



# NK315 EKSPLOATACJA STATKÓW LATAJĄCYCH

## Procesy degradacyjne i destrukcyjne

dr inż. Kamila Kustroń

dr inż. Kamila Kustroń

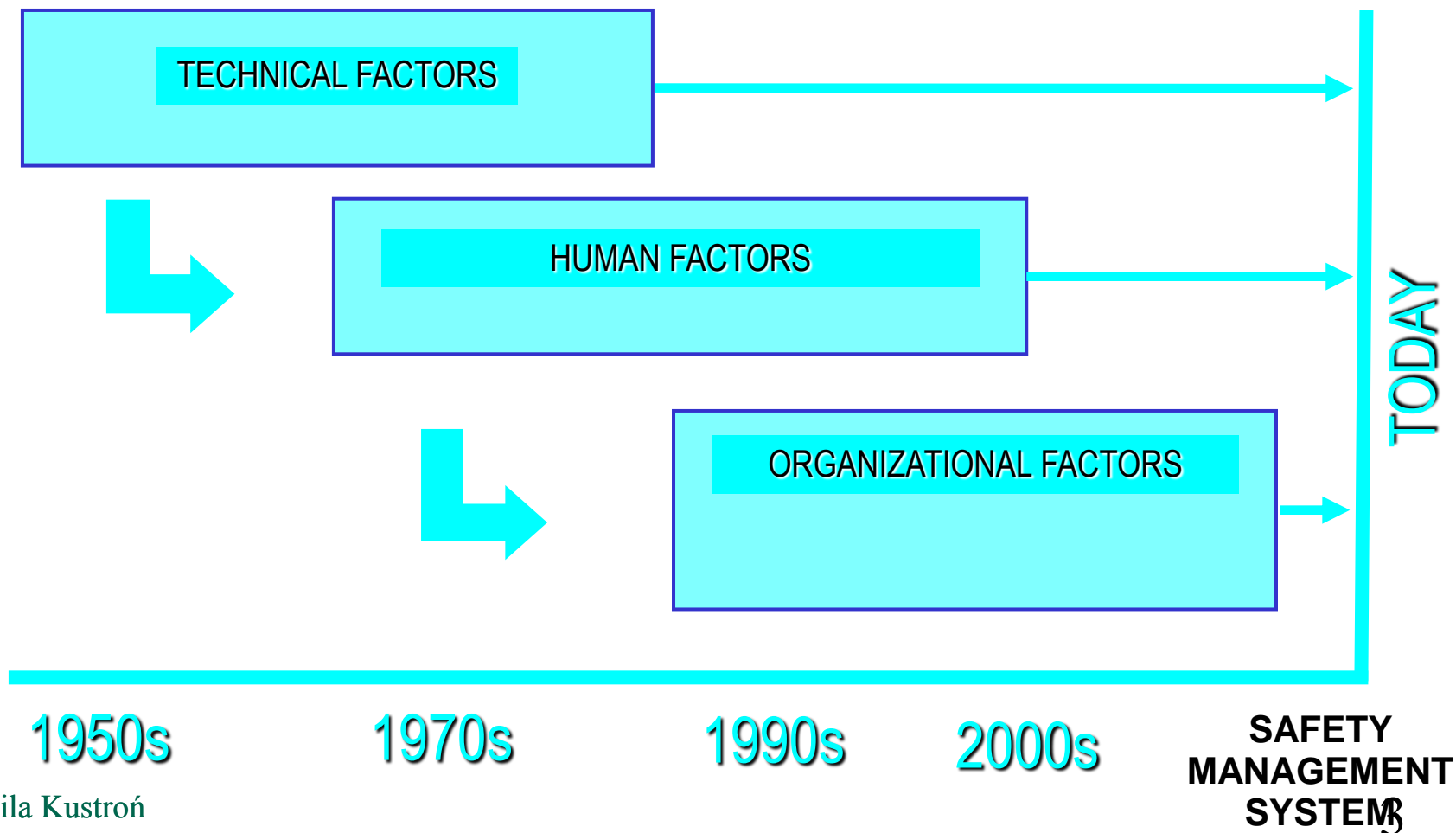
1



# Schemat analizy przyczynowo-skutkowej procesu degradacji



# The evolution of safety thinking



dr inż. Kamila Kustroń

# Mody uszkodzeń materiałów lotniczych

Questions to answer in this module...

How can aircraft structural materials fail?

What are the materials used for aircraft structures?

How might materials failure affect aircraft?

