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
RADY PARTNERÓW CZT AERONET
i PANELE EKSPERTÓW
9 - 10 Grudnia 2013

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

WYCISKANIE HYDROSTATYCZNE STOPÓW Al-Li
Cel
Kształtowanie stopów Al-Li metodą wyciskania hydrostatycznego pod kątem poprawy ich właściwości mechanicznych
Metodyka
- Badanie składu chemicznego stopu
- Charakterystyka mikrostruktury i właściwości materiału w stanie wyjściowym (stan dostawy), po wyciskaniu, po umacnianiu wydzieleniowym oraz po przesycaniu, wyciskaniu oraz starzeniu
- Procesy wieloetapowego wyciskania hydrostatycznego stopów aluminium z litem (8090 oraz 2099) w stanie dostawy oraz po przesycaniu
- Dobór warunków umocnienia wydzieleniowego
- Dobór i analiza parametrów procesów wyciskania hydrostatycznego
- Analiza makroskopowa produktów wyciskania
- Opis właściwości mechanicznych w oparciu o pomiary twardości (po procesie przesycania, a także na różnych etapach wyciskania oraz pomiary w trakcie starzenia naturalnego)

Procesy wyciskania hydrostatycznego przeprowadzono we współpracy z Instytutem wysokich ciśnień Polskiej Akademii Nauk

HYDROSTATIC EXTRUSION OF Al-Li ALLOYS
Aim of the study
Improvement of the the mechanical properties of Al-Li alloys using hydrostatic extrusion method
Methods
- *Chemical composition analysis*
- *characterization of the microstructure and properties of the material in the initial state (state of delivery), after hydroextrusion, precipitation strengthening and after combined: solutioning, hydroextrusion and ageing processes*
- *Multi-stage hydrostatic extrusion processes of Al-Li alloys (8090 and 2099): state of delivery and after solutioning*
- *Selection of the strengthening parameters*
- *Selection and analysis of hydrostatic extrusion process parameters (pressure extrusion, extrusion process, the number of stages)*
- *Analysis of macroscopic extrusion products*
- *Description of the mechanical properties (based on hardness analaysis) after various processes*

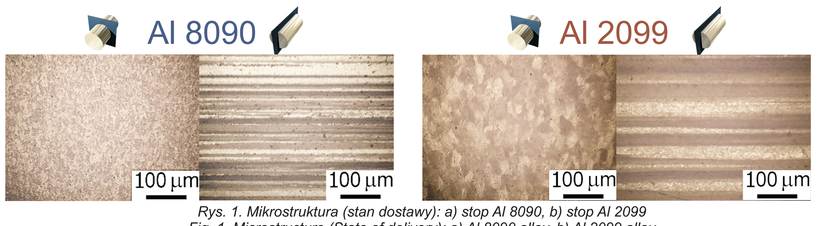
Hydrostatic extrusion processes were carried out in collaboration with the Institute of High Pressure of the Polish Academy of Sciences

Materiał w stanie dostawy (Skład chemiczny, mikrotwardość, mikrostruktura)
Material - state of delivery (Chemical composition, microhardness, microstructure)

Tabela 1. Skład chemiczny stopów Al 8090 i Al 2099
Table 1. Chemical compositio of Al 8090 and Al 2099 alloys

	Chemical composition 8090 OES, AAS – weight %, rest Al											
	Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	Be	Li
Al 8090	1,58	0,12	0,088	0,007	1,18	0,004	0,029	0,005	0,042	0,072	0,00001	2,65
	Chemical composition 2099 OES, AAS – weight %, rest Al											
	Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	Be	Li
Al 2099	2,85	0,043	0,029	0,35	0,39	0,004	0,023	0,73	0,044	0,070	0,00001	1,85

(OES - Optical Emision Spectroscopy, AAS - Atomic Absorption Spectrometry)

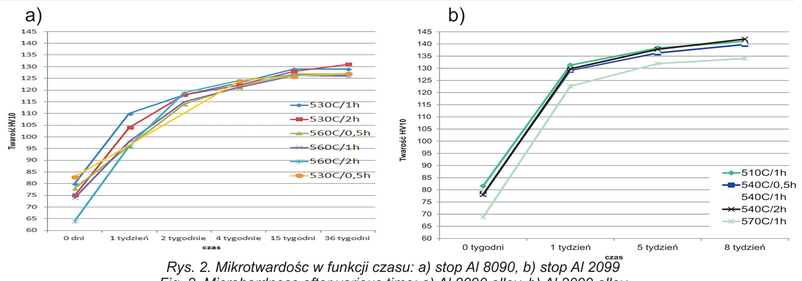


Rys. 1. Mikrostruktura (stan dostawy): a) stop Al 8090, b) stop Al 2099
Fig. 1. Microstructure (State of delivery): a) Al 8090 alloy, b) Al 2099 alloy

Tabela 2. Pomiary mikrotwardości (w stanie dostawy)
Table 2. *Microhardness (state of delivery)*

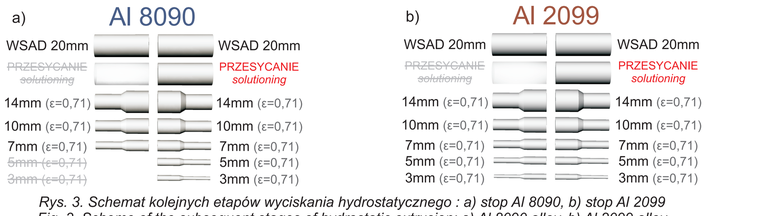
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Średnia
Al 8090	HB	79,2	79,4	80,4	80,4	80,9	82,7	81,3	81,1	82,0	-	80,8
	HV	79	80	79	81	79	80	81	81	82	80	80,2
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Średnia
Al 2099	HB	71,2	71,7	71,5	71,7	69,7	71,4	-	-	-	-	71,2
	HV	71	70	71	71	69	70	70	70	70	71	70,3

PRZESYCANIE I STARZENIE (mikrotwardość w funkcji czasu starzenia naturalnego)
SOLUTIONING AND AGING (microhardness as a function of natural aging)

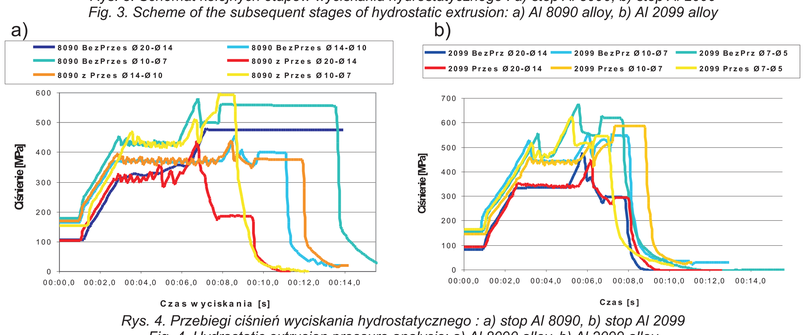


Rys. 2. Mikrotwardośc w funkcji czasu: a) stop Al 8090, b) stop Al 2099
Fig. 2. Microhardness after various time: a) Al 8090 alloy, b) Al 2099 alloy

WYCISKANIE HYDROSTATYCZNE
HYDROSTATIC EXTRUSION



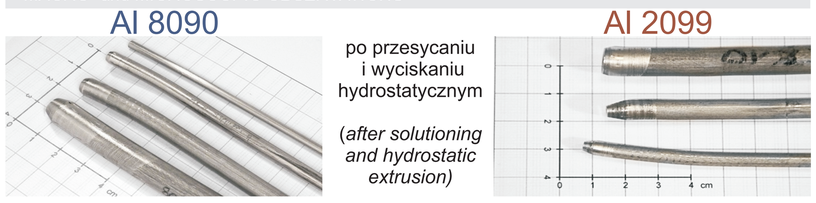
Rys. 3. Schemat kolejnych etapów wyciskania hydrostatycznego : a) stop Al 8090, b) stop Al 2099
Fig. 3. Scheme of the subsequent stages of hydrostatic extrusion: a) Al 8090 alloy, b) Al 2099 alloy



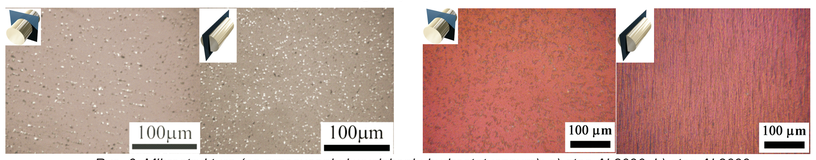
Rys. 4. Przebiegi ciśnień wyciskania hydrostatycznego : a) stop Al 8090, b) stop Al 2099
Fig. 4. Hydrostatic extrusion pressure analysis: a) Al 8090 alloy, b) Al 2099 alloy

Dla obu stopów w procesach HE I P+HE dla tych samych redukcji przekrojów występują podobne wartości ciśnień, ale procesom P+HE towarzyszą większe jego oscylacje.
For both alloys, HE pressures with, and without solutionizing process are similar. Process after solutioning is accompanied by greater pressure oscillations

OBSERWACJE MAKRO- i MIKROSKOPOWE
MACRO- and MICROSCOPIC OBSERVATIONS

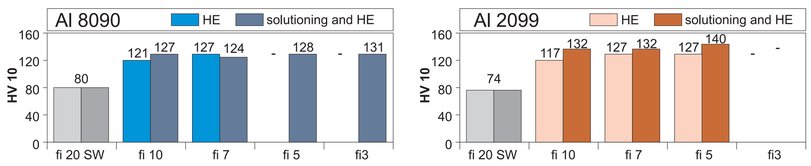


Rys. 5. Zdjęcia wyciskanych prętów
Fig. 5. Photography of the extruded rods



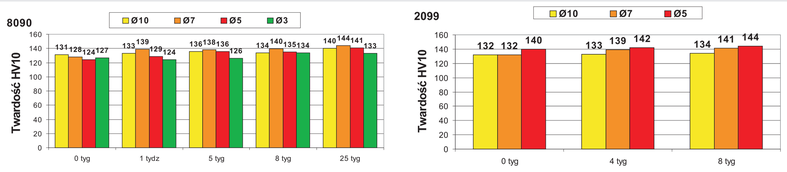
Rys. 6. Mikrostruktura (po przesycaniu i wyciskaniu hydrostatycznym): a) stop Al 8090, b) stop Al 2099
Fig. 6. Microstructure (after solutioning and hydrostatic extrusion): a) Al 8090 alloy, b) Al 2099 alloy

POMIARY MIKROTWARDOŚCI - wpływ przesycania *na mikrotwardość po wyciskaniu hydrostatycznym*
MICROHARDNESS ANALYSIS - influence of solutioning process on microharness after hydrostatic extrusion



Rys. 7. Wpływ procesu przesycania na mikrotwardość po wyciskaniu hydrostatycznym
Fig. 7. The influence of solutioning process on microhardness after hydrostatic extrusion

PROCES STARZENIA NATURALNEGO po przesycaniu i wyciskaniu hydrostatycznym
NATURAL AGING PROCESS after solutioning and hydrostatic extrusion



Rys. 8. Mikrotwardość po różnych stopniach odkształcenia i czasach stażenia : a) stop Al 8090, b) stop Al 2099
Fig. 8. Microhardness after different HE stages and various time of aging: a) Al 8090 alloy, b) Al 2099 alloy

ZESTAWIENIE UZYSKANYCH WYNIKÓW (mikrotwardość)
SUMMARY OF THE OBTAINED RESULTS (microhardness)

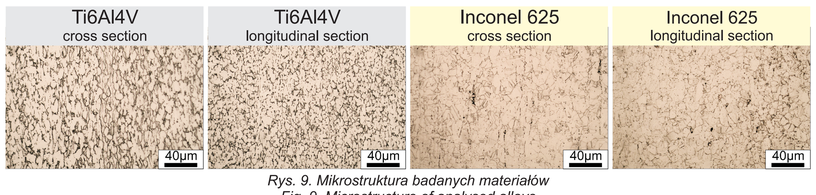
Tabela 3. Podsumowanie wyników
Table 3. Summary of the obtained results

Stop	Stan wyjściowy	Wyciskanie hydrostatyczne (HE)		Przesycanie i starzenie naturalne (P+S)	Przesycanie i wyciskanie (P+HE)		Przesycanie, wyciskanie i starzenie naturalne (P+HE+S)	
		O10	O7		O10	O5	O10	O5
8090	83	125	128	127 (36 tygodni)	127	128	133 (25 tygodni)	144 (25 tygodni)
2099	74	117	127	134 (8 tygodni)	132	140	134 (8 tygodni)	144 (8 tygodni)

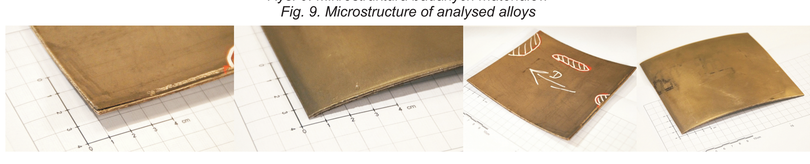
połączenie procesów umocnienia zgniotem z umocnieniem wydzieleniowym pozwala na zwiększenie twardości stopu AA 8090 o około 73% i stopu AA 2099 o około 95%
Combination of cold work strengthening the perticipate strengthening can increase the hardness of the AA 8090 alloy by about 73% and AA 2099 alloy by about 95%

ZGRZEWANIE WYBUCHOWE stopów Ni Ti
Cel
Wykorzystanie wysokoenergetycznego odkształcenia plastycznego (zgrzewanie wybuchowe) do łączenia stopu tytanu Ti6Al4V ze stopem niklu Inconel 625, na podstawie doswiadczeń zdobytycz w łaczeniu Ni-Ti
Materiał
- Stop niklu Inconel 625, trzy blachy o grubości g=1,55mm o wymiarach: 250mm x 350mm
- Stop tytanu Ti6Al4V, dwie blachy o grubości g=0,84mm o wymiarach: 200mm x 300mm

EXPLOSIVE WELDING of Ni and Ti ALLOYS
Aim of the study
The use of high-energy plastic deformation (explosive welding) to join Ti6Al4V titanium alloy with Inconel 625 nickel alloy, (based on experience in welding Ni and Ti)
Materials
- *Inconel 625 alloy, three sheets of g=1,55mm thickness and 250mm x 350mm dimensions*
- *Ti6Al4V alloy, two sheets of g=0,84mm thickness and: 200mm x 300mm dimensions*

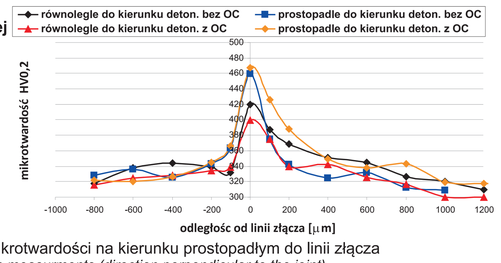


Rys. 9. Mikrostruktura badanych materiałów
Fig. 9. Microstructure of analysed alloys

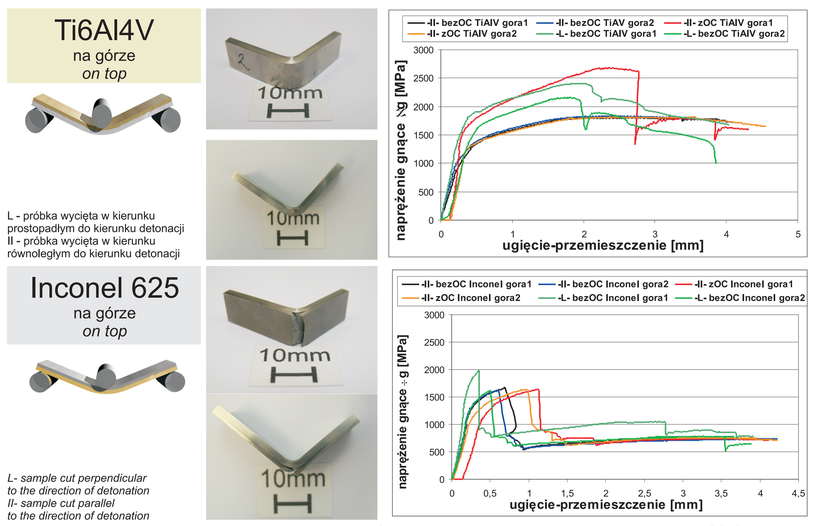


Rys. 10. Przykładowa blacha bimetaliczna (Ti6Al4V - Inconel 625)
Fig. 10. Sample Ti6Al4V - Inconel 625 bimetal

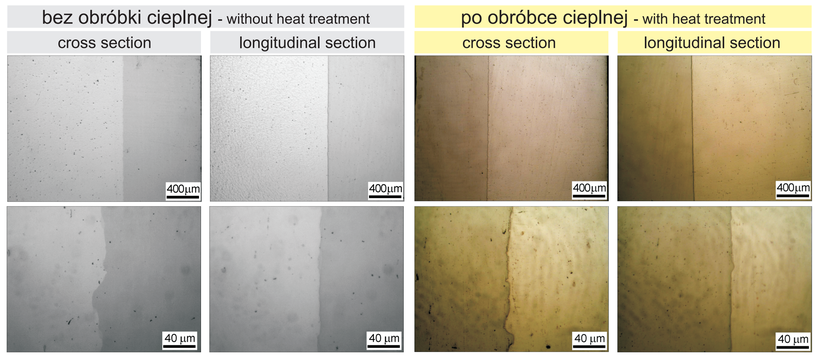
Wyniki pomiarów mikrotwardości na całej grubości bimetalu na kierunku prostopadłym do linii złącza:
- na płaszczyźnie równoległej do kierunku detonacji: z obróbką cieplną (z OC) oraz bez obróbki cieplnej (bez OC)
- na płaszczyźnie prostopadłej do kierunku detonacji: z obróbką cieplną (z OC) oraz bez obróbki cieplnej (bez OC)



Rys. 11. Wyniki pomiarów mikrotwardości na kierunku prostopadłym do linii złącza
Fig. 11. Microhardness measurments (direction perpendicular to the joint)



Rys. 12. Wyniki prób zginania trójpunktowego (wpływ kierunku detonacji oraz obróbki cieplnej 650C/1h)
Fig. 12. Results of the three-point bend test (influence of the direction of detonation and heat treatment 650C/1h)



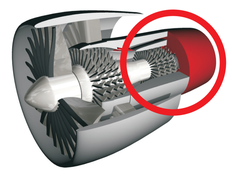
Rys. 13. Obserwacje mikroskopowe strefy złącza
Fig. 13. Microscopic observations of the joint

Wnioski
Conclusions

- Stop Al 2099 jest bardziej podatny na odkształcenie plastyczne metodą wyciskania hydrostatycznego niż stop Al 8090,
- Wyciskanie stopów Al-Li w stanie przesyconym pozwala na uzyskanie odkształcenia niezbędnego do otrzymania ultradrobnoziarnistej struktury,
- Znaczący wzrost twardości (około 70-100%) stopów Al-Li można uzyskać poprzez połączenie umocnienia zgniotem z umocnieniem wydzieleniowym (przesycanie + wyciskanie hydrostatyczne + starzenie naturalne),
- W wyniku podjętych prób łączenia wybuchowego stopów Ti6Al4V oraz Inconel 625 uzyskano spójne oraz wytrzymałe złącze bimetaliczne. Wyniki testów zginania ujawniły, że w przypadku górnego położenia stopu Ti6Al4V (tzn. rozciągania stopu Inconel 625) żadna próbka nie uległa pękaniu,
- Niezależnie od badanej próbki w strefie połączenia zaobserwowano efekt umocnienia wyrażony wyraźnym wzrostem mikrotwardości.

- *Al 2099 alloy is more susceptible to plastic deformation by hydrostatic extrusion than Al 8090 alloy,*
- *Hydrostatic Extrusion of Al-Li alloys after solutioning process allows to obtain the necessary deformation rate to get ultrafine structure,*
- *A significant increase in hardness (about 70-100%) of Al-Li alloys can be achieved by a combination of plastic deformation and precipitation strengthening (solutioning process + extrusion hydrostatic + natural aging),*
- *Selected parameters of explosive welding allowed to obtain Ti6Al4V and Inconel 625 Bimetal. Upper position of Ti6Al4V alloy in 3-point bending test (stretching Inconel 625) porovides no fracture of the sample,*
- *On every sample, zone strengthening effect was observed (increased microhardness in the joint area).*

Przykłady zastosowania w lotnictwie
Examples of application in aviation



Złącza bimetalowe Ni-Ti: wytwornica gazów w silnikach turbinowych (gazgeneratory), Wyloty gazów spalinowych w silnikach turbinowych

Rys. 14. Silnik turboodrzutowy
Fig. 14. Turbine engine

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***. Archives of Metallurgy and Materials, 57 (2012) 863 – 867
2. Garbacz H.: ***Metody otrzymywania nanokrystalicznego tytanu***. Inżynieria Materiałowa, Nr 3(187) (2012)134-138
3. Dolega Ł., Adamczyk-Cieślak B., Mizera J., Kurzydłowski K. J.: ***Corrosion resistance of model ultrafinegrained Al-Li alloys produced by severe plastic deformation***, Journal of Materials Science (2012) 47, 3026-3033

Prace mgr, dr, hab.
Prace magisterskie obronione:
- Kamil Wasiluk: ***Mikrostruktura i właściwości blach bimetalicznych Ti-Ni uzyskanych metodą platerowania wybuchowego***. Promotor: dr hab. inż. Halina Garbacz
- Anna Dobkowska: ***Zależność odporności korozyjnej stopów Al-Li od stopnia zgniotu*** . Promotor: dr inż. Joanna Zdunek
- Małgorzata Kobus: ***Wyciskanie hydrostatyczne stopów Al-Li***. Promotor prof. dr hab.Halina Garbacz
- Adrian Rybka: ***Mikrostruktura i właściwości złącza Ti6Al4V / Inconel 625 uzyskanego metodą łączenia wybuchowego***. Promotor: prof. dr hab. Halina Garbacz (2013 rok)

Prace inżynierskie obronione:
- Adrian Rybka : ***Wytwarzanie bimetalu NiTi z wykorzystaniem wysokoenergetycznego odkształcenia plastycznego***. Promotor: prof. dr hab. inż. Halina Garbacz,

Udział studentów: 4
Udział doktorantów: 3
Udział innych wykonawców: 2

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO