

# Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

Nr zadania - ZB 15



## Partnerzy - ZB 15

- 1) Politechnika Lubelska - dr hab. inż. Tomasz Sadowski, prof.. PL
- 2) Politechnika Rzeszowska - dr hab. inż. Jarosław Sęp, prof. PRz
- 3) Politechnika Częstochowska - dr inż. Piotr Lacki



## A. Kierunki rozwoju technologii łączenia elementów konstrukcji lotniczych

### Serge Rabois, dyrektor projektu i analiz A380

na A380 składa się „optymalna hybrydyzacja” całkowicie różnych materiałów. Zmusiliśmy najlepsze technologie materiałowe do konkutowania ze sobą W tej bezwzględnej analizie konkurencyjnej porównywano własności połączonych metalu i kompozytu.

Nie brano pod uwagę wyłącznie ciężaru i najważniejszych właściwości mechanicznych, ale uwzględniano także koszt, łatwość produkcji i naprawy po wejściu samolotu do normalnej eksploatacji.

Prawdziwa konkurencja sprowadza się do łatwości wytwarzania.

Na przykład **wykorzystanie zaawansowanych technik spawania faworyzuje metale i projekty niektórych struktur.**

Airbus tylko dlatego mógł wziąć pod uwagę tak wiele struktur kompozytowych do skonstruowania A380, ponieważ był w stanie przede wszystkim... je wykonać.

Rabois twierdzi, że

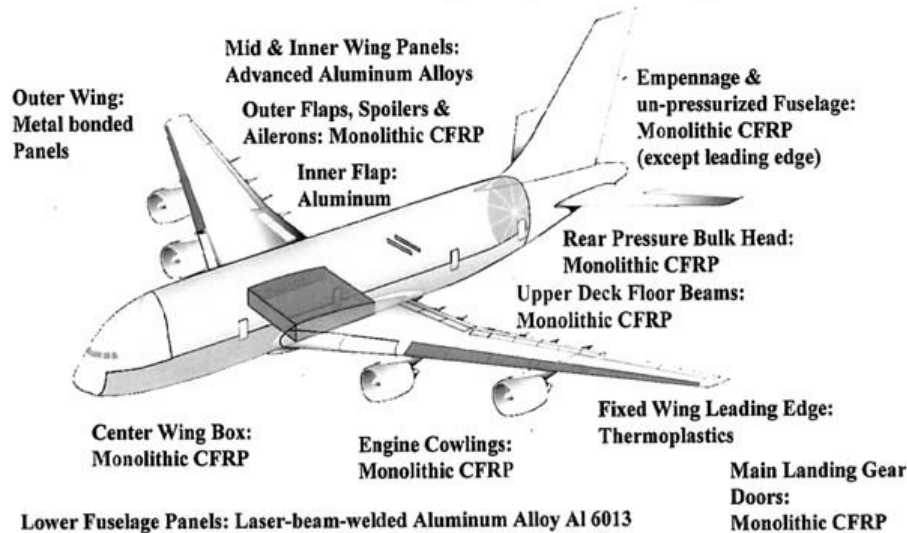
techniki produkcji stopów aluminium i tytanu stają się coraz efektywniejsze i jednocześnie tańsze.

W rezultacie przy każdym nowym projekcie samolotu... konkurencja zaczyna się od nowa.

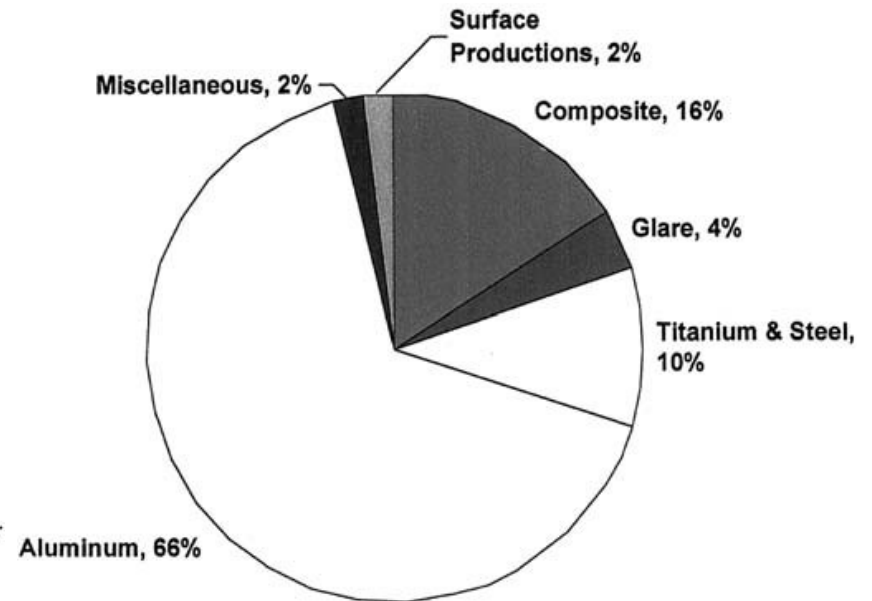


## A. Kierunki rozwoju technologii łączenia elementów konstrukcji lotniczych

Upper Fuselage Panels: Al 2524 with Al 7000-series high strength stringers and Fiber Metal Laminates (GLARE) with Al 2024-stringers