What do these failure modes look like?

What are the root causes of these failures?

# Failure Modes of Aero Materials

- Questions to answer in this module...
  - How can aircraft structural materials fail?
    - What are the materials used for aircraft structures?
    - How might materials failure affect aircraft?
    - What do these failure modes look like?
    - What are the root causes of these failures?

# What types of materials are used in aircraft structures?

- Metals
  - Aluminum
  - Steel/Stainless Steel
  - Titanium
  - Magnesium
  - Superalloys
- Ceramics
- Plastics/Elastomers
- Composites

## What causes failure?

In general, failures occur when a component or structure is no longer able to withstand the stresses imposed on it during operation commonly, failures are associated with stress concentrations, which can occur for several

- reasons including:
- design errors, e.g. the presence of holes, notches, and tight fillet radii
  - the microstructure of the material may contain voids, inclusions etc.
  - corrosive attack of the material, e.g. pitting, can also generate a local stress concentration

## Damage: The Reason for Maintenance

Machines and Structures → Life Cycle Costs → Maintenance; → Damage  
Maintenance  
Strategies  
Predictive;  
Maintenance  
Organisation

**Lecture overview:** discuss damage taxonomy, sources of damage in manufacturing process and service-induced, typical failure modes, damages in aviation metal and composite materials

All materials contain defects at a nano/microstructural level



## Damage progression hierarchy:

Defects → Damage → Fault

**Defect:** Inherent in the material. Structure can operate at its design condition if the constituent materials contain defects.

**Damage:** When the structure is no longer operating in its ideal condition but can still function satisfactorily (sub-optimal).

**Fault:** Structure can no longer operate satisfactorily. Unacceptable reduction in quality.

# Uszkodzenia techniczne statków powietrznych

# Podział błędów powodujących uszkodzenia techniczne SP:

- Ze względu na etap życia statku powietrznego:
  - błędy konstrukcyjno - produkcyjne
  - błędy technologiczne i wykonania
  - błędy popełnione podczas eksploatacji
  - brak profilaktyki (NDT, SHM)
  
- Ze względu na charakter dominującego procesu zużyciowego:
  - zmęczenie
  - korozja
  - tribologia
  - delaminacje
  - itp..

# Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

1. Zły projekt, konstrukcja – są to uszkodzenia wynikające błędów popełnionych na etapie projektowania:
  - niepewności lub nie uznania wpływu przez konstruktorów obliczeń i badań konstrukcji
  - użycia niewłaściwego materiału
  - zalecenia złej obróbki cieplnej lub skrawającej
  - brak Myślenia Eksploatacyjnego przy konstruowaniu

# Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

## 1. Zły projekt, konstrukcja – przykład

IŁ-62M Tadeusz Kościuszko SP -LBG

### *Przyczyny:*

- *wady konstrukcyjne pośredniej podpory tego wału silnika D-30KU*
- *niewłaściwe doprowadzenie oleju do łożyska tej podpory poprzez otwory w wewnętrznej bieźni łożyska*

### *Konsekwencje:*

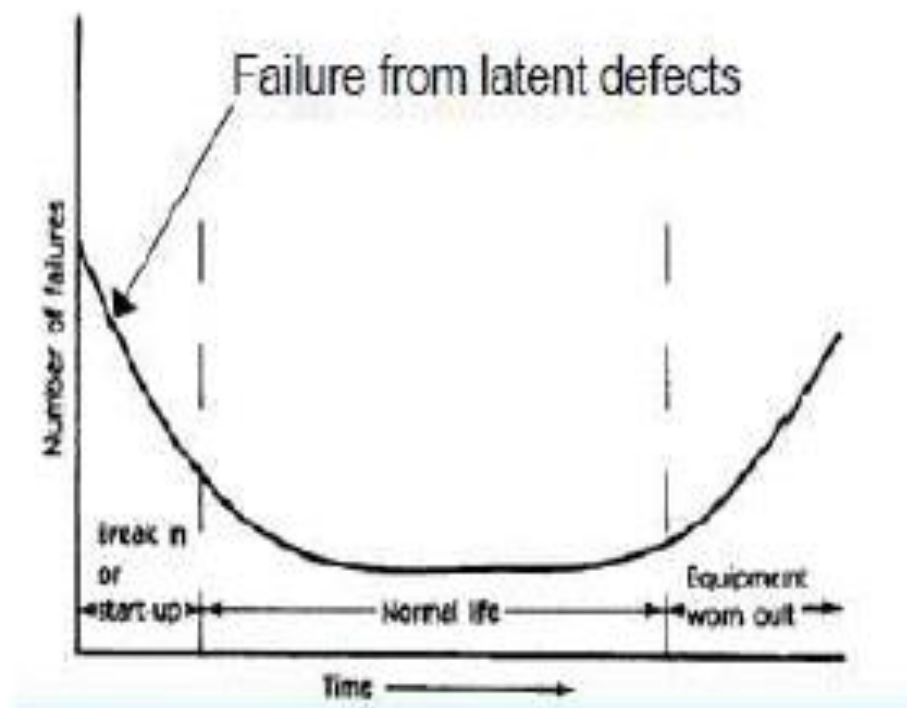
- *na krawędzi otworów następowało zmęczeniowe łuszczenie się bieźni, co doprowadziło do ich niszczenia, a także niszczenia wałeczków łożyska*
- *powstania luzu na łożysku powodującego nadmierne bicie wału. W wyniku bicia wał niskiego ciśnienia tarł o elementy wału wysokiego ciśnienia*
- *nastąpiło ukłucie wału turbiny niskiego ciśnienia*

## Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

2. Niewłaściwe wytwarzanie, technologia wykonania – są to błędy popełnione przez producentów materiałów i wyrobów którzy to mają trudności z utrzymaniem jakości produktów:

- **zła struktura materiału** – element konstrukcyjny może mieć różnego rodzaju wtrącenia, nieciągłości.
- **zła technologia wykonania elementu** – błędy popełnione na tym etapie wynikają z zaniedbania procesu obróbki maszynowej (złe podcięcia, zbyt duża chropowatość, złe wykończenie obróbką cieplną i skrawającą)
- **użycie niewłaściwego materiału**

Manufacturing damage can occur during material processing, machining and assembly





## Manufacturing Damage

### Material flaws include:

1. Porosity
2. Inclusions
3. Forging or casting defects
4. Improper thermal/mechanical treatment of basic alloy

### Machining problems include:

1. Gouges and tears
2. Rough surfaces
3. Burrs and scratches at fastener holes
4. Other local material trauma caused by improper tool usage

### Assembly problems include:

1. "Nicks and dings" from rough handling
2. Improper welds
3. Permanent deformation or cracking from force fits
4. Missing or damaged sub-components

Machining and assembly problems are often accompanied by harmful residual stresses



# Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

## 2. Niewłaściwe wytwarzanie, technologia wykonania – przykład

### Katastrofa Samolotu IŁ-62M Kopernik

#### *Przyczyny:*

- *wadliwie opracowana technologia wykonywania wału*
- *błąd ten nie został wykryty (a powinien) przez wewnętrzną kontrolę międzyoperacyjną.*

#### *Konsekwencje:*

- *pęknięcie wału*
- *fragmentacja tarczy turbiny wywołana rozkręceniem turbiny ponad dopuszczalną wartość prędkości obrotowej*
- *przecięcie popychaczy sterów wysokości i kierunku*
- *uszkodzenie trzech silników fragmentami jednej z tarcz turbiny silnika nr 2*

## Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

3. Niewłaściwa Eksploatacja – Błędy popełnione w ciągu użytkowania statku powietrznego. Brak Myślenia Eksploatacyjnego w trakcie wykonywania założonych czynności co wiąże się z niemożliwością oceny skutków swojego postępowania.

Przykłady:

- niewykonanie przez obsługę powierzonych im kompleksowych zadań
- niewykonanie lub niechlujne wykonywanie przeglądów i remontów
- nieprawidłowy montaż podzespołów
- niedostateczne umiejętności przy wykonywaniu czynności obowiązkowych

# Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

## 3. Niewłaściwa Eksploatacja – przykład

Samolot B737 –200 linii Aloha Airlines.

### *Przyczyny:*

- błąd w czasie wykonywania obsługi naziemnej był przyczyną niewykrycia pęknięcia zmęczeniowego konstrukcji kadłuba

### *Konsekwencje:*

- podczas lotu na trasie Hilo – Honolulu na wysokości 24000 stóp nastąpiło zerwanie górnej części kadłuba co było konsekwencją dekompresji kabin pasażerskiej i pilotów.

