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 14

Materiały inteligentne - oraz bazujące na nich systemy zespolone (ang. smart embedded systems) do zastosowania w lotnictwie
Smart embedded systems based on intelligent materials

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Lotnictwa w Warszawie, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska

Wyniki badań
Results

Eksperymentalne badania postaci utraty stateczności kompozytowych płyt przekładkowych

Experimental investigations of problems involved with stability and post-buckling states in sandwich structures

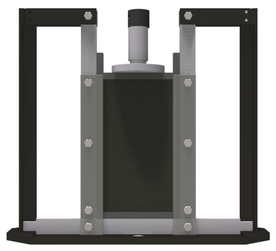
Przeznaczenie struktury na elementy pokrycia skorupowego zintegrowanych konstrukcji lotniczych.
Założenia:
Określenie kryteriów doboru geometrii oraz właściwości mechanicznych struktury przekładkowej ze uwzględnieniem zależności między masą konstrukcji, a obciążeniem krytycznym.

Przeprowadzony eksperyment miał na celu zbadanie zachowania się ortotropowych płyt przekładkowych poddanych jednokierunkowemu ściskaniu. Szczególną uwagę zwrócono na zachowanie się struktury w warunkach obciążeń krytycznych i zakrytycznych. Próby przeprowadzono w warunkach obciążeń quasistatycznych, rejestrując w czasie rzeczywistym zmiany obciążenia, jak i deformację wzdłużną i poprzeczną płyty.

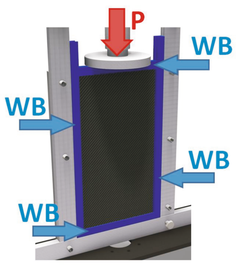
Układ obciążający
W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano i wykonano specjalny układ obciążający umożliwiający zamocowanie badanego elementu w przestrzeni pomiarowej uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Zwick-Roell (rys.1).

Rys.1 Model CAD stanowiska do ściskania badanej płyty zamocowanego w maszynie wytrzymałościowej
Fig.1 CAD model of the test stand for compression of plate

Stanowisko składało się ze sztywnej ramy otwartej, w której mocowano badane elementy(rys.2).

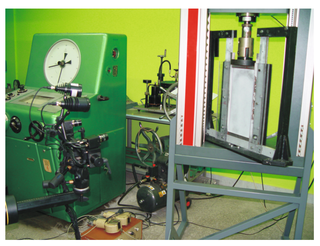


Rys.2 Model CAD stanowiska do ściskania badanej płyty
Fig.2 CAD model of the test stand for compression of plate



Rys.3 Schemat obciążenia i zamocowania badanej płyty
Fig. 3 Scheme of loading and boundary conditions of tested plate

Próbki pozycjonowano w ramie poprzez zamocowanie w pryzmach z kanałkiem (korytkach), symulujących odpowiednie warunki brzegowe. Siłę ściskającą wywoływano penetratorem maszyny wytrzymałościowej, który oddziaływał na badany element poprzez górne korytko (rys.3). Czujnik siły posiadał zakres 50[kN]. Odbieranie odpowiednich stopni swobody, wynikające z przyjmowanych warunków brzegowych zapewniano doborem sztywności medium mocującego krawędź próbki w korytku. W trakcie badań stosowano warunki brzegowe - przegub sprężysty – guma silikonowa Polastosil® M-2000, której sztywność przy uzyskiwanych poziomach obciążenia umożliwiała swobodny obrót krawędzi względem ich osi, natomiast blokowała wszystkie pozostałe składowe przemieszczenia.



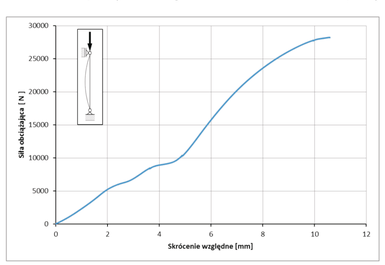
Deformację płyty rejestrowano w czasie rzeczywistym za pomocą metody trójwymiarowej cyfrowej korelacji obrazu. Stanowisko prezentuje rysunek 4.

