

## Analiza numeryczna i weryfikacja doświadczalna wpływu położenia delaminacji na charakterystyki dynamiczne belek kompozytowych.

Jakub Wieczorkiewicz, Sylwester Samborski, Rafał Rusinek

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Lubelska  
email: j.wieczorkiewicz@pollub.pl, s.samborski@pollub.pl, r.rusinek@pollub.pl

**STRESZCZENIE:** W niniejszej pracy zaprezentowano model belki kompozytowej z uszkodzeniem. Wyznaczono częstotliwości własne dla różnych kodów laminatu i ilości lamin. Następnie przeprowadzono badania na fizycznym obiekcie przy użyciu wibrometru laserowego Polytec PSV-500. Otrzymane rezultaty doświadczalne porównano z wynikami obliczeń numerycznych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** belka kompozytowa, belka obustronnie utwierdzona, detekcja uszkodzeń, MES, wibrometr laserowy.

### 1. Wstęp

W wielu współczesnych konstrukcjach kompozytowych mogą pojawić się wady, takie jak delaminacja, prowadzące do zmiany właściwości mechanicznych danej konstrukcji. Wyzwaniem staje się więc wykrycie i zlokalizowanie ukrytej wady. Niemniej ważnym zadaniem jest ocena wpływu wielkości i lokalizacji defektu na charakterystyki dynamiczne układu. Podstawą diagnostyki stanu i oceny niezawodności elementu może być sygnał z pomiaru drgań mechanicznych badanego układu [1].

Metody wykrywania uszkodzeń często bazują na pomiarze i analizie drgań struktur belkowych i płytowych [2-6], gdzie analizowane są częstotliwości i postacie własne.

Niniejsza praca omawia problem wykrywania uszkodzenia na przykładzie belki anizotropowej, kompozytowej o różnym kodzie laminatu i ilości lamin. Porównano drgania belek bez uszkodzeń (zdrowych) z drganiami belek z uszkodzeniem. W tym celu przeprowadzono badania numeryczne przy użyciu programu Abaqus/CAE w wersji 6.13-3 [7], który umożliwia modelowanie właściwości materiałów w zagadnieniach statycznych oraz dynamicznych. Następnie w celu weryfikacji wyników symulacji numerycznej zaproponowano metodę opartą na bezkontaktowym pomiarze drgań mechanicznych przy użyciu wibrometru laserowego.

W pierwszym etapie zbudowano modele numeryczne rozpatrywanych przypadków oraz wyznaczono częstotliwości własne, zaś w drugim etapie przeprowadzono badania na fizycznym obiekcie przy użyciu wibrometru laserowego. Otrzymane rezultaty doświadczalne i numeryczne porównano i przeanalizowano.

### 2. Założenia modeli MES i program symulacji

Przedmiotem analizy były modele obustronnie utwierdzonej belki (anizotropowej) wykonanej z kompozytu TVR 380 (glass-epoxy) o wymiarach: a) 25 x 1 x 400 mm i kodzie laminatu [90/0]s oraz b) 25 x 2 x 400 mm i kodzie laminatu [ $\alpha$ /- $\alpha$ ]<sub>2</sub>/[ $\alpha$ /- $\alpha$ ]<sub>2</sub>/[ $\alpha$ ], gdzie  $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ . Dane materiałowe kompozytu zebrano w tabeli 1.

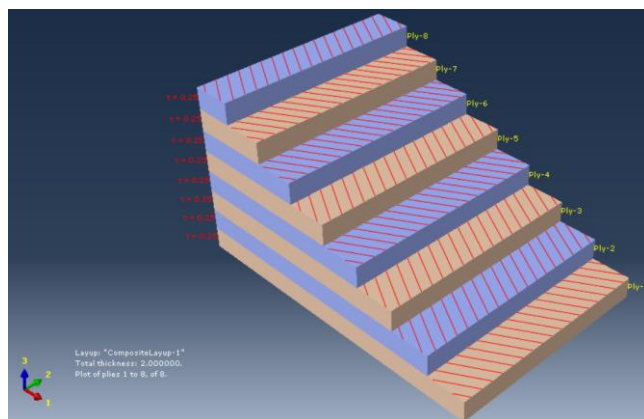
Analizę numeryczną przeprowadzono w programie Abaqus/CAE w wersji 6.13-3 dla belki „zdrowej” (bez defektu) oraz belki uszkodzonej. W belce uszkodzonej wprowadzono sztuczny defekt w postaci delaminacji –

rozwarstwienia w połowie grubości belki. W belce „zdrowej” został nadany specyficzny kontakt pomiędzy laminami. Przykładowy układ lamin dla  $\alpha=30^\circ$  w belce „zdrowej” ukazuje rys. 1. W przypadku belki z uszkodzeniem długość defektu to  $a=40$  mm, co stanowi 10 % całkowitej długości belki, a współrzędna początku defektu licząc od miejsca zamocowania wynosiła  $X=180$  mm dla belki z defektem w połowie długości (Rys. 2) oraz  $X=80$  mm dla belki z defektem D25 (Rys. 3).

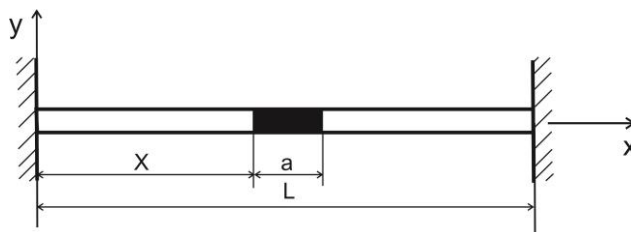
Tabela 1. Stałe materiałowe kompozytu używane w symulacjach MES

Materiał	$\rho$ [kg*m <sup>-3</sup> ]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	$\nu$ [-]	G [MPa]
TVR 380	2038	46430	14920	0.269	5233

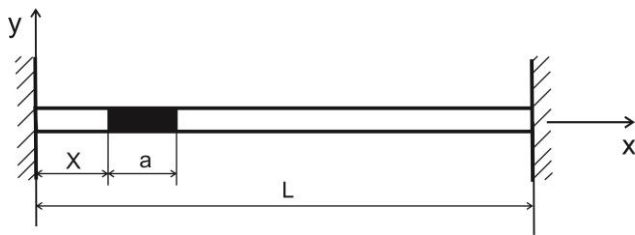
G=G12=G13=G23



Rys.1. Układ lamin w belce zdrowej ( $\alpha=30^\circ$ )



Rys. 2. Schemat belki z defektem w połowie długości



Rys. 3. Schemat belki z defektem D25

Pierwszym krokiem w analizie numerycznej było wyznaczenie częstości i postaci drgań własnych belki „zdrowej” dla wszystkich kodów laminatu. Uzyskano niniejszym charakterystyki bazowe/odniesienia dla belek uszkodzonych. Następnie przeprowadzono symulacje dla belek z delaminacją. Belki modelowano w środowisku Abaqus/CAE jako obiekt trójwymiarowy, odkształcalny typu powłoka. Zastosowano 4-węzłowe elementy powłokowe S4 z biblioteki elementów skończonych Abaqus Standard. Do rozwiązania zagadnienia własnego użyto algorytmu Lanczos, wprowadzając liniowe zaburzenie układu.

### 3. Badania doświadczalne

W celu zminimalizowania wpływu aparatury pomiarowej na badany obiekt, badania doświadczalne przeprowadzono za pomocą wibrometru laserowego. Wibrometr zapewnia pomiar bezdotykowy, dzięki czemu eliminuje się zakłócenia spowodowane m.in. masą czujników, wahaniami temperatury, sposobem mocowania oprzyrządowania itp.

Do pomiarów wykorzystano trzy niezależne głowice pomiarowe wraz z kontrolerem firmy Polytec model PSV-500 (Rys.4). Głowice te są wyposażone w wysokiej rozdzielczości układ optyczny i analizator, który interpretuje odbity od obiektu badań promień lasera [1].



Rys. 4. Kontroler i głowice pomiarowe Polytec PSV-500

Powyższy zestaw umożliwia pomiary prędkości w zakresie  $\pm 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  oraz w szerokim zakresie częstotliwości – od 1 Hz do 100 kHz. Ponadto pomiary mogą być wykonywane z odległości od 42 cm do kilkuset metrów od badanego obiektu. Zasada działania wibrometru wykorzystuje efekt Dopplera [1].

### 4. Dyskusja wyników i wnioski

Jak można zaobserwować, wprowadzenie defektu w belce spowodowało nie tylko znaczną zmianę częstości własnych szczególnie widoczną w wyższym zakresie częstości w porównaniu do belki „zdrowej”, ale także powstanie efektu zmiany postaci drgań belki kompozytowej. Wyniki sugerują możliwość wystąpienia tzw. veering effect – zjawiska znanego w literaturze przedmiotu [8-9]. Konieczne są więc dalsze szczegółowe badania, mające na celu zidentyfikowanie wpływu położenia i rozmiaru delaminacji na zmianę postaci drgań własnych.

Zaprezentowane możliwości zastosowania wibrometru laserowego do pomiaru drgań mechanicznych belek kompozytowych znacząco ułatwiają weryfikację wyników symulacji MES. Te ostatnie zapewniają jednak, w porównaniu z eksperymentem szerszy obszar badań i są znacznie tańsze.

Otrzymane wyniki numeryczne i doświadczalne są zbieżne, co dowodzi słuszności przyjętego modelu numerycznego i założeń podczas eksperymentu. Występujące różnice pomiędzy metodami nie przekraczają kilku procent.

Analiza wyników badań pozwala wnioskować, że metoda polegająca na porównaniu częstości oraz postaci drgań własnych belek kompozytowych z uszkodzeniem i „zdrowych” jest skuteczna.

*Praca została dofinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji nr DEC-2013/11/B/ST8/04358.*

### Literatura

- [1] P. Cichoń, M. Stosiak, *Zastosowanie wibrometru laserowego do pomiaru drgań stołu symulatora liniowego napędu hydrostatycznego*, Napędy i Sterowanie 5 (2012) 66-72.
- [2] E. Manoach, S. Samborski, A. Mitura, J. Warmiński, *Vibration based damage detection in composite beams under temperature variations using Poincaré maps*, International Journal of Mechanical Sciences 62 (2012) 120-132.
- [3] E. Manoach, I. Trendafilova, *Large amplitude vibrations and damage detection of rectangular plates*, Journal of Sound and Vibration 315 (2008) 591-606.
- [4] E. Manoach, J. Warmiński, A. Mitura, S. Samborski, *Dynamics of a composite Timoshenko beam with delamination*, Mechanics Research Communications 46 (2012) 47-53.
- [5] E. Manoach, J. Warmiński, A. Mitura, S. Samborski, *Dynamics of a laminated composite beam with delamination and inclusions*, Eur. Phys. J. Spec. Top. 222 (2013) 1649-1664.
- [6] I. Trendafilova, E. Manoach, *Vibration-based damage detection in plates by using time series analysis*, Mechanical Systems and Signal Processing 22 (2008) 1092-1106.
- [7] Abaqus 6.13: analysis user's manual, Dassault Systemes, 2013.
- [8] A. Gallina, L. Pichler, T. Uhl, *Enhanced meta-modelling technique for analysis of mode crossing, mode veering and mode coalescence in structural dynamics*, Mechanical Systems and Signal Processing, 2011.
- [9] L. Pichler, A. Gallina, T. Uhl, *Accurate modal meta-modeling procedure for representation of mode crossing and veering*, In ECCM2010 – IV European Congress on Computational Mechanics, Paris (France), 16-21 May 2010.