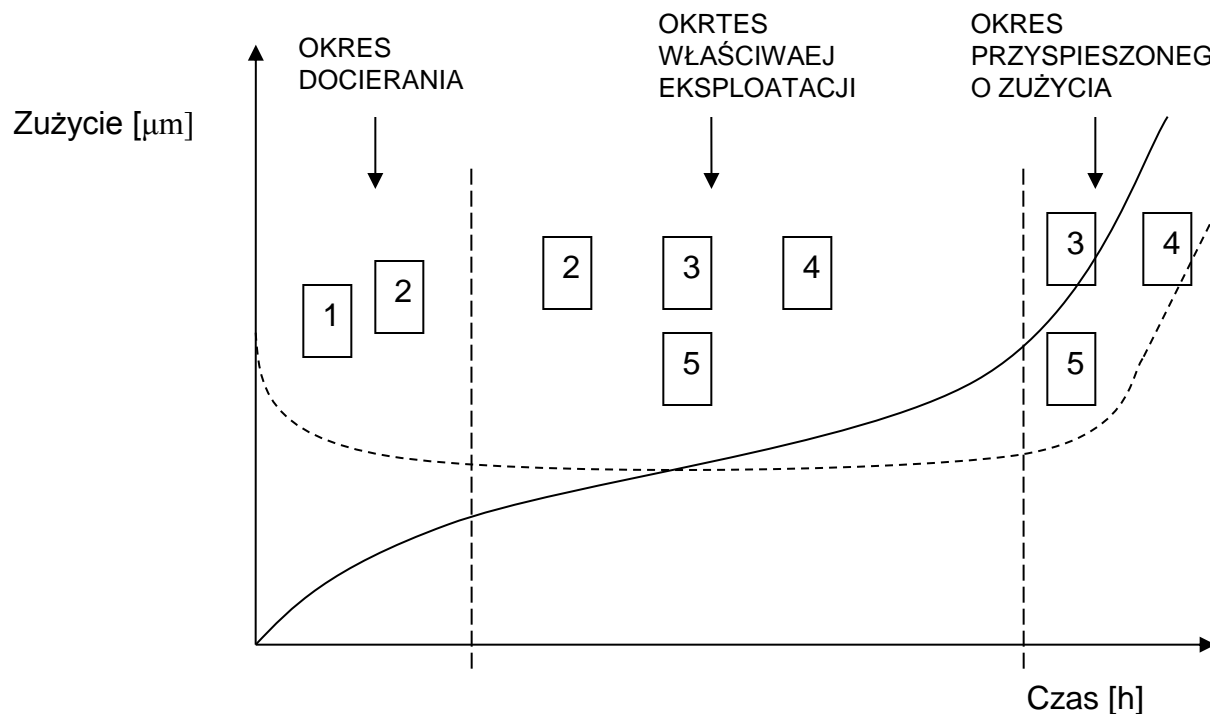
## Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

4. Wpływ Tribologii - szereg zjawisk zachodzących między powierzchniami trącymi elementów maszyn i urządzeń; uwzględnia zagadnienia:

- Tarcia
- Zużycia - proces zmian w warstwie wierzchniej ciała stałego, charakteryzujący się ubytkiem masy lub trwałym odkształceniem powierzchni

# Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

Krzywa zużycia:



Rodzaje zużycia:

- 1 -- adhezyjne
- 2 -- ściernie
- 3 -- korozyjne
- 4 -- erozyjne
- 5 -- zmęczeniowe

## Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

5. Niewłaściwe Smarowanie - Smarowanie działa na zasadzie wniknięcia w szczelinę pomiędzy tymi powierzchniami i utworzenia tam warstwy poślizgowej poprzez całkowite „odseparowanie” od siebie tych powierzchni. Olej także powoduje zmniejszenie tarcia i oddaje ciepło na zewnątrz. Brak smarowania wpływa negatywnie na elementy cierne powodując ich zatarcie u uszkodzenie (wszelkiego rodzaju łożyska, przekładnie)

Przykład: IŁ-62M Tadeusz Kościuszko SP-LBG

*- niewłaściwe doprowadzenie oleju do łożyska tej podpory poprzez otwory w wewnętrznej bieżni łożyska*

*Konsekwencje:*

*- na krawędzi otworów następowało zmęczeniowe łuszczenie się bieżni, co doprowadziło do ich niszczenia, a także niszczenia wałeczków łożyska*

22

## Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

6. Występowanie Korozji - stopniowe niszczenie powierzchni metalowych i niemetalowych pod wpływem chemicznego (woda, tlen) i elektrochemicznego oddziaływania środowiska w wyniku którego zmieniają się stan i właściwości niszczonego materiału. W przypadku metali rozróżnia się korozję chemiczną i elektrochemiczną.