Rys.4 Optyczny układ pomiaru deformacji (system ARAMIS)
Fig.4 Optical deformation measurement system (ARAMIS system)

Obciążenia krytyczne i zniszczenie
Poziom obciążeń, przy których następuje zniszczenie ustroju, determinuje jego nośność graniczną. Wiąże się to zazwyczaj z trwałą deformacją lub destrukcją uniemożliwiającą dalszą eksploatację. W strukturach lotniczych niebagatelnym czynnikiem jest niebezpieczeństwo zaistnienia szybkiej utraty stateczności przed przekroczeniem wytrzymałości konstrukcji. W klasycznych rozwiązaniach cienkościennych dopuszcza się takie stany w lokalnych obszarach, gdyż nie rzutuje to znacząco na eksploatację obiektu. Jednak w odniesieniu do struktur przekładkowych zjawisko posiada zupełnie odmienny charakter.

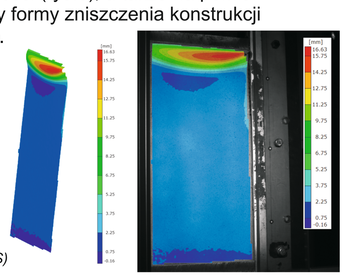
- Lokalna utrata stateczności charakteryzowana przez *wrinkling* symetryczny ma swoje początki już przy $\frac{P}{P_{kr}} \approx 0.1 \div 0.25$.
  Nie zmienia ona jednak w sposób zasadniczy sztywności ustroju aż do. $\frac{P}{P_{kr}} \approx 0.5$
- Postać globalnej utraty stateczności jest osiągana jako wynik imperfekcji, która inicjuje pojawienie się dużych deformacji ustroju, czego przejawem jest nieliniowy charakter wykresu.
- Zniszczenie elementów badanych w trakcie badań doświadczalnych następowało zawsze przy tej wartości obciążenia, przy której element najpierw tracił stateczność, a następnie pogłębiał deformację.

Na poniższym wykresie (Rys.5) przedstawiono przebieg charakterystyki siła obciążająca – skrócenie, uzyskanej w czasie badań eksperymentalnych.

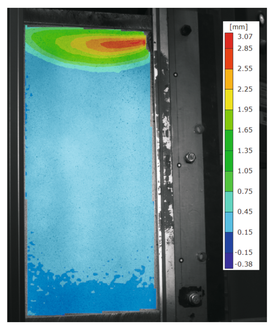


Rys.5 Ścieżka równowagi zarejestrowana w czasie badań
Fig.5 Equilibrium path registered during research

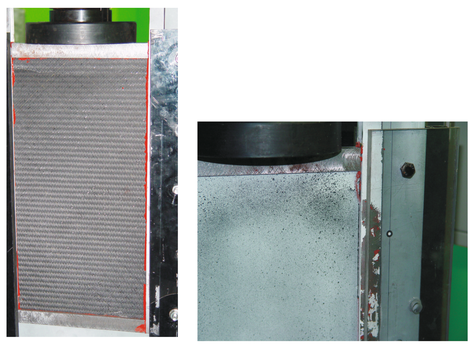
Zastosowana metoda optycznej rejestracji pozwoliła na zaobserwowanie postępującej deformacji wynikającej z globalnej utraty stateczności (rys.6), a także na pomiar ilościowy formy zniszczenia konstrukcji (rys.7,8).



Rys.6 Maksymalne ugięcie płyt (ARAMIS)
Fig. 6 The maximum deflection of plate (ARAMIS)



Rys.7 Trwała deformacja płyty po zniszczeniu (ARAMIS)
Fig.7 Deformation after plate's destruction



Rys.8 Zniszczenie płyty przekładkowej w skutek utraty stateczności
Fig.8 Destruction of the sandwich plate as a result of buckling