**Schematyczne przedstawienie wyboru materiałów na różne części Airbus A-380\***



**Procentowy wagowy udział materiałów w Airbus A-380\***

\*J.C. Williams, E.A. Starke, Jr. / Acta Materialia 51 (2003) 5775–5799

## **A. Kierunki rozwoju technologii łączenia elementów konstrukcji lotniczych**

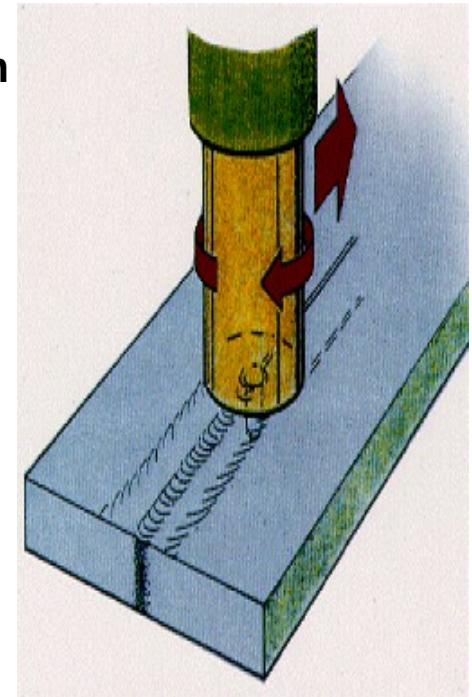
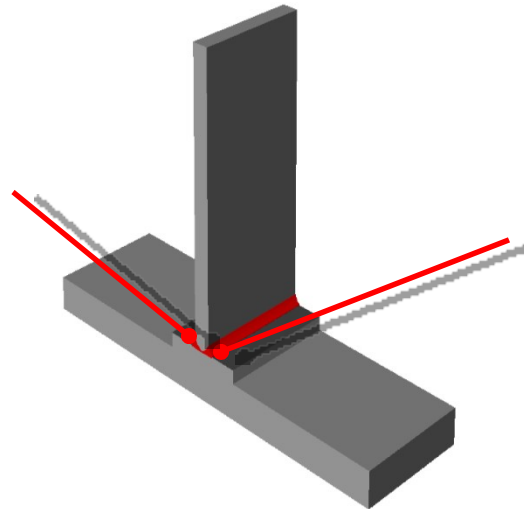
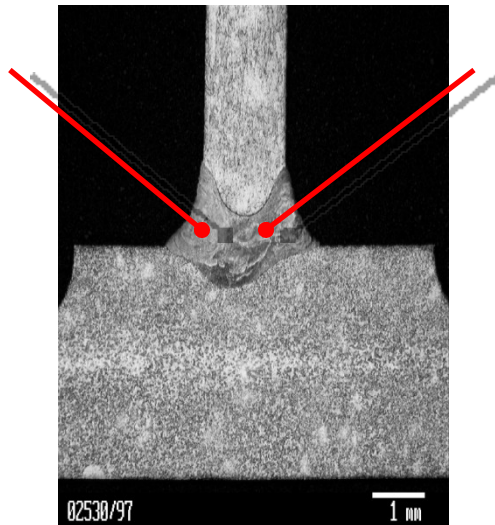
### **Typy połączeń elementów konstrukcji lotniczych:**

- zgrzewanie: dyfuzyjne i tarciove
- spawanie
- lutowanie twarde
- klejenie
- nitowanie
- połączenia kombinowane

## A. Kierunki rozwoju technologii łączenia elementów konstrukcji lotniczych

### Nowoczesne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych:

- Spawanie wiązką lasera (Laser Beam Welding LBW)
- Zgrzewanie z przemieszaniem (Friction Stir Welding FSW)
- Spawanie niskoenergetyczne
- Spawanie materiałów termoplastycznych z wkładem oporowym



## A. Kierunki rozwoju technologii łączenia elementów konstrukcji lotniczych

### Klejenie:

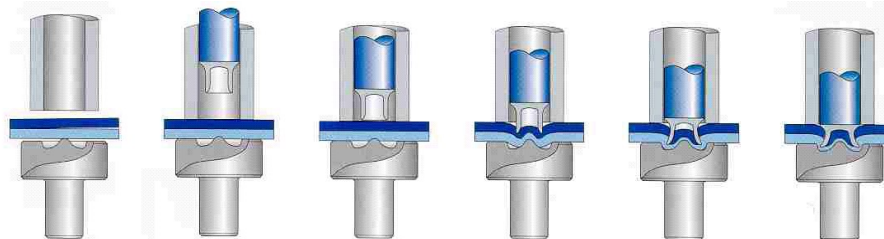
- opracowanie nowych technologii łączenia kompozytów polimerowych wykonanych w technologii suchej ze stopami metali stosowanymi w przemyśle lotniczym
- łączenie adhezyjne stopów metali po operacji ozonowania (alternatywa dla stosowanych metod tzw. „chemii mokrej”)
- badania wpływu sposobu przygotowania powierzchni na właściwości wytrzymałościowe: statyczne i zmęczeniowe
- opracowanie technologii umacniania połączeń klejowych metodą nagniatania dynamicznego.