Elementy które uległy korozji tracą swoje właściwości tj:

- mają mniejszą wytrzymałość
- elementy cierne i toczne tracą gładkość powierzchni
- łuszczące się elementy mogą prowadzić do uszkodzenia bieżni, a także niszczenia wałeczków i kulek łożysk



## Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

7. Zmęczenie – elementy konstrukcji mechanicznych są poddawane złożonym stanom naprężeń, zmiennych w czasie. Zmienne naprężenia wywołują w materiale złożony splot zjawisk i zmian zależnych od wartości tych naprężeń i liczby cykli. Takie zjawiska i zmiany nazywamy zmęczeniowymi, które sukcesywnie się rozwijając prowadzą do zniszczenia materiału. W takim wypadku mówimy o zmęczeniu materiału.



# Charakterystyka przyczyn uszkodzeń SP:

## 7. Zmęczenie – przykład

Samolot B-747 linii JAL

*Przyczyny:*

- *wadliwa technologia remontu tylnej części kadłuba po jej niedużym uszkodzeniu eksploatacyjnym*
- *błąd w remoncie polegający na zastosowaniu pojedynczego nitowania zamiast podwójnego oraz dzielonych elementów wspomnianej komory ciśnieniowej*

*Konsekwencje:*

- *po kilkunastu minutach lotu pilot odczuł trudności w sterowaniu samolotem*
- *stwierdzono że, odleciał ster kierunku i praktycznie pilot nie mógł sterować samolotem*
- *sterując silnikami, utrzymano samolot w locie około 20 minut*
- *ster odpadł w wyniku rozerwania się tylnej przegrody kabiny ciśnieniowej*

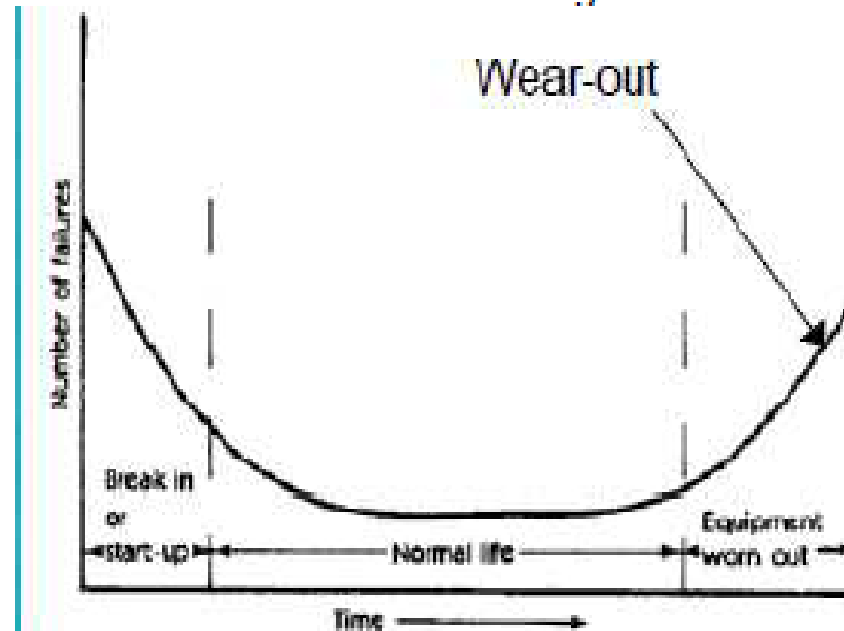
# Profilaktyka - zapobieganie uszkodzeniom SP:

## Profilaktyka powinna obejmować:

- działanie i środki stosowane w celu zapobiegania wypadkom, nie dopuszczające do uszkodzeń, katastrof
- zbieranie: informacji o negatywnych zdarzeniach organizacyjnych, przekroczeniu ograniczeń instrukcyjnych i eksploatacyjnych w czasie realizacji lotów w celu wypracowania wniosków do profilaktyki przed następnymi lotami
- w celu przeciwdziałania niepożądanym zjawiskom tworzymy wcześniej podstawy tego działania takie jak: metody, procedury i narzędzia, jakie zamierza się stosować w celu osiągnięcia sukcesu
- wykonywanie wszelkiego rodzaju badań (np. NDT, SHM) mających na celu wcześniejsze wykrycie zagrożeń wynikających z ewentualnych awarii

