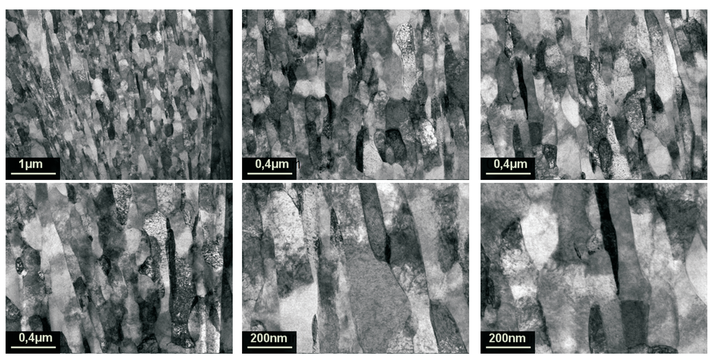
Explosive welding is considered to be a solid-state welding process that uses controlled explosive energy to force two or more metals together at high pressures. Explosive metal welding is of great technological importance for manufacturing of advanced metal composites. It substantially supplements conventional methods for clad metal manufacturing such as pad welding or mill rolling. Explosive clad bimetals and multilayer composites of more than two materials show unique constructional properties. They demonstrate high strength, corrosion resistance and excellent conditions for electric conduction. Explosive bonding can be applied for materials which can be easily connected by conventional methods as well as for those metals and alloys, for which no other alternative exists. Materials being bonded may substantially differ in respect of mechanical properties, e.g. as steel and aluminium or steel and titanium. Besides the possibility for production of new materials, the main reasons for explosive bonding application are savings resulting from reduced consumption of expensive metals and their alloys of special features like high corrosion resistance, high temperature resistance, electric conduction and others.
NiTi bimetal obtained by using high-plastic deformation falls within the scope of interest WSK "PZL - Rzeszów".

Metodyka
- Materiały: bimetal Ni-Ti po zgrzewaniu wybuchowym oraz po wyżarzaniu (600°C: 1h, 1+2h, 1+4h, 1+6h oraz 600°C/1h + 500°C/13h),
- Analiza morfologii, mikrostruktury, składu chemicznego i fazowego złącza bimetalowego Ti-Ni w stanie bezpośrednio po łączeniu wybuchowym oraz po procesach wyżarzania,
- Analiza właściwości mechanicznych:
  - Pomiary twardości,
  - Trójpunktowe zginanie z siłą skierowaną prostopadle do płaszczyzny złącza.

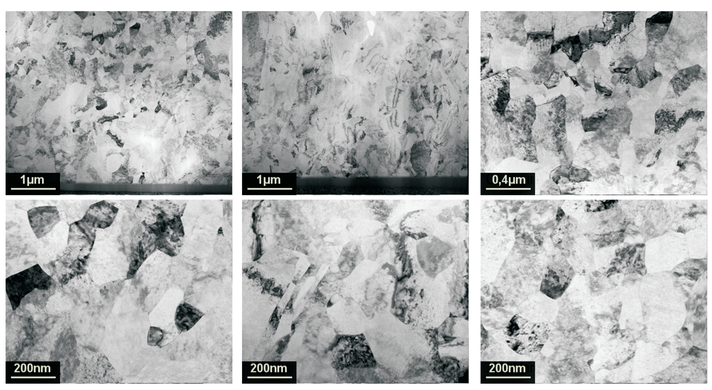
Methodology
- Materials: Ni-Ti bimetal after explosive welding and after annealing (at 600°C: 1h, 1+2h, 1+4h, 1+6h and at 600°C/1h + 500°C/13h),
- Analysis of the microstructure, chemical and phase composition Ni-Ti bimetal after explosive welding and annealing,
- Investigations of the mechanical properties:
  - Hardness tests,
  - Three-point bending tests.