## PRZYKŁADOWE KIERUNKI ROZWOJU TECHNOLOGII NITOWANIA

### NITOWANIE BEZOTWOROWE self-piercing riveting - SPR

W **pierwszej fazie procesu** następuje wciskanie nitu w górną warstwę materiału. Po zetknięciu dolnej warstwy z matrycą nit przebija górną warstwę a dolny arkusz materiału wraz z nitem odkształcając się przybiera odpowiedni kształt. W **fazie ostatniej** następuje wypełnienie wykroju matrycy i pełne uformowanie połączenia. Kształt matrycy powoduje uformowanie nitu tak, aby dociskał on górną część arkusza blachy do arkusza dolnego. Przy prawidłowo przeprowadzonej operacji nitowania nie powinno nastąpić przebicie dolnej warstwy przez nit. Całość operacji wymaga jednego, nieprzerwanego skoku roboczego stempla.

Jest to metoda łączenia cienkich elementów (głównie blach i taśm) za pomocą specjalnych, rurowych nitów. Ze względu na wpływ dużych odkształceń na wytrzymałość złącza oraz sposób jego kształtowania, proces klasyfikowany jest jako proces obróbki plastycznej. Efektem jest powstanie nierozłącznego połączenia kilku warstw materiału.



stal - 1mm, aluminium - 2mm



aluminium - 1.2 x 1.2mm



stal - 0.8 x 1.0 x 0.8 x 2.0mm



aluminium - 1.2mm, stal - 1.8mm,  
aluminium - 1.2mm



tworzywo sztuczne - 2mm, aluminium - 2mm



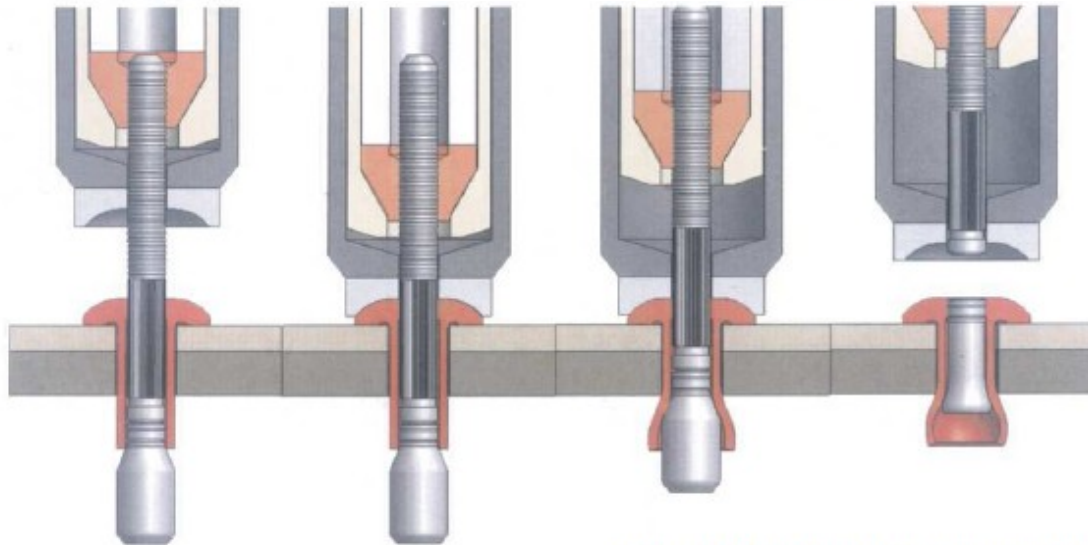
# PRZYKŁADOWE KIERUNKI ROZWOJU TECHNOLOGII NITOWANIA

## Rurkowe nity zrywalne

**Huck**<sup>®</sup>



**Magna - Lok (nit z łbem grzybkowym).**  
Wysokowytrzymały nit jednostronnie zamykany o dużym zakresie zakleszczania i dobrej wewnętrznej powierzchni otworu. Trzpień jest w sposób automatyczny blokowany przed poluzowaniem. Punkt wprowadzania leży zawsze w obrębie korpusu nitu. Nit typu Magna - Lok zapewnia przeciwrozrygowe uszczelnienie zespołu konstrukcyjnego.