## Service-Induced Damage

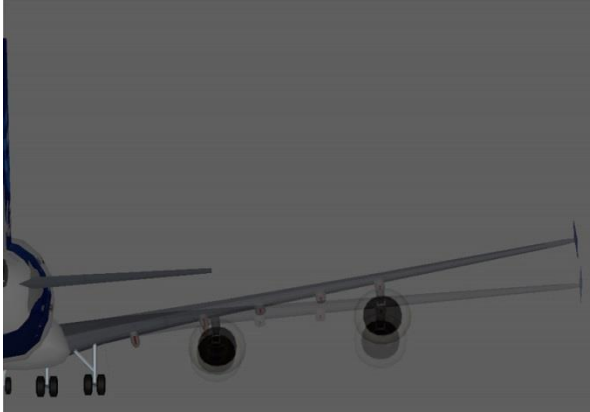
After initial “shakedown” failures caused by manufacturing defects, failure rate typically decreases for a period until service-induced damage becomes life-limiting feature.



## Service-induced damage includes:

- Plastic Deformation/ Yielding
- Fatigue
- Abrasion/ Wear
- Corrosion
- Thermal Shock
- Fracture
- Melting
- Impact
- Buckling
- Creep
- Odkształcenia plastyczne
- Zmęczenie
- Ścieranie / zużycie
- Korozja
- Szok termiczny
- Pęknięcie
- Topienie
- Uderzenia
- Wyboczenie
- Pełzanie

## Failure Modes- Yielding



Airbus A380 Wing Deflection Simulation

## Failure Modes- Fatigue



De Havilland Comet with square windows

## Failure Modes- Corrosion



Aloha Airlines Flight 243

## Failure Modes- Abrasion/ Wear



Alaska Airlines Flight 261  
Horizontal Stabilizer Jackscrew

31 stycznia 2000  
McDonnell Douglas MD-83  
należący do Alaska Airlines,  
lejący z Puerto Vallarta  
do Seattle z międzylądowaniem  
w San Francisco



## Failure Modes- Thermal Shock



Internal  
Combustion  
Engine  
Spark Plug

## Failure Modes- Fracture



American Airlines Flight 587 Vertical Stabilizer

## Failure Modes- Melting



Internal Combustion Engine Piston

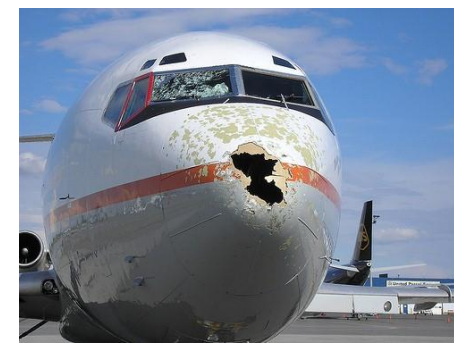
dr inż. Kamila Kustroń

## Failure Modes- Impact

BIRD STRIKE



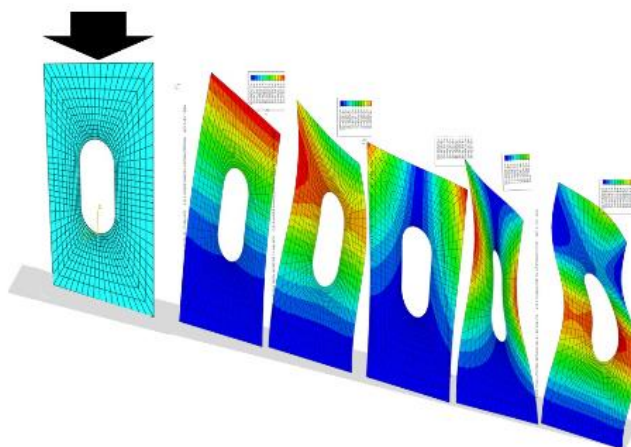
HAIL IMPACT



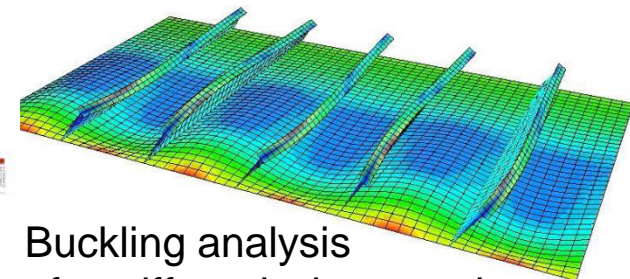
## Failure Modes- Buckling



A Large Test Cylinder  
Under Compressive Load

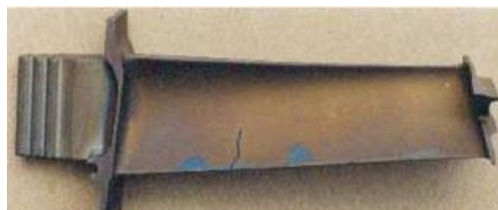


Buckling analysis of a [0/+45]<sub>2s</sub> laminate plate with an oblong hole.



Buckling analysis  
of a stiffened wing panel

## Failure Modes- Creep



The turbine blade cracked due to creep (creep is deformation of a material subjected to tensile stresses at high temperature)



Southwest Airlines Fan Disk Failure

## Root Causes of Materials Failures

- Misuse, mishandling
  - Damaged during handling, storage, use. Stressing parts by using them outside their designed envelope
- Assembly errors
  - Incorrect torque
  - Incorrect sequence
  - Omitting or adding unspecified components
- Processing/ manufacturing errors
  - Improper heat treating
  - Incorrect surface finish
  - Processing could affect the strength and corrosion resistance
- Improper material choice
- Non-optimized geometry design
  - The part is the wrong shape, stress risers are created
- .....

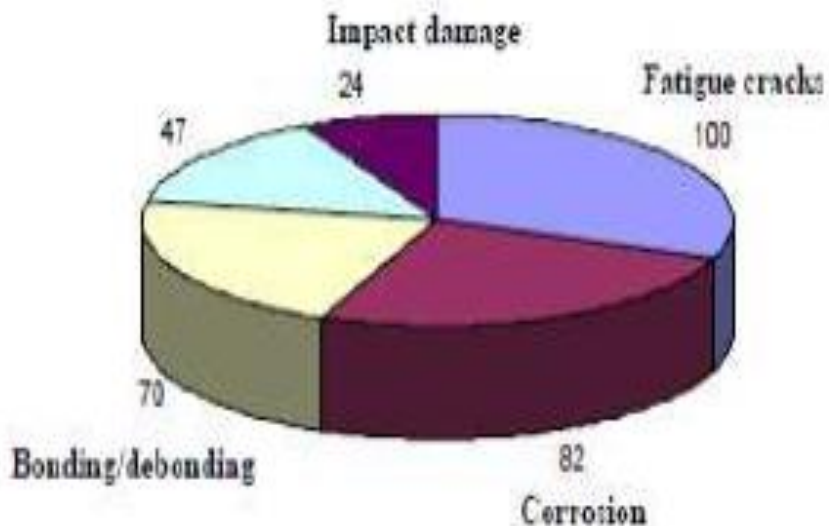


## ..... Root Causes of Materials Failures

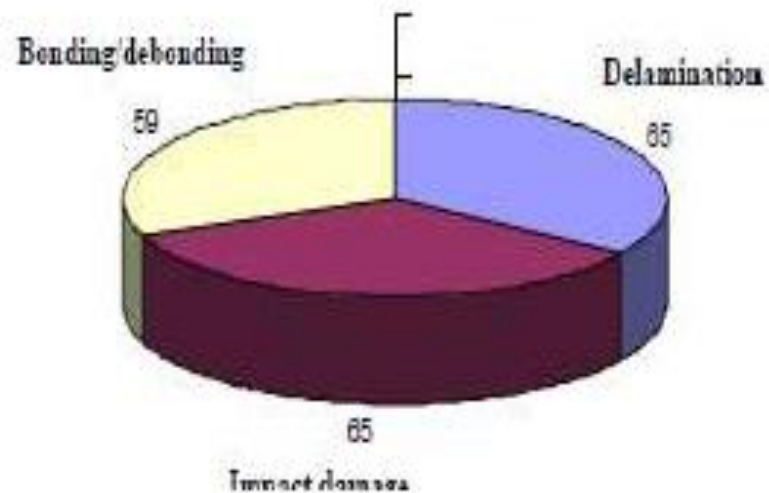
- Improper maintenance
  - Aircraft components must be cared for and have a finite life
  - Fatigue is one of the largest concerns, parts must be replaced after a calculated safe period of use, other parts must be routinely inspected for cracks
- Unforeseen operation conditions
  - Changing the mission or environment of the aircraft and its components, modifications
  - The materials were properly chosen and designed for, but the aircrafts use changes
- Inadequate quality control
  - We need to control the quality of the materials. There must be controlled environments for creating, storing, shipping, tracking, and ultimately using the parts.
  - Documentation must accompany these parts and materials every step of the way.
- Inadequate environment control
  - Improper paint, coatings, corrosion prevention maintenance

## Damage in Aircraft Structures

Damage Detection - Metallic Structures



Damage Detection - Composite Structures



## Aircraft Materials Failure Modes

- Fatigue 55%
- Corrosion 16%
- Overload 14%
- Stress Corrosion Cracking 7%
- Wear/ Abrasion 6%
- High Temperature Corrosion 2%

From records and case histories data, an assessment can be made of the frequency of failure modes

# Frequency of failure mechanisms

	Percentage of Failures	
	Engineering Components	Aircraft Components
Corrosion	29	16
Fatigue	25	55
Brittle fracture	16	-
Overload	11	14
High temperature corrosion	7	2
SCC/Corrosion fatigue/HE	6	7
Creep	3	-
Wear/abrasion/erosion	3	6

dr inż

6

## Composite Material Damage

Impact damage: Battle damage; Maintenance tool drop; Runway debris; Bird strike

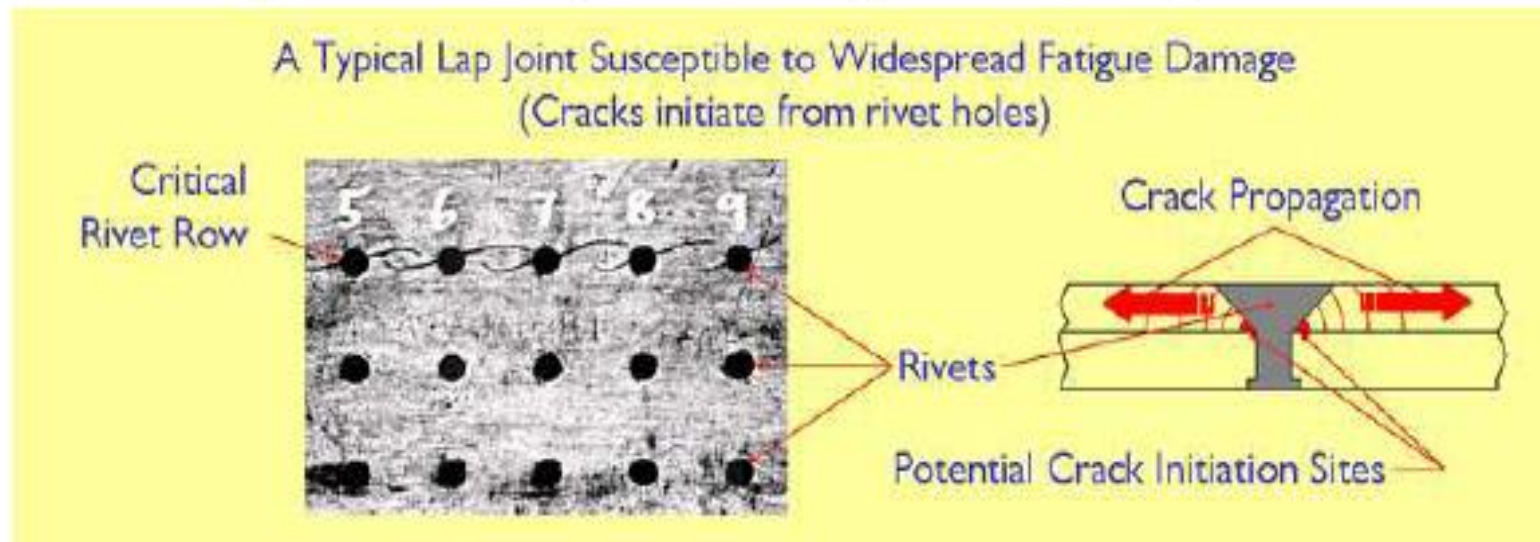
Principal damage mechanisms: Matrix cracking; Fibre fracture; Debonding; Delamination

Major concern is growth of undetected, hidden damage caused by low velocity impacts and fatigue.

Known in aerospace applications as **Barely Visible Impact Damage (BVID)**. Failure to detect BVID may result in a catastrophe



The two sources of WFD are **multiple-site damage (MSD)**, characterized by the simultaneous presence of fatigue cracks in the same structural element; and **multiple-element damage (MED)**, characterized by the simultaneous presence of fatigue cracks in similar adjacent structural elements. The figure on the next slide demonstrates typical locations susceptible to MSD



**Why is WFD Important:** Boeing World Jet Airplane Inventory of 1993 shows that more than one quarter of wide-body aircraft and one third of narrow-body aircraft are over 20 years old, thus could be considered as "aging aircraft"

30