Rys.1. Mikrostruktura bimetalu Ni-Ti; preparatyka próbek TEM
Fig.1. Microstructure of Ni-Ti bimetal; TEM specimen preparation



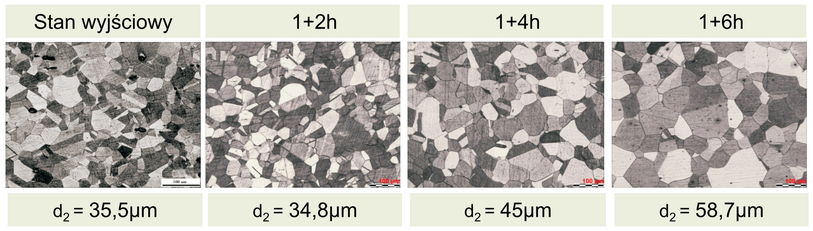
Rys.2. Mikrostruktura bimetalu Ni-Ti; obserwacje STEM (nikiel)
Fig.2. Microstructure of Ni-Ti bimetal; STEM observations (nickel)



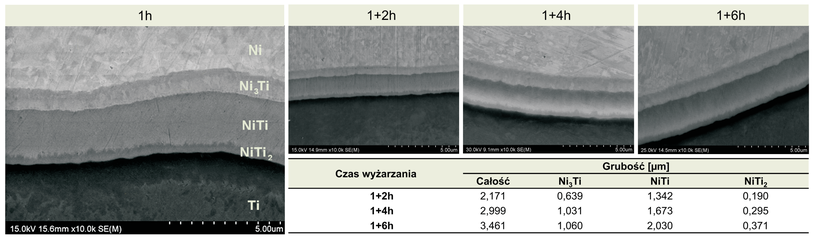
Rys.3. Mikrostruktura bimetalu Ni-Ti; obserwacje STEM (tytan)
Fig.3. Microstructure of Ni-Ti bimetal; STEM observations (titanium)

Wnioski
- Proces wysokoenergetycznego odkształcenia spowodowało powstanie ultradrobnoziarnistej mikrostruktury w pobliżu złącza, zarówno w tytanie jak i w niklu,
- Szerokość rozdrobnionego obszaru jest większa w przypadku tytanu,
- Wielkość ziarna dla obu łączonych materiałów jest zbliżona i wynosi ok. 140-190 nm,
- Mikrostruktura tytanu charakteryzuje się większą niejednorodnością oraz mniejszym udziałem granic szerokokątowych.

Stabilność cieplna
Thermal stability

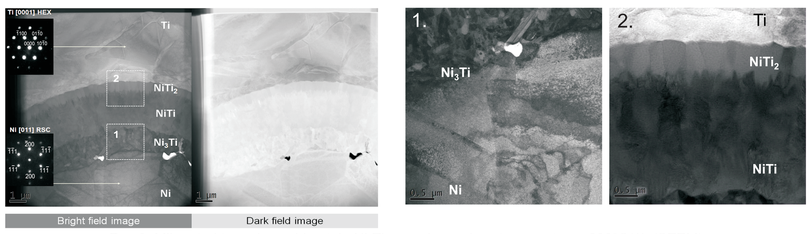


Rys.4. Wpływ czasu wyżarzania w temperaturze 600°C na mikrostrukturę niklu w bimetalu
Fig.4. Effect of annealing time at 600°C on the microstructure of nickel in bimetal



Czas wyżarzania	Grubość [µm]			
	Całość	Ni_3Ti	NiTi	$NiTi_2$
1+2h	2,171	0,639	1,342	0,190
1+4h	2,999	1,031	1,673	0,295
1+6h	3,461	1,060	2,030	0,371

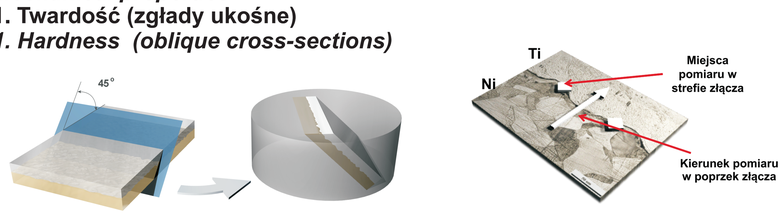
Rys.5. Wpływ czasu wyżarzania na grubość warstw faz międzymetalicznych obecnych w złączu bimetalicznym Ni-Ti
Fig.5. Effect of annealing time on the thickness of intermetallic layers in the Ni-Ti bimetallic joint



Rys.6. Mikrostruktura złącza bimetalu Ni-Ti po wyżarzaniu w temperaturze 600°C/1h (STEM)
Fig.6. Microstructure of Ni-Ti bimetallic joint after annealing at 600°C/1h (STEM)

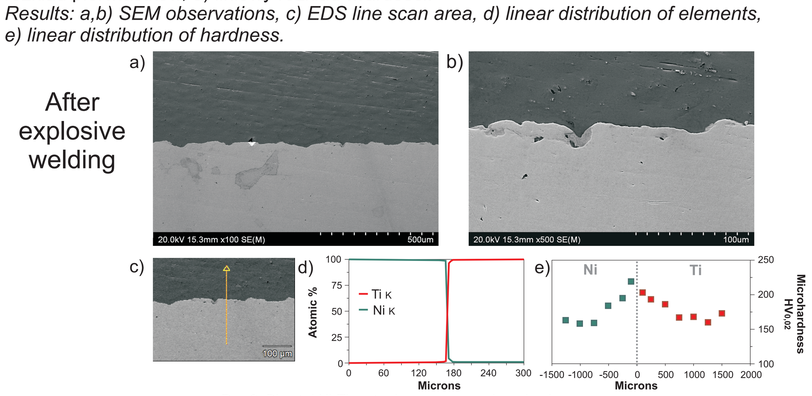
Wnioski
- Złącze Ni-Ti jest stabilne (brak zmian mikrostruktury i właściwości) do temperatury 500°C,
- Wyżarzanie złączy bimetalicznych w temperaturze 600°C przez 1h doprowadziło do powstania w obszarze złącza 3 faz międzymetalicznych z układu Ti - Ni: NiTi2, NiTi, Ni3Ti. Powstałe fazy charakteryzowały się różną grubością, jednorodnością oraz mikrostrukturą.

Właściwości mechaniczne bimetali
Mechanical properties
1. Twardość (zgłady ukośne)
1. Hardness (oblique cross-sections)

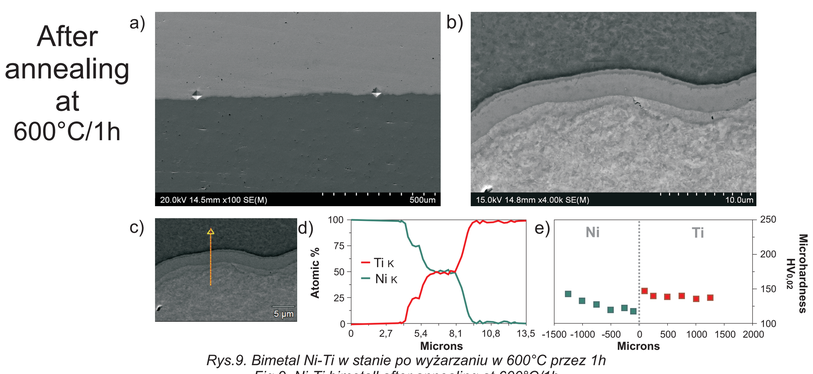


Rys.7. Preparatyka próbek; sposób prowadzenia pomiarów twardości
Fig.7. Specimen preparation; measurement methodology

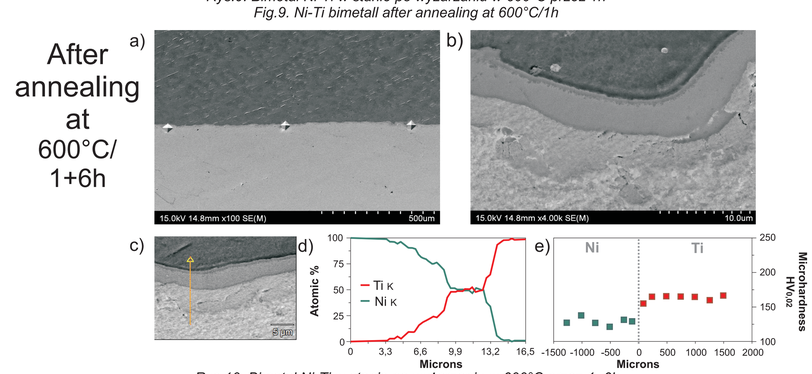
Prezentacja wyników: a,b) obserwacje SEM, c) obszar pomiaru liniowego EDS, d) liniowy rozkład pierwiastków, e) liniowy rozkład twardości.
Results: a,b) SEM observations, c) EDS line scan area, d) linear distribution of elements, e) linear distribution of hardness.



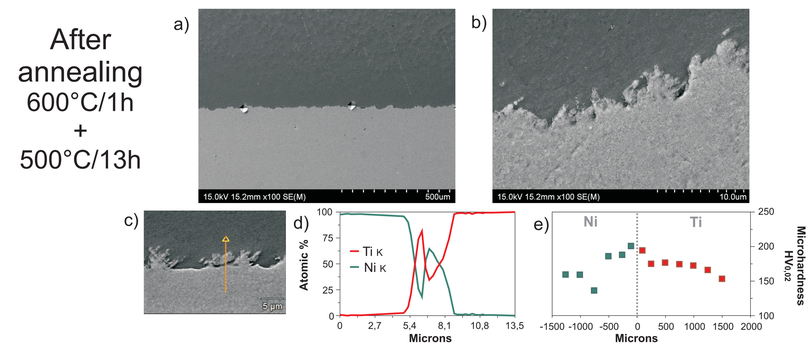
Rys.8. Bimetal Ni-Ti w stanie po zgrzewaniu wybuchowym
Fig.8. Ni-Ti bimetall after explosive welding



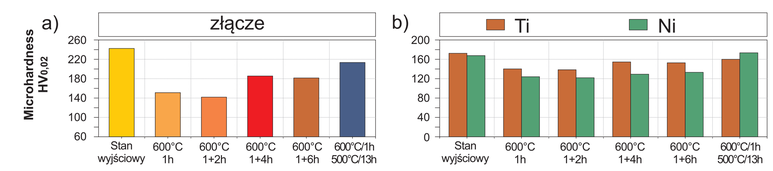
Rys.9. Bimetal Ni-Ti w stanie po wyżarzaniu w 600°C przez 1h
Fig.9. Ni-Ti bimetall after annealing at 600°C/1h



Rys.10. Bimetal Ni-Ti w stanie po wyżarzaniu w 600°C przez 1+6h
Fig.10. Ni-Ti bimetall after annealing at 600°C/1+6h



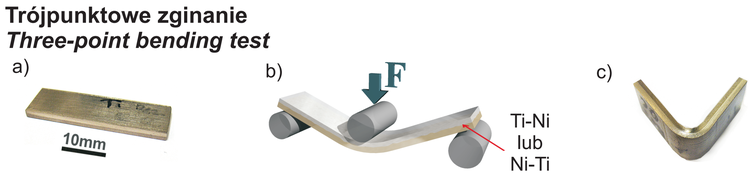
Rys.11. Bimetal Ni-Ti w stanie po wyżarzaniu w 600°C przez 1h oraz w 500°C przez 13h
Fig.11. Ni-Ti bimetall after annealing at 600°C/1h + 500°C/13h



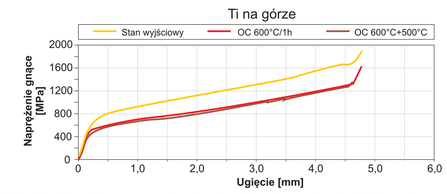
Rys.12. Twardość bimatalu Ni-Ti: a) w strefie połączenia, b) poza złączem
Fig.12. Ni-Ti bimetall hardness: a) in the joint, b) separately for nickel and titanium

Wnioski
- Największą twardością charakteryzują się próbki bez obróbki cieplnej (wzdłuż złącza i losowo w obszarze Ti i Ni),
- Najniższą twardość ma złącze po wyżarzaniu 600/1h i 600/1+2h,
- Wydłużenie czasu wygrzewania powoduje wzrost twardości złącza do poziomu przed obróbką cieplną.

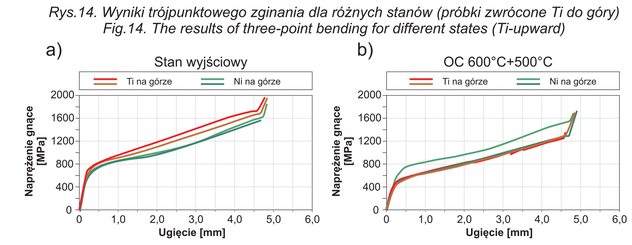
2. Trójpunktowe zginanie
2. Three-point bending test



Rys.13. Trójpunktowe zginanie: a) próbka przed próbą, b) schemat pomiaru, c) próbka po próbie
Fig.13. Three-point bending test: a) specimen before test, b) method scheme, c) specimen after test



Rys.14. Wyniki trójpunktowego zginania dla różnych stanów (próbki zwrócone Ti do góry)
Fig.14. The results of three-point bending for different states (Ti-upward)



Rys.15. Wyniki trójpunktowego zginania w zależności od ułożenia próbki:
a) w stanie po zgrzewaniu wybuchowym, b) po wyżarzaniu 600°C/1h + 500°C/13h
Fig.15. Results of three-point bending, depending on the orientation of the sample:
a) after explosive welding, b) after annealing at 600°C/1h + 500°C/13h

Tabela 1. Wyniki trójpunktowego zginania
Table 1. Results of three-point bending

	Próbka	szerokość przekroju a [mm]	wysokość przekroju b [mm]	S=a*b [mm2]	Fmax [N]	Maksymalne naprężenie	Przyłożenie siły F do powierzchni	Pęknięcie, rozwarstwienie
1	BEZ OC	9,9	2,1	20,79	-	dla końca próby	Ti	brak
2	BEZ OC	9,95	2,1	20,895	-	dla końca próby	Ti	brak
3	BEZ OC	9,87	2,09	20,6283	-	dla końca próby	Ni	brak
4	BEZ OC	9,9	2,12	20,988	-	dla końca próby	Ni	brak
5	600 1h / 500 13h	9,89	2,11	20,8679	-	dla końca próby	Ti	brak
6	600 1h / 500 13h	9,86	2,11	20,8046	-	dla końca próby	Ti	brak
7	600 1h / 500 13h	9,69	2,06	19,9614	-	dla końca próby	Ni	brak
8	600 1h / 500 13h	9,89	2,11	20,8679	-	dla końca próby	Ni	brak
9	600 1h	9,76	2,11	20,5936	-	dla końca próby	Ti	brak
10	600 1h	9,88	2,12	20,9456	-	dla końca próby	Ni	brak

Wnioski
- Badania makroskopowe po próbie trójpunktowego zginania wykazały, że żadna z próbek nie uległa rozwarstwieniu lub pęknięciu.

Przykłady zastosowania w lotnictwie
Examples of application in aviation

- Wytwornica gazów w silnikach turbinowych (gazgeneratory)
- Wyloty gazów spalinowych w silnikach turbinowych

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym
Collaboration with aviation industry

- Technologia wytwarzania bimetalu na bazie Ti-Ni z wykorzystaniem wysokoenergetycznego odkształcenia plastycznego (zgrzewanie wybuchowe) wchodzi w zakres zainteresowań zakładów WSK „PZL-Rzeszów" S.A.

Wskaźniki realizacji celów projektu
Indicators of the project

Referaty
1. Garbacz H.: ***Metody otrzymywania nanokrystalicznego tytanu.*** *Konferencja „Tytan i jego stopy - 2011", Myczkowice, 9-12 października 2011r.*

Publikacje
1. Topolski K., Garbacz H., Pachla W., Wieciński P., Kurzydłowski K. J.: ***Machanical Properties of Nanocrystalline Titanium Obtained by Hydrostatic Extrusion.*** *Artykuł zgłoszony na konferencję EMR-S 2011, w recenzji*
2. Garbacz H.: ***Metody otrzymywania nanokrystalicznego tytanu.*** *Inżynieria Materiałowa, w druku*

Prace mgr, dr, hab.
Prace magisterskie obronione:
- Wasiluk Kamil : ***Mikrostruktura i właściwości blach bimetalicznych Ti-Ni uzyskanych metodą platerowania wybuchowego***. Promotor: dr hab. inż. Halina Garbacz

Prace inżynierskie planowane
- Adrian Rybka : ***Wytwarzanie bimetalu NiTi z wykorzystaniem wysokoenergetycznego odkształcenia plastycznego***. Promotor: dr hab. inż. Halina Garbacz, planowany termin obrony pracy : 2012

Prace magisterskie planowane
- Anna Dobkowska : ***Zależność odporności korozyjnej stopów Al-Li od stopnia zgniotu*** . Promotor: dr inż. Joanna Zdunek, planowany termin obrony pracy : 2011

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO