

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

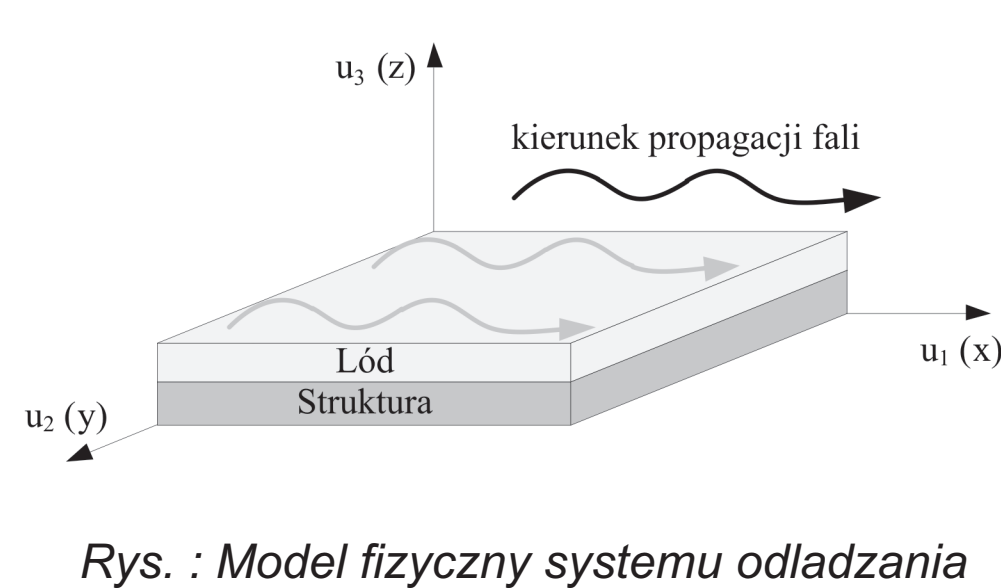
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Lotnictwa w Warszawie, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska

Wyniki badań

Ultradźwiękowe odczładowanie konstrukcji lotniczych

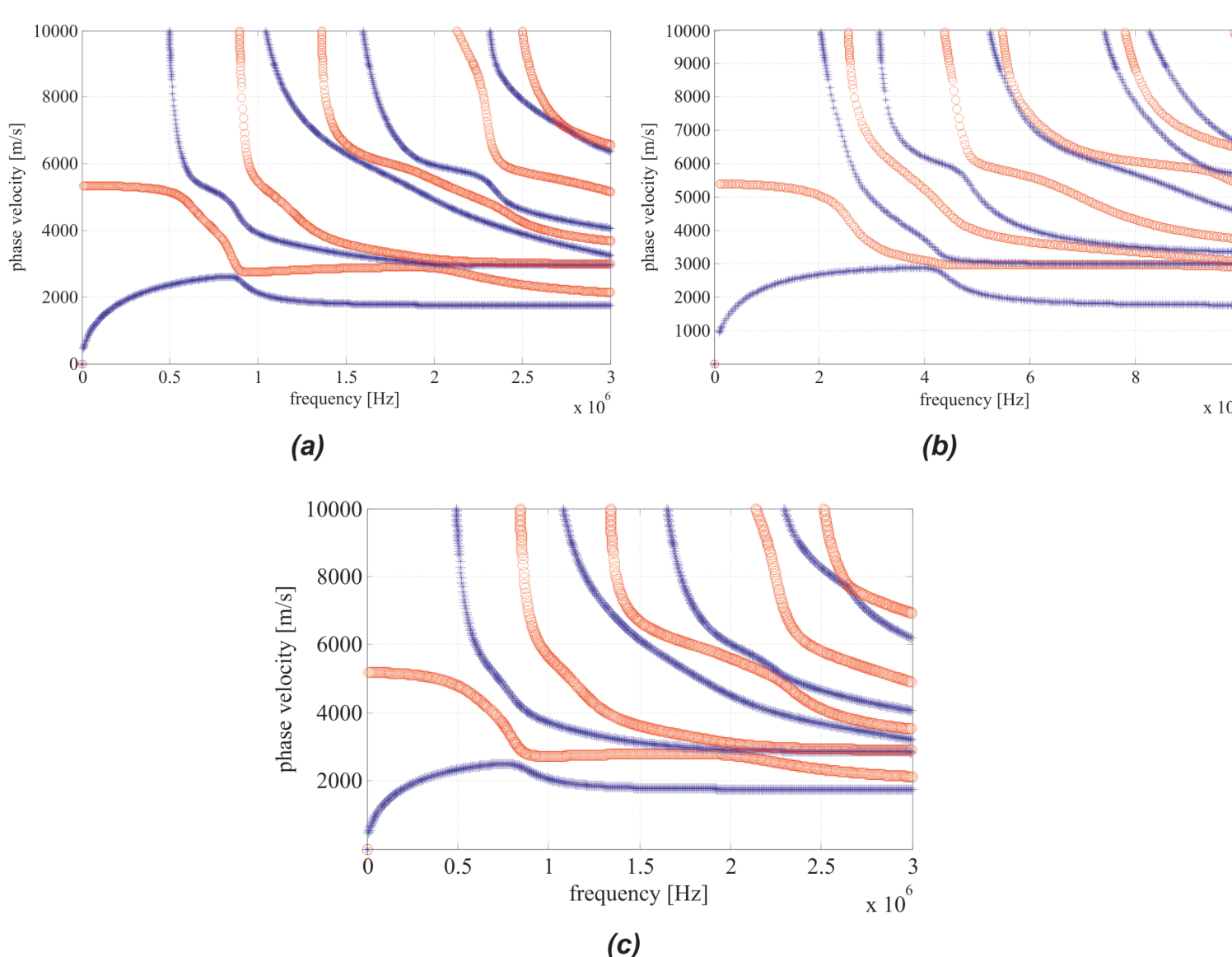
Idea rozwiązania:

- propagacja przez konstrukcję fale ultradźwiękowe powodują powstanie na granicy ośrodków naprężeń zdolnych przeniesienie wiązanie lód/struktura,
- podstawą do opracowania metody jest poznanie podstaw mechaniki oblodzenia,
- przy wybranej technologii aktuatorów (elementy piezoelektryczne) kluczowym zagadnieniem jest umiejętność ukształtowanie wymuszenia (wybór modów, sygnałów, dopasowanie impedancji, itp.) oraz optymalizacja konstrukcji.



Rys.: Model fizyczny systemu odczładowania

Rys.: Krzywe dyspersji fal dla dwuwarstwowej struktury: (a) stal, gr. 2 mm; lód, gr. 1 mm; (b) stal, gr. 9 mm; lód, gr. 2 mm; (c): aluminium gr. 2 mm; lód, gr. 1 mm.

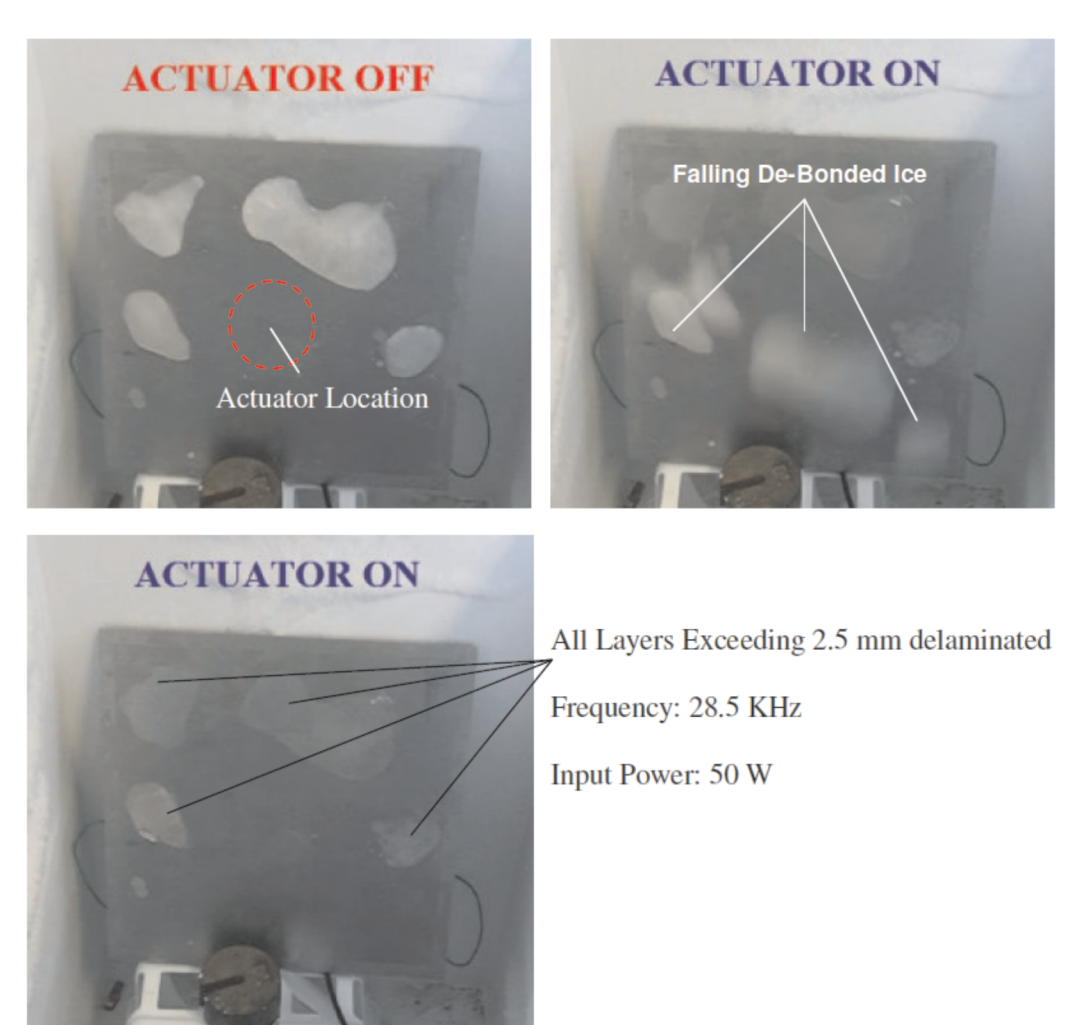


$$\begin{bmatrix} k m_{xx} & \frac{k}{m_{xx}} & \beta m_{xy} & -\beta \\ \frac{k}{m_{xx}} & -\alpha & -k m_{yy} & -\frac{k}{m_{yy}} \\ \beta m_{xy} & -k m_{yy} & -2j \rho h c_y^2 \beta & \frac{2j \rho h c_y^2 \beta}{m_{yy}} \\ 2j \rho h c_y^2 \beta & \frac{2j \rho h c_y^2 \beta}{m_{yy}} & j \rho h m_{yy} & j \rho h m_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{21} \\ A_{31} \\ A_{41} \end{bmatrix}$$

gdzie:

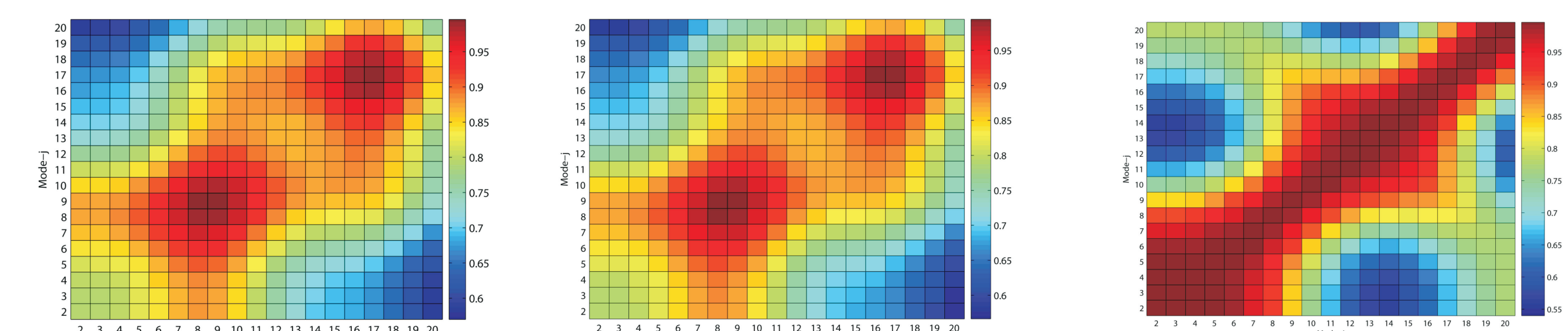
$$\alpha = \sqrt{\frac{\sigma^2 - k^2}{c_y^2}}, \quad m_{xx} = e^{j\alpha x}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\sigma^2 - k^2}{c_x^2}}, \quad m_{yy} = e^{j\beta y}, \quad H = \alpha^2 - 2c_y^2 k^2$$

Przykładowe wykresy struktury fali dla pierwszych dwóch modów (aluminium, gr. 2 mm; lód, gr. 1 mm).



Rys.: Efekt odczładowania falami typu SH

Rys.: Struktura naprężeń stycznych sigma_xy w strukturze aluminium, gr. 2mm; lód, gr. 1mm



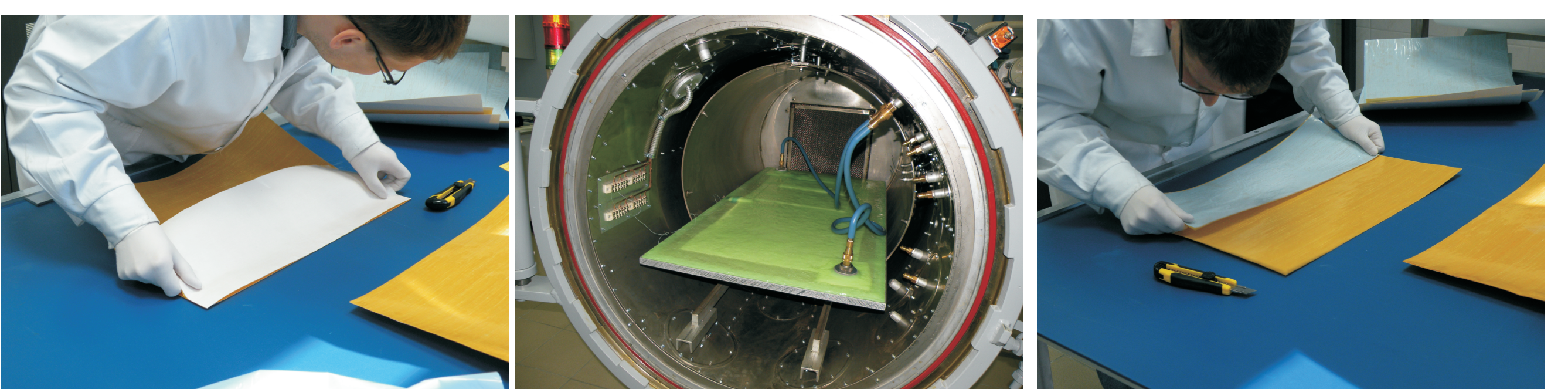
Rys. 3. Wyniki analizy MAC

3) Testowano autoklawową technologię wytwarzania kompozytów z wbudowanymi elementami aktywnymi oraz sprawdzono ich efektywności działania

Zastosowanie elementów MFC w konstrukcjach wymaga opracowania technologii wytwarzania kompozytów z wbudowanymi elementami aktywnymi. Umieszczenie elementów aktywnych na powierzchni konstrukcji poprzez jego naklejanie ma wiele wad. Dodatkowo element jest narażony na zniszczenie. We współpracy z prof. dr hab. Barbarą Surowską oraz dr inż. Jarosławem Bieniasiem, pracownikami Katedry Inżynierii Materiałowej Politechniki Lubelskiej (ZB9) podjęto próby wytworzenia elementów kompozytowych metodą autoklawową z wbudowanymi elementami aktywnymi.



Na zdjęciu autoklaw pracujący w Katedrze Inżynierii Materiałowej, Politechniki Lubelskiej.



Rys. 4. Wytwarzanie elementu kompozytowego z wtopionym elementem aktywnym MFC



Rys. 5. Gotowy element kompozytowy z wtopionym elementem aktywnym MFC oraz badania laboratoryjne

Wnioski

Poprawiony proces technologiczny potwierdził możliwość wprowadzania elementów MFC przy pomocy metody autoklawowej do wewnętrznych struktur płyt kompozytowych wykonanych z żywicy i wzmocnionych włóknami szklanymi. Wstępne badania elementów aktywnych nie wykazały zakłóceń w ich pracy, niemniej wskazane jest przeprowadzenie dalszych szczegółowych badań.

Należałoby także uzupełnić przedstawiony proces technologiczny umieszczania MFC w wewnętrzne struktury kompozytowych płyt węglowych. Szczególnie istotne wydaje się podłączenie zasilania elementu tak, aby uniknąć zwarcia.

Wskazane byłoby także badania wytrzymałościowe próbek wyciętych z płyty zawierających element MFC oraz badania delaminacji.

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

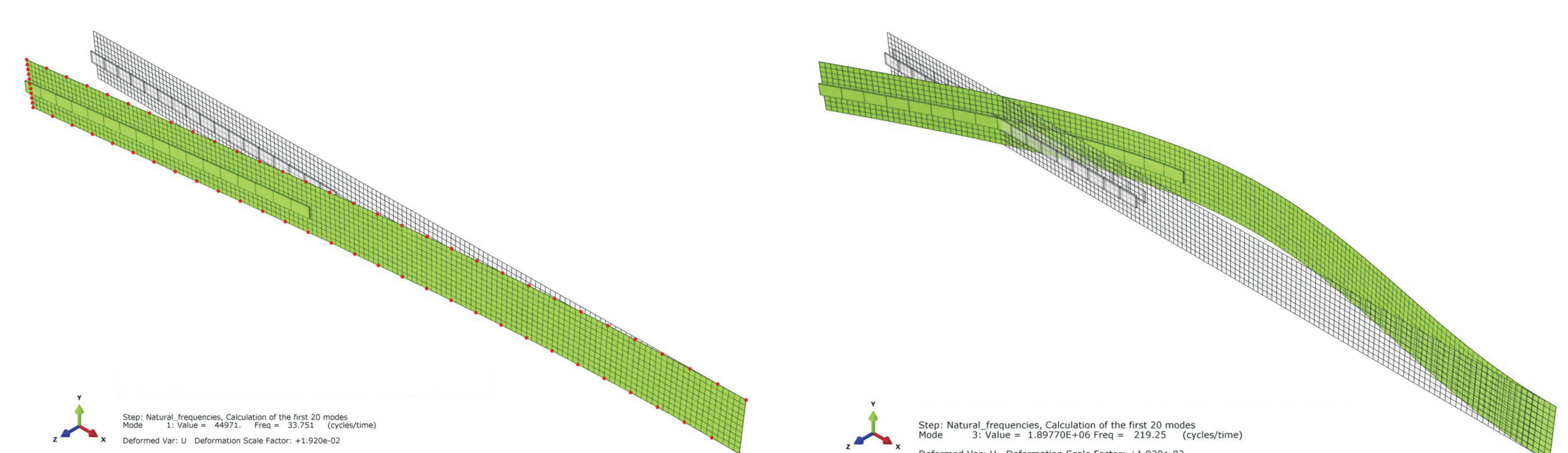
We współpracy z PZL Świdnik S.A. przygotowano do badań laboratoryjnych model łopaty wirnika nośnego śmigłowca. Dodatkowo współpraca dotyczy technologii wytwarzania kompozytowych struktur lotniczych metodą autoklawową z wtopionymi elementami aktywnymi.



Rys. 6. Gotowy model kompozytowej łopaty wirnika nośnego

Wyniki badań

Model MES wirującej belki kompozytowej z piezoelektrycznymi elementami aktywnymi
W systemie ABAQUS jednostronnie modelowano utwierdzoną belkę kompozytową wykonaną z wielowarstwowego laminatu szklanego z umieszczonymi na swobodnym końcu elementami PZT. Przyjęto, że bieguny elementu pozostają zwarte (obwód zamknięty). Wyznaczono częstości i postaci drgań własnych układu.



Rys. 1. Pierwsza postać drgań własnych układu belki kompozytowa - 2 elementy PZT

Rys. 2. Jedna z postaci drgań własnych kompozytowo-element PZT

Dysponując wynikami analizy modalnej w trzech wymienionych wyżej przypadkach dokonano jakościowej oceny porównawczej postaci drgań własnych badanych modeli. Do oceny wykorzystano procedurę Modal Assurance Criterion (MAC) wyznaczającą współczynniki korelacji poszczególnych postaci drgań własnych. Wyniki porównań przedstawiono na poniższych wykresach.

Chociaż wciąż bada się wytrzymałość wiązania lodu z różnymi materiałami, na podstawie wykonanego studium literaturowego można stwierdzić, że kluczową rolę z punktu widzenia siły adhezji pełni stan powierzchni struktury bazowej oraz cofający kąt zwilżania. Im większa chropowatość tym silniejsze wiązanie. Przy danej chropowatości, im większy cofający kąt zwilżania, tym struktura jest bardziej „lodoobfobowa”. Najbardziej lodoobfobowym z dotychczas znanych jest 80/20 PEMA/fluorocetyl POSS.

- dokonało porównania stosowanych metod odczładowania wyszczególniając ich wady i ograniczenia,

Tabela 1: Jakościowe porównanie wybranych metod odczładowania

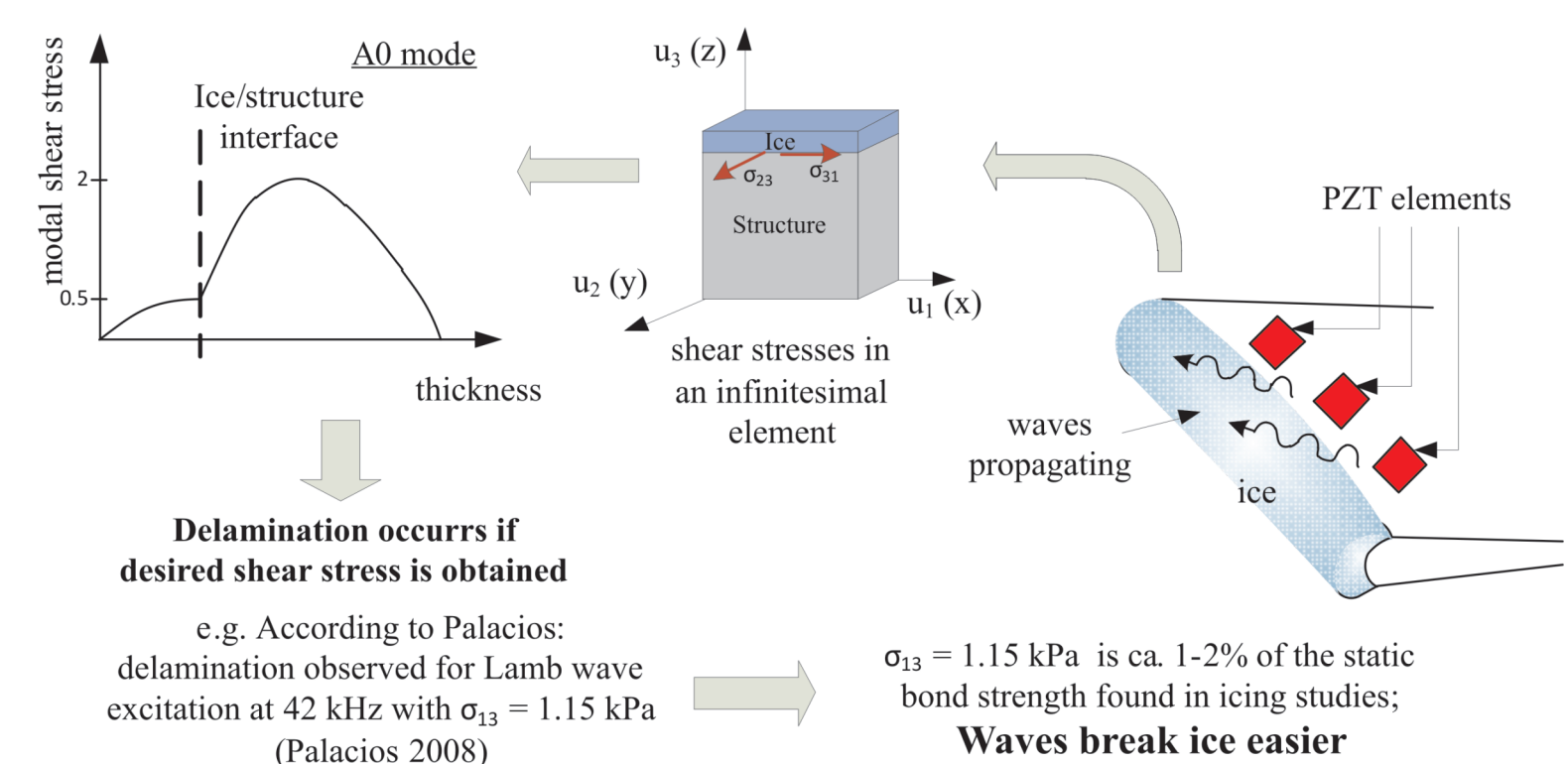
Metoda odczładowania	Geneza	Wady	Zalety
Chłód (przebiegowe odczładowanie)	• wykorzystanie „chłodu” jako siły napędzającej proces odczładowania	• wysoka wydajność odczładowania	• niskie koszty
Komorę parowniczą (oblodzenie)	• Chłód woda w formie parownicy	• Wysoka wydajność odczładowania	• Niska wydajność odczładowania
Termiczne (oblodzenie w strumieniu powietrza)	• Chłód woda w formie parownicy	• Wysoka wydajność odczładowania	• Niska wydajność odczładowania
Elektrotermiczna (oblodzenie w strumieniu powietrza)	• Chłód woda w formie parownicy	• Wysoka wydajność odczładowania	• Niska wydajność odczładowania

Tabela 2: Wybrane wartości wytrzymałości wiązania lód/struktura na naprężenia styczne

Metoda badań	Wytrzymałość wiązania na ścinanie (MPa)	Temp. pomiarowa (°C)	Zródło
Witkowska	0,028 - 0,127	6,7 do -15	Loughborough and Price (1983)
Quasi-statyczna próba ścinania	0 - 0,4	0 do -23	Stachurski i Szwed (1991)
Belkowa z wykorzystaniem przetworzonego LVT	0,142 - 0,267	-21	Stachurski, Lim et al. (2010)
Belkowa z wykorzystaniem przetworzonego LVT	0,23 ± 0,08	-7	Stachurski, Lim et al. (2010)
Witkowska	1,96	-10	Harary and Labor (1988)
Quasi-statyczna próba ścinania	0 - 1,65	od 0 do -14	Ludman (1959)
Próba ścinania ASTM	0,77	-15	Scott (2011)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	1,15	-15	Landy and Froberg (1987)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	1,63	-20	Landy and Froberg (1987)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,32	-12	Landy and Froberg (1987)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,26	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,64	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,54	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,3	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,29	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,483 ± 0,065	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,384 ± 0,052	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,291 ± 0,044	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,570 ± 0,101	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,475 ± 0,050	-10	Mauder, Smith et al. (2010)
Stacjonarna próba ścinania (patrz: zródło)	0,145 ± 0,027	-10	Mauder, Smith et al. (2010)

Tabela 3: Ilościowe porównanie wybranych metodach dla helikoptera Bell 412 (za: Zhu 2010)

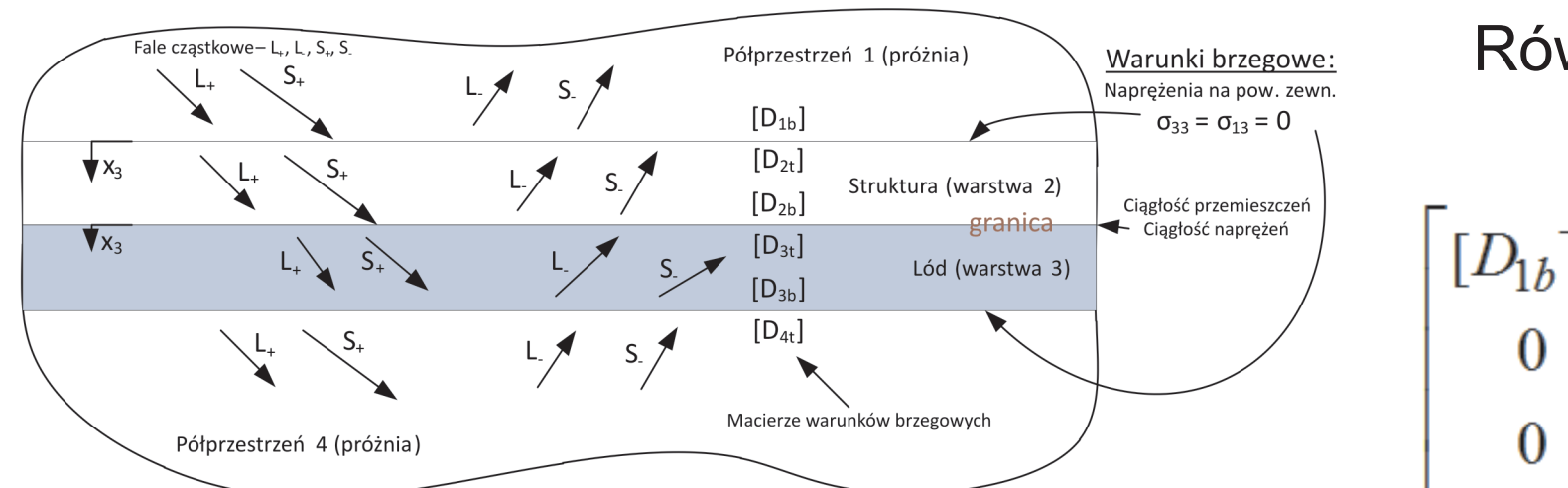
Metoda	Elektron termiczny	Pneumatyczna	Ciepła	Elektron impulsowa	Elektron ultradźwiękowa	Mikrofalowa	Ultradźwiękowa
Waga [kg]	73	24,5	88	54	14	15	1,2
Zapobieganie mrozi [h]	26	26	-	3	3,3	15	1,2
Główna oszczędność	tak	tak	nie	tak	tak	nie	tak
Wzrost momentu	10%	10% wzrost momentu	-	10%	10%	10%	10%
Ryzyko przedmrozenia	tak	nie	nie	nie	nie	nie	nie



Rys.: Koncepcja systemu odczładowania ultradźwiękowego

Wykorzystując metodę macierzy globalnej (Lowe 1995) skonstruowano model matematyczny struktury w oparciu o podstawowe równania teorii sprężystości:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i, \quad \epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \Rightarrow \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_l}$$



Równanie charakterystyczne układu:

$$\begin{bmatrix} [D_{1b}^-] & [-D_{2r}] & 0 & 0 \\ 0 & [D_{2b}^-] & [-D_{3r}] & 0 \\ 0 & 0 & [D_{3r}] & [-D_{4r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A_1\} \\ \{A_2\} \\ \{A_3\} \\ \{A_4\} \end{bmatrix} = 0$$

gdzie $\{A_1\}, \dots$ to wektory amplitud fal cząstkowych.

Rozwiązaniem równania są krzywe dyspersji fal w strukturze wraz z wektorami amplitud fal cząstkowych dla każdej częstotliwości i każdej postaci (modu) fali. Równanie rozwiązano numerycznie - napisano odpowiednie programy w środowisku MATLAB. Warto dodać, że metoda jest uniwersalna niezależnie od ilości warstw, charakteru przestrzeni, etc. - zmienia się jedynie rozmiar macierzy.

- wyznaczono krzywe dyspersji dla dwuwarstwowych struktur lód/metal,
- Dla przykładowych struktur aluminium/lód oraz stal/lód wyznaczono krzywe dyspersji w oparciu o równanie charakterystyczne. Krzywe dyspersji zawierają informację o prędkości propagacji fali danej postaci (modu) przy określonej częstotliwości, stąd ich właściwe wyznaczenie jest kluczowe z punktu widzenia projektowania systemu ultradźwiękowych. Znajomość krzywych dyspersji oraz amplitud fal cząstkowych (jako rozwiązań równania charakterystycznego) jest podstawą do opisanie struktury fali (tzn. rozkładu przemieszczeń i naprężeń modalnych) na podstawie pola przemieszczeń i naprężeń.