Wnioski
Conclusions

Praca przedstawia badania eksperymentalne problemów związanych z utratą stateczności i stanami zakrytytcznymi struktur przekładkowych. Badania przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej sterując poziomem siły, co zapewnia wystąpienie stanu naprężenia zbliżonego do stanu eksploatacyjnego. W czasie eksperymentu zarejestrowano ścieżkę równowagi, jednocześnie mierząc deformacje struktury przy użyciu sytemu ARAMIS wykorzystującego metodę trójwymiarowej cyfrowej korelacji obrazu

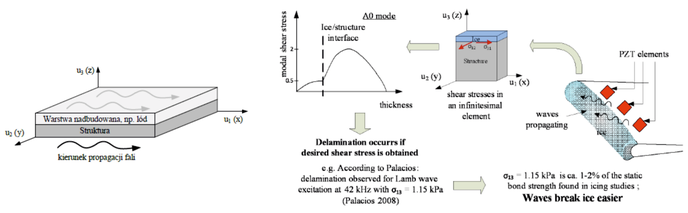
Paper presents experimental investigations of problems involved with stability and post-buckling states in sandwich structures. Research was carried out on the testing machine with the force level control. This ensures similarity of experimental stress state to the operational one. Equilibrium path was registered, simultaneously with measuring of the structure deformation. Changes of deformation during loading were recorded by 3D Digital Image Correlation System – ARAMIS.

Wyniki badań
Results

Delaminacja w kompozytach strukturalnych
Delamination in structural composite waveguides

W ramach zadania badany jest wpływ fal o wysokiej częstotliwości na spójność struktur wielowarstwowych. Podstawowe pytanie brzmi: czy i jak można wykorzystać fale wysokoczęstotliwościowe do wywołania delaminacji między określonymi warstwami bez stworzenia zagrożenia dla innych warstw i wiązań między nimi. Jednym z zastosowań proponowanego rozwiązania jest ultradźwiękowe odladzanie konstrukcji lotniczych. Propagacja fal w strukturach wielowarstwowych jest analizowana również pod kątem możliwości ich wykorzystania dla efektywnej detekcji i klasyfikacji oblodzeń.

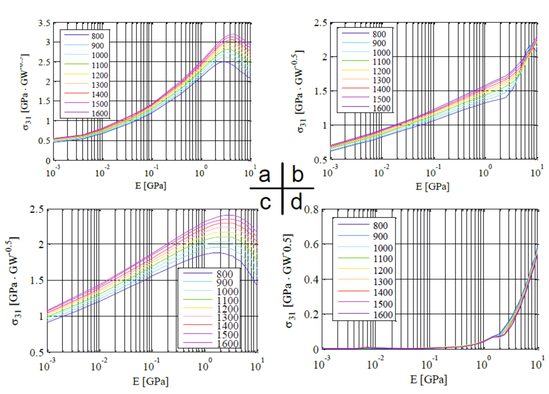
The general research aim is to investigate the influence of the ultrasonic waves on the integrity of structural composites. A primary question that is to be answered is how waves may be used as an efficient tool for inducing delamination in a desired interface of a structure without jeopardising its integrity. This concept is a basis on which modern ultrasonic de-icing systems can be developed. Guided waves propagation analysis is also aimed on determining their ice detection and classification potential.



Rys.1.Schemat koncepcji odladzania ultradźwiękowego
Fig.1. Schematic presentation of the ultrasonic de-icing concept

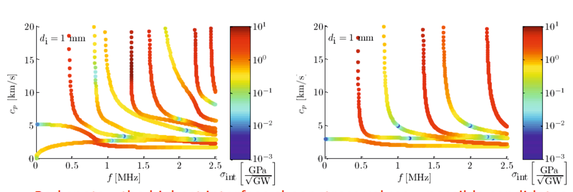
Zakres prac wykonanych w II półroczu 2011 r.:

- **Optymalizacja skonstruowanego w środowisku MATLAB® modelu numerycznego**
- **Analiza wpływu warstwy nadbudowanej na propagację fal w strukturze, w tym na potencjał generowania wysokich naprężeń międzywarstwowych.**



Rys.2. Wyniki analizy parametrycznej dla aluminiowej pyty (2 mm) z warstwą osadu o gr. 1 mm, dla różnych własności materiałowych (legenda określa gęstość w kg/m3). Wartości naprężeń w punktach maksimum (skoki międzypostaciowe); a) mod A0; b) mod S0; c) mod SH0; d) wartość naprężeń dla A0 w niskich częstotliwościach poza regionami maksimum.