## **B. Innowacyjne rozwiązania i transfer wiedzy do przemysłu**

### **Łączenie elementów konstrukcji lotniczych:**

- spawanie niskoenergetyczne
- spawanie materiałów termoplastycznych z wkładem oporowym

### **Klejenie:**

- opracowanie nowych technologii łączenia kompozytów polimerowych wykonanych w technologii suchej ze stopami metali stosowanymi w przemyśle lotniczym
- łączenie adhezyjne stopów metali po operacji ozonowania (alternatywa dla stosowanych metod tzw. „chemii mokrej”)

### **Nitowanie:**

- optymalizacja kształtu nitu ze względu na właściwości wytrzymałościowe złącza

### **Połączenia kombinowane:**

- optymalizacja doświadczalna i metodą elementów skończonych parametrów konstrukcyjnych i technologicznych połączeń



## C. Powiązania podzadań badawczych z potrzebami krajowego przemysłu lotniczego

### WSK Rzeszów

- Opracowanie technologii spawania (metodą TIG, spawania plazmowego, spawania EBW i LBW) **nadstopów niklu ze stalami stopowymi** dla różnych typów złączy z zachowaniem lotniczych wymagań jakości spoin.
- Opracowanie technologii spawania (metodą TIG, spawania plazmowego, spawania EBW i LBW) **stopów tytanu ze stalami stopowymi** dla różnych typów złączy z zachowaniem lotniczych wymagań jakości spoin.
- Opracowanie **optymalnych parametrów spawania EBW** połączeń doczołowych (bez zamka) dla stali stopowych, nadstopów niklu i stopów tytanu z zachowaniem lotniczych wymagań jakości spoin.
- Opracowanie technologii zautomatyzowanego napawania zamków łopatek metodą TIG.
- Lutowanie próżniowe i indukcyjne
- Symulacja numeryczna procesów spawania



## **C. Powiązania podzadań badawczych z potrzebami krajowego przemysłu lotniczego**

### **PZL ŚWIDNIK**

**1. Łączenie tarcz hamulcowych wirnika nośnego śmigłowca (temperatura pracy do 350st.C i bardzo duże obciążenia). Dotychczas stosowane nitowanie z zastosowaniem stopów Cu powoduje pęknięcia tarcz.**

**( wprowadzane tarcze hamulcowe nowej generacji , bezazbestowe o podwyższonej kruchości)**

**2. Zaprojektowanie i zbudowanie układu pomiarowego umożliwiającego monitorowanie parametrów procesu spawania wiązką elektronów (temperatura pracy)**



## **C. Powiązania podzadań badawczych z potrzebami krajowego przemysłu lotniczego**

### **PZL Mielec**

#### **1. Optymalizacja technologii łączenia struktur ze stopów aluminium:**

- połączenia nitowane (automatyzacja procesu, eliminacja naprężeń rozciągających w strefie połączenia),**
- połączenia klejowe (doskonalenie technologii),**
- połączenia klejowo-zgrzewane, klejowo-nitowe (optymalizacja technologii).**

#### **2. Doskonalenie technologii wykonania połączeń śrubowych kompozytów metalowo-polimerowych.**



## **C. Powiązania podzadań badawczych z potrzebami krajowego przemysłu lotniczego**

### **Pratt&Whitney Kalisz**

- 1. Optymalizacja procesów klejenia i lutowania - zapewnienie powtarzalności (przygotowania powierzchni) opracowanie metody kontroli poprawności przygotowania powierzchni.**
- 2. Zaprojektowanie i zbudowanie układu pomiarowego umożliwiającego monitorowanie parametrów procesu spawania wiązką elektronów (temperatura pracy).**

## **C1. Harmonogram podzadań badawczych**

**15.1) Analiza możliwości i wybór konkretnych systemów łączenia materiałów w konstrukcjach lotniczych, uwzględniających konstrukcję złączy i warunki ich eksploatacji (miesiące 1-9).**

**15.2 ) Analiza stanu naprężeń własnych w proponowanych modelach połączeń (miesiące 1-18)**

**15.3) Dobór odpowiedniej techniki łączenia dla konkretnych materiałów (np. metal-metal, metal-kompozyt polimerowy , kompozyt – kompozyt jednakowych i różnych rodzajów) łączonych w konstrukcjach lotniczych (miesiące 9-48).**



## **C1. Harmonogram podzadań badawczych**

### **15.3A.:Zgrzewanie :**

**zgrzewanie dyfuzyjne, tarciove**

### **15.3 B. Spawanie, uwzględniając spawanie materiałów termoplastycznych z wkładem oporowym**

### **15.3 C. Lutowanie twarde**

### **15.3 D. Klejenie**

### **15.3 E. Nitowanie**

### **15.3 G. Połączenia kombinowane**

**15.4) Badania właściwości fizycznych, mechanicznych, cieplnych,  
odporności na korozję, ścieranie oraz żywotności w określonych  
warunkach eksploatacyjnych, uzyskanych połączeń (miesiące 12-48)**



## **C1. Harmonogram podzadań badawczych**

**15.5) Optymalizacja opracowanych technologii łączenia z uwzględnieniem uzyskanych wyników i wymagań eksploatacyjnych**  
**(miesiące 24-60)**

**15.6) Badanie mechanizmów powstawania i rozwoju uszkodzeń w łączonych elementach konstrukcji samolotowych (w tym delaminacji)**  
**(miesiące 9-60)**

**15.7) Sformułowanie równań konstytutywnych do analizowania połączeń dwu- lub wieloskładnikowych**  
**(miesiące 12-60)**

## **C1. Harmonogram podzadań badawczych**

**15.8) Modelowanie teoretyczne połączeń elementów kompozytowych wykonanych z różnych materiałów przy uwzględnieniu rozwoju uszkodzeń w różnych stanach obciążenia (miesiące 9-60)**

**15.9) Symulacja numeryczna obciążeń termo-mechanicznych układu hamulcowego wirnika nośnego śmigłowca (miesiące 24-60)**

**15.10) Badania odporności na pękanie połączeń kompozytów przy obciążeniach monotonicznych i cyklicznych, termicznych. Modelowanie teoretyczne zagadnienia (miesiące 12-60)**



## **C1. Harmonogram podzadań badawczych**

**15.11) Badanie jakości połączeń elementów konstrukcyjnych przy obciążeniach uderzeniowych (miesiące 24-60)**

**15.12) Zastosowanie metody Structure Health Monitoring do diagnozowania skuteczności połączenia przegród i w innych połączeniach oraz prawidłowego funkcjonowania połączeń różnego typu jako fragmentów struktur lotniczych (miesiące 5-57)**



## **D. Potencjał techniczny**

### **W skład Zakładu Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej wchodzi laboratoria:**

- \* Laboratorium spawania i cięcia gazowego
- \* Laboratorium spawania w osłonach gazowych MIG/MAG oraz TIG
- \* Laboratorium spawania i cięcia elektrycznego MMA i SAW, cięcie plazmowe
- \* Laboratorium zgrzewania mechanicznego: tarciove i zgniotowe
- \* Laboratorium zgrzewania elektrycznego: kondensatorowe i rezystancyjne
- \* Laboratorium kontroli jakości
- \* Laboratorium metaloznawstwa

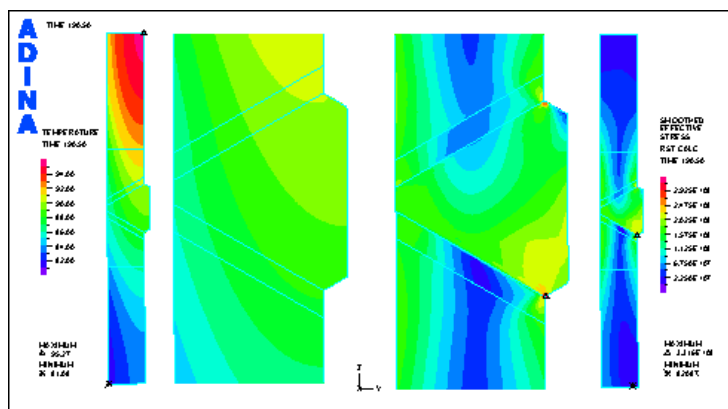
### **W ramach działalności usługowej Zakładu Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej oferujemy:**

- \* Regeneracja części maszyn metodą napawania i natryskiwania cieplnego
- \* Monitorowanie procesów spawalniczych
- \* Kontrolę jakości połączeń spawanych i zgrzewanych w laboratorium UDT w pełnym zakresie badań nieniszczących i niszczących
- \* Usługi spawania, zgrzewania i cięcia wieloma metodami metali i ich stopów
- \* Kursy spawania podstawowego i ponadpodstawowego (licencja INSTYTUTU SPAWALNICTWA w GLIWICACH)

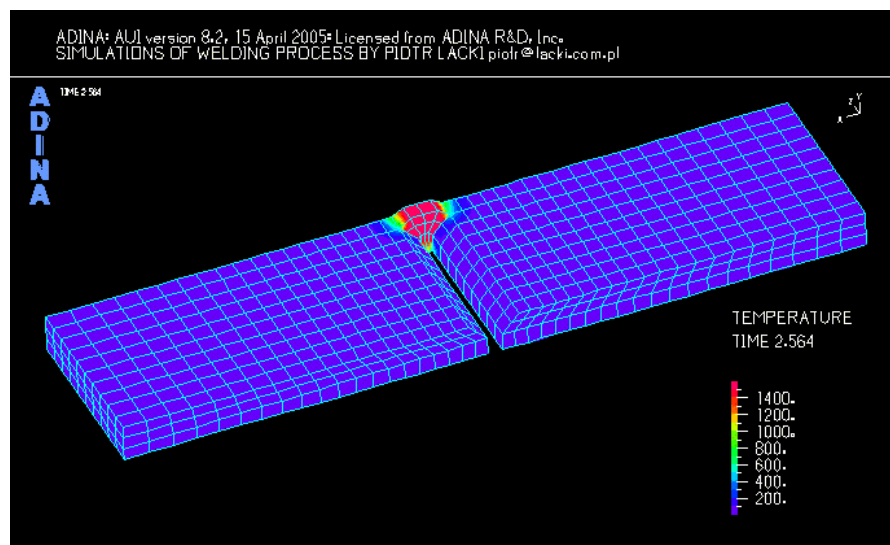
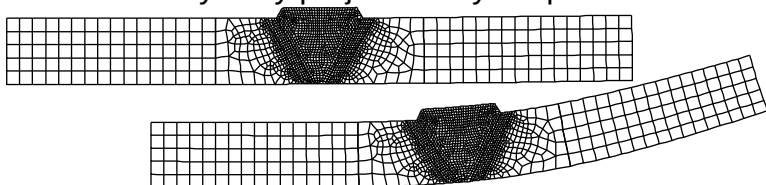
## D. Potencjał techniczny

### W ramach działalności usługowej Zakładu Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej oferujemy:

- \* Projektowanie, badanie i testowanie urządzeń spawalniczych
- \* Projektowanie konstrukcji spawanych, doradztwo i konsultacje w zakresie ich odbioru
- \* Optymalizację metod i warunków technologicznych spawania, zgrzewania, lutowania i cięcia termicznego



Przykłady projektowanych spoin\*



\*Lacki P., Wojsky K., Model rurowego hybrydowego złącza spawanego poddanego cyklicznym obciążeniom termomechanicznym. PROBLEMY BADAWCZE ENERGETYKI CIEPLNEJ . Mechanika z. 202 Wyd. PW 2003



## D. Potencjał techniczny

Zakład Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej w dniu 16.11.1998 otrzymał uznanie do prowadzenia **Laboratorium Kontroli Technicznej**, świadectwo uznania Nr rej. L-II-105/04. Na podstawie którego spełnia kryteria normy PN-EN 45001 oraz wymagań Warunków Technicznych Dozoru Technicznego DT-L/95.

Zakres uznania i rodzaj badania:

- \* badania radiograficzne rentgenowskie
- \* badania ultradźwiękowe złączy spawanych
- \* ultradźwiękowe pomiary grubości grubościomierzem
- \* badania magnetyczne proszkowe
- \* badania penetracyjne
- \* badania szczelności
- \* statyczna próba rozciągania złączy spawanych
- \* próba udarności złączy spawanych
- \* statyczna próba zginania złączy spawanych
- \* pomiary twardości sposobem Vickersa
- \* badania makroskopowe złączy spawanych
- \* badania mikroskopowe mikroskopami optycznymi
- \* badania długości i kąta
- \* badania geometrii spoin
- \* badania na podstawie ogłędzin zewnętrznych





## D. Potencjał techniczny

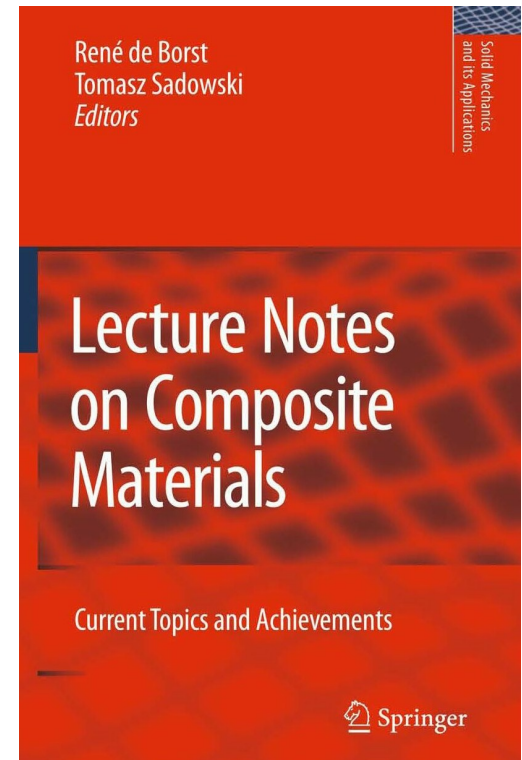
### Politechnika Lubelska

**Katedra Mechaniki Ciała Stałego,  
Katedra Mechaniki Stosowanej  
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji:**

- \* maszyna serwohydrauliczna MTS 100 kN
- \* system ARAMIS do pomiaru przemieszczeń próbek i elementów konstrukcyjnych
- \* mostek tensometryczny HOTTINGER
  
- \* komputery PC – system MES ABAQUS

Badania dla przemysłu:

- \* badania nowych materiałów kompozytowych w warunkach obciążeń cyklicznych z uwzględnieniem wpływu temperatur (dla potrzeb PZL Świdnik)





## D. Potencjał techniczny

### Politechnika Rzeszowska

- Katedra Przeróbki Plastycznej
  - Katedra Materiałoznawstwa
  - Katedra Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji
- \* prasy hydrauliczne
  - \* maszyny wytrzymałościowe
  - \* wibrator elektro-dynamiczny
  - \* goniometr





## **D. Potencjał techniczny**

### **Aparatura badawcza przewidziana do zakupu:**

- wieża uderowa (do 1000 J) z komorą temperatur
- maszyna wytrzymałościowa MTS 25kN z komorą temperatur i piecem termicznym
- wyposażenie systemu ARAMIS
- wzmacniacz pomiarowy z panelem do pomiaru siły i przemieszczenia
- eskstensometr wideo
- goniometr
- urządzenie CMT do spawania niskoenergetycznego

## E. Potencjał kadrowy

### Zespół badawczy [Politechniki Częstochowskiej](#):

prof. dr hab. inż. Zygmunt Nitkiewicz  
dr inż. Janina Adamus  
dr inż. Piotr Lacki  
dr inż. Kwiryn Wojsyk  
dr inż. Krzysztof Kudła

### Zespół badawczy [Politechniki Lubelskiej](#):

dr hab. inż. Tomasz Sadowski, prof. PL  
prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski  
dr hab. inż. Jerzy Warmiński, prof. PL  
dr inż. Jerzy Podgórski  
dr inż. Jarosław Bęc  
dr inż. Ewa Zarzeka-Raczkowska  
mgr inż. Przemysław Golewski  
mgr inż. Tomasz Nowicki  
mgr inż. Katarzyna Osina  
mgr inż. Marcin Kneć

### Zespół badawczy [Politechniki Rzeszowskiej](#):

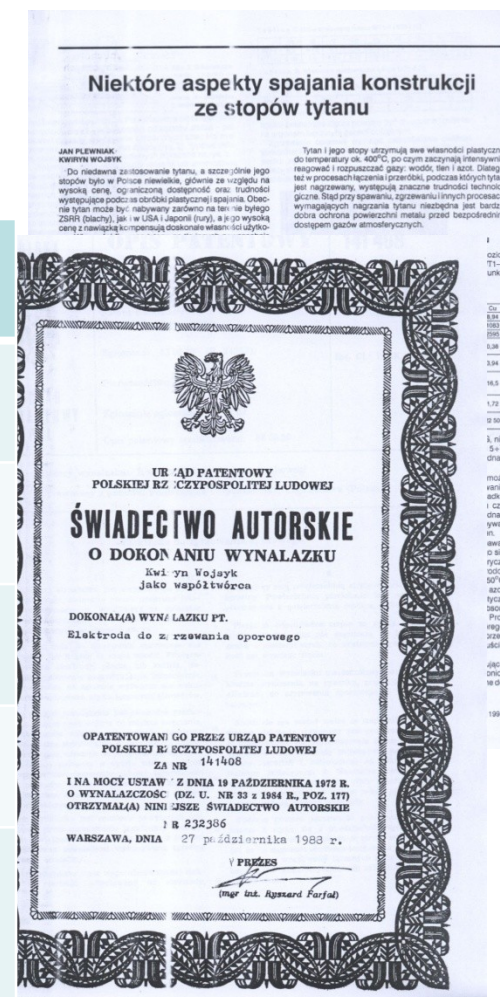
dr hab. inż. Jarosław Sęp, prof. PRz  
dr inż. Ryszard Perłowski  
dr inż. Władysław Zielecki  
mgr inż. Artur Wójcik  
inż. Sławomir Prucnal  
dr inż. Tadeusz Balawender  
mgr Jan Banaś  
dr Wojciech Bieniasz  
dr inż. Tomasz Trzepieciński

### Zespół badawczy [Instytutu Maszyn Przepływowych PAN - Gdańsk](#)

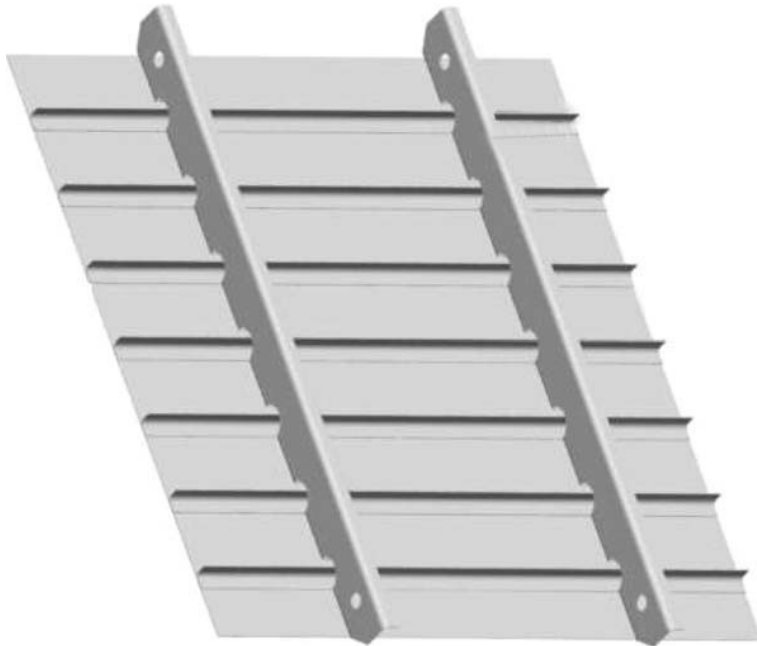
prof. dr hab. inż. Piotr Doerffer  
prof. dr hab. inż. Wiesław Ostachowicz

## F. Środki realizacji celów projektu

Lp	Wskaźnik	Rok	Wartość wskaźnika
1	Liczba skomercjalizowanych wyników badań B+R	2013	2
2	Liczba utworzonych nowych etatów badawczych	2013	1
3	Liczba zgłoszeń patentowych jako realizacji przedsięwzięcia	2013	4
4	Liczba publikacji powstałych w efekcie realizacji projektu	2013	30
5	Liczba stopni naukowych uzyskanych w związku z realizowanym projektem	2013	Mgr(8) Dr(3) Hab.(1)



## G. Przykłady zastosowań technologii łączenia elementów konstrukcji



Lotniczy panel strukturalny

możliwości wykonania:

- a) nitowanie
- b) spawanie laserowe

c) **spawanie niskoenergetyczne**  
**zalety metody:**

- Niskie koszty, niewielkie wymiary, mobilność urządzenia
- Znaczna sprawność = ekonomiczne koszty eksploatacji
- Łatwość aplikacji zarówno w produkcji półautomatycznej jak i automatycznej zrobotyzowanej
- Możliwość łatwej zmiany parametrów technologicznych spawania
- Możliwość wykonywania złączy w warunkach trudnej dostępności



## H. Uaktualniony program badawczy

**15.1) Analiza możliwości i wybór konkretnych systemów łączenia materiałów w konstrukcjach lotniczych, uwzględniających konstrukcję złączy i warunki ich eksploatacji (miesiące 1-9): PRz, PL, PCz**

**15.2 ) Analiza stanu naprężeń własnych w proponowanych modelach połączeń (miesiące 1-18): PRz, PL, PCz**

**15.3) Dobór odpowiedniej techniki łączenia dla konkretnych materiałów (np. metal-metal, metal-kompozyt polimerowy , kompozyt – kompozyt jednakowych i różnych rodzajów) łączonych w konstrukcjach lotniczych (miesiące 9-48): PRz, PL, PCz**



## **H. Uaktualniony program badawczy**

### **15.3A.:Zgrzewanie :**

**zgrzewanie dyfuzyjne, tarciove: PCz**

### **15.3 B. Spawanie : PCz**

**i IMP PAN** (spawanie materiałów termoplastycznych  
z wkładem oporowym)

### **15.3 C. Lutowanie twarde : PCz**

### **15.3 D. Klejenie : PRz i PL**

### **15.3 E. Nitowanie : PRz i PL**

### **15.3 F. Śrubowe: PRz i PL**

### **15.3 F. Połączenia kombinowane : PRz i PL**

**15.4) Badania właściwości fizycznych, mechanicznych, cieplnych,  
odporności na korozję, ścieranie oraz żywotności w określonych  
warunkach eksploatacyjnych, uzyskanych połączeń (miesiące 12-48)**

**: PRz, PL, PCz**

## **H. Uaktualniony program badawczy**

**15.5) Optymalizacja opracowanych technologii łączenia z uwzględnieniem uzyskanych wyników i wymagań eksploatacyjnych (miesiące 24-60) ): PRz, PL, PCz**

**15.6) Badanie mechanizmów powstawania i rozwoju uszkodzeń w łączonych elementach konstrukcji samolotowych (w tym delaminacji) (miesiące 9-60) ): PL**

**15.7) Sformułowanie równań konstytutywnych do analizowania połączeń dwu- lub wieloskładnikowych (miesiące 12-60): PL**



## **H. Uaktualniony program badawczy**

**15.8) Modelowanie teoretyczne połączeń elementów kompozytowych wykonanych z różnych materiałów przy uwzględnieniu rozwoju uszkodzeń w różnych stanach obciążenia (miesiące 9-60): PL**

**15.9) Symulacja numeryczna obciążeń termo-mechanicznych układu hamulcowego wirnika nośnego śmigłowca (miesiące 24-60) : PCz**

**15.10) Badania odporności na pękanie połączeń kompozytów przy obciążeniach monotonicznych i cyklicznych, termicznych. Modelowanie teoretyczne zagadnienia (miesiące 12-60) ): PL**





## **C1. Harmonogram podzadań badawczych**

**15.11) Badanie jakości połączeń elementów konstrukcyjnych przy obciążeniach uderzeniowych (miesiące 24-60) : PL**

**15.12) Zastosowanie metody Structure Health Monitoring do diagnozowania skuteczności połączenia przegród i w innych połączeniach oraz prawidłowego funkcjonowania połączeń różnego typu jako fragmentów struktur lotniczych (miesiące 5-57)**

**IMP PAN**



## **H1. Współpraca z innymi ZB**

- ZB - 6 klejenie kompozytów polimerowych
- ZB - 7 spawanie stopów magnezu
- ZB -14 monitorowanie połączeń konstrukcyjnych



## **H2. Współpraca z przedstawicielami sektora przemysłu lotniczego**

**WSK Rzeszów**

**PZL Świdnik**

**PZL Mielec**

**Pratt&Whitney Kalisz**

## Lider Merytoryczny:

Dr hab. inż. Tomasz Sadowski

Adres: ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

Tel: (0-81) 524-10-04, (0-81) 538-11-97

Fax: (0-81) 524-10-04

E-mail: [t.sadowski@pollub.pl](mailto:t.sadowski@pollub.pl)