Fig.2. Parametric study results. Maximum interface shear stress points' values (mode jump zones) for an alu (2 mm)/build-up (1 mm) plate for different material properties of the build-up: a) A0 mode; b) S0 mode; c) SH0 mode, d) stress for A0 in the low frequency range (far from mode jumps).

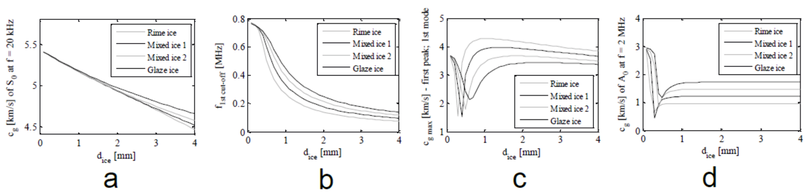


Red spots – the highest interface shear stress values – possible candidates for de-icing

Rys.3. Wartości naprężeń międzywarstwowych (alu 2 mm / lód szklisty 1 mm) naniesione na krzywe dyspersji. Fale Lamb'a (po lewej) oraz fale SH (po prawej)

Fig.3. Interface shear stress (alu 2 mm / glaze ice 1 mm) imposed on the dispersion curves. Lamb waves (on the left) and SH waves (on the right)

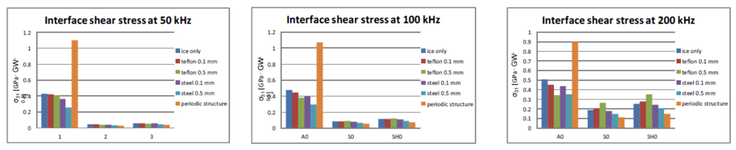
Pomiar wielkości charakterystycznych związanych z propagacją fal w strukturach jako źródło informacji o obecności i typie oblodzenia



Rys.4. Wybrane wielkości charakterystyczne propagujących fal Lamb'a – potencjalnie do wykorzystania w systemach detekcji i klasyfikacji oblodzeń: a) prędkość grupowa modu S0 przy 20 kHz; b) częstotliwość odcięcia pierwszego modu; c) maksimum prędkości grupowej pierwszego modu; d) prędkość grupowa modu A0 przy 2 Mhz.

Fig.4. Characteristic features of Lamb waves frequency spectrum which can be used as indicators of the thickness and type of ice layer: a) S0 mode group velocity at 20 kHz; b) cut-off frequency of the first mode; c) maximum group velocity of the first mode; d) A0 mode group velocity at 2 MHz.

Analiza wpływu dodatkowej warstwy pośredniej (np. powłoki, osłona antyerozyjna) na propagację fal w strukturze z niepożądaną wastwą nadbudowaną

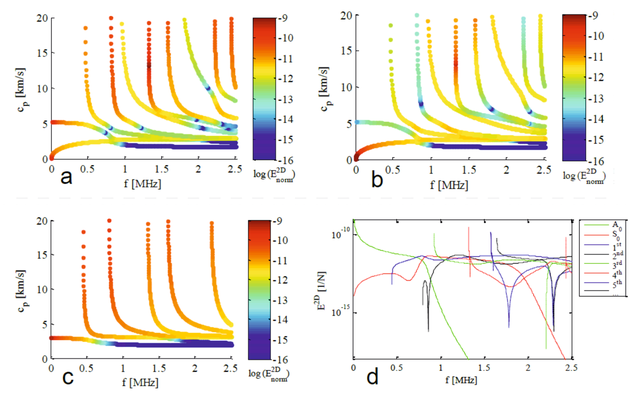


Optymalizacja struktury, w tym badanie struktur periodycznych (Zhu 2010) to skuteczny sposób na zwiększenie naprężeń międzywarstwowych.
KIERUNEK PRAC

Rys.5. Wpływ powłok różnego rodzaju i różnej grubości na naprężenia na granicy warstwy lodu. Dla porównania, naprężenia wyygenerowane na powierzchni struktury periodycznej (aluminium/epoxy...).

Fig.5. The influence of coating on the interface shear stress generation capability of different wave modes. For comparison, stress for a periodic structure composed of aluminium and epoxy layers (5 layers in total) with ice on top.

Rozszerzenie modelu obliczeniowego o możliwość badania odpowiedzi na zadane wymuszenie oraz wprowadzenie funkcji podatności modów na wymuszenie.



Rys.6. Wartości funkcji podatności modów na wymuszenie naniesione na krzywe dyspersji (alu 2 mm / lód szklisty 1 mm): a) fale Lamb'a wymuszane siłą w płaszczyźnie płyty; b) fale Lamb'a: siła w kierunku normalnym; c) fale SH; d) Funkcja podatności na wymuszenie w kierunku normalnym - fale Lamb'a

Fig.6. 2D Excitability function values imposed on the dispersion curves (alu 2 mm / glaze ice 1 mm): a) Lamb waves, in-plane excitation; b) Lamb waves, out-of-plane excitation; c) SH waves; d) Excitability function values for out-of plane excitation.

Wnioski
Conclusions

Wnioski
- Maksymalne naprężenia międzywarstwowe występują w okolicy skoków międzypostaciowych.
- Mod A0 generuje najwyższe naprężenia; wartości dla modów S0 i SH0 są porównywalne.
- Wskazano optymalne mody i dla systemów odladzania.
- Przedstawiono wstępne możliwości wykorzystania pomiaru charakterystycznych wielkości dla propagacji fal Lamb'a (prędkość grupowa, częstotliwość odcięcia pierwszego modu i in.) dladetekcji i klasyfikacji oblodzeń.
- Warstwa umieszczona pomiędzy strukturą, a lodem (np. osłona erozyjna, powłoka lodofobowa o znaczącej grubości) z reguły obniża wartość (nieznacznie) naprężeń na powierzchni lodu. Może jednak chronić wnętrze struktury przed niepożądanymi naprężeniami (Zhu 2010).
- Zaprezentowano inną modyfikację struktury – periodyczny układ warstw (Zhu 2010), którywpływa na znaczne zwiększenie wartości naprężeń.
- Wyznaczono funkcje podatności poszczególnych modów na wzbudzenie. Wskazano które mody są najłatwiej wymuszalne za pomocą określonych kierunków aktywacji.
- Pokazano, że punkty maksymalnych naprężeń międzywarstwowych związane ze skokami międzypostaciowymi są trudne do wymuszenia w realnych warunkach.

Kierunki dalszych badań
- Wykorzystanie rozszerzonego modelu falowego do weryfikacji dotychczasowych wyników.
- Rozszerzenie do 3D – wymuszenie punktowe.
- Przygotowanie eksperymentów.
- Optymalizacja struktury poprzez odpowiedni układ warstw.
- Zbadanie materiałów kompozytowych.

Conclusions
- Maximum interface shear stress points are associated with sudden mode jumps.
- A0 mode generates the highest interlaminar stress; values for S0 and SH0 are similar, much smaller than for A0, especially in the low frequency range
- Optimal modes for de-icing applications were identified.
- Guided waves ice detection and classification potential has been shown based on thecharacteristic features of Lamb waves frequency spectrum (Gao&Rose 2009).
- An intermediate layer (e.g. icephobic coating, erosion shield) usually lowers interface shear stress values. Despite that, it might be useful for protecting the inner plies from fatigue damage (Zhu 2009).
- Periodic structure concept has been presented (Zhu 2010) as possible way of effective structural optimisation
- Excitability functions have been calculated. The most easily excitable modes have been pointed out.
- It has been observed that maximum interface sheat stress point associated with mode jumps are difficult to excite (low excitability).

Future work directions
- Validation and supplementation of the results derived so far with the use of implemented forced wave model,
- Extending calculation to 3D excitability,
- Study on structural optimisation,
- Experiments preparation,
- Numerical analysis for composite materials

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO