

Jakub Spytek<sup>1</sup>, Kajetan Dziedziech<sup>1</sup>, Łukasz Ambroziński<sup>1</sup>, Łukasz Pieczonka<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,  
Katedra Robotyki i Mechatroniki, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

# Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal prowadzonych

## Damage imaging in thin-walled structures using guided ultrasonic waves

### STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono nowatorską technikę badań nieniszczących struktur cienkościennych bazującą na estymacji lokalnej liczby falowej ultradźwiękowych fal prowadzonych. Technika bazuje na punktowym wzbudzeniu fal ultradźwiękowych i rejestracji odpowiedzi drganiowych na siatce punktów w obszarze zainteresowania z wykorzystaniem skanującego wibrometru laserowego. Wzbudzenie może być zrealizowane bezkontaktowo za pomocą impulsu lasera, bądź kontaktowo za pomocą przetwornika piezoelektrycznego. Praca omawia podstawy teoretyczne metody oraz jej zastosowania praktyczne. Skuteczność działania omawianej metody zilustrowano na przykładzie jednorodnej płyty aluminiowej oraz niejednorodnej warstwowej płyty kompozytowej.

**Słowa kluczowe:** ultradźwięki, fale prowadzone, struktury cienkościenne, techniki laserowe

### ABSTRACT

In this paper we present a novel nondestructive testing technique for plate-like structures, using the local wavenumber estimation of ultrasonic guided waves. The technique is based on the excitation of ultrasonic waves and measuring the full-field response on a grid of points in the area of interest with a scanning laser vibrometer. The excitation can be realized using a non-contact laser pulse or a piezoelectric transducer. The paper discusses theoretical background of the technique and its practical applications. The efficacy of the proposed approach is demonstrated on a homogeneous aluminum plate and an inhomogeneous layered composite plate.

**Keywords:** ultrasound, guided waves, thin-walled structures, laser techniques

### 1. Wprowadzenie

Kontrola jakości i monitorowanie stanu technicznego struktur cienkościennych jest istotnym zagadnieniem w wielu gałęziach przemysłu. Przykładowo, poszycia samolotów narażone są na uszkodzenia ze względu na wiele czynników zewnętrznych, takich jak grad, uderzenia piorunów lub kolizje podczas załadunku i rozładunku. Powstałe uszkodzenia, mimo iż często niewidoczne gołym okiem, powodują znaczące osłabienie struktury i stwarzają poważne zagrożenie w dalszej eksploatacji. Wykrywanie uszkodzeń w strukturach tego typu jest jednak procesem czasochłonnym i skomplikowanym. Wobec tego istnieje zapotrzebowanie na szybsze i niezawodne metody inspekcji.

W ostatnich latach zaproponowano wiele metod detekcji uszkodzeń w strukturach cienkościennych [1]. Wśród nich są metody bazujące na pomiarze pełnego pola propagacji fal prowadzonych przy użyciu bezkontaktowych czujników drgań [2]-[4]. Podejście takie umożliwia wizualizację lokalnych interakcji pomiędzy polem falowym, a uszkodzeniami w strukturze. W tym celu stosuje się techniki przetwarzania sygnałów, aby uwidocznic subtelne zmiany cech fal Lamba. Jednym z bardziej zaawansowanych podejść jest technika estymacji lokalnej liczby falowej (ang. Local Wavenumber Estimation, LWE) znana także w literaturze jako spektroskopia liczby falowej (ang. Acoustic

Wavenumber Spectroscopy, AWS). W literaturze naukowej wykazano skuteczność tej metody dla różnego rodzaju struktur, takich jak płyty jednorodne, rury, kompozyty oraz płyty klejone [5]-[10].

W tej pracy przedstawiamy opracowany system pomiarowy bazujący na technice spektroskopii liczby falowej do wykrywania uszkodzeń w strukturach cienkościennych. Do pomiaru pola falowego wykorzystujemy bezkontaktowy skanujący wibrometr laserowy (SLDV), a do wymuszenia impulsowe źródło laserowe lub ceramiczny przetwornik piezoelektryczny (PZT). Skuteczność systemu zademonstrowana jest na przykładzie jednorodnej płyty aluminiowej z lokalnym ubytkiem przekroju, oraz warstwowej płyty kompozytowej o zmiennej grubości z syntetycznymi delaminacjami.

### 2. Metoda estymacji lokalnej liczby falowej

Podejście omawiane w niniejszej pracy umożliwia charakteryzację wad w konstrukcjach cienkościennych przy pomocy analizy pełnego pola propagacji fal Lamba. Fale Lamba podlegają dyspersji, co oznacza że ich liczba falowa jest zależna od częstotliwości, a dodatkowo od grubości płyty w której te fale propagują. Własności fal Lamba w określonym medium są bardzo często przedstawiane za pomocą krzywych dyspersji, czyli wykresów przedstawiających zależność liczby falowej od częstotliwości. Rys. 1 przedstawia przykładowe krzywe dyspersji dla płyt aluminiowych o grubościach 1 mm i 2 mm. Dla każdej z płyt

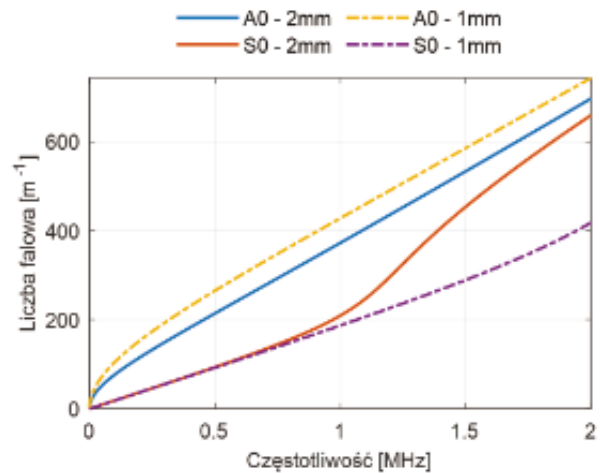
\*Autor korespondencyjny.

E-mail: lukasz.pieczonka@agh.edu.pl

nakreślono charakterystyki podstawowej postaci asymetrycznej (A0) oraz symetrycznej (S0) fal Lamba. Jak można zauważyć, wykresy liczby falowej dla postaci A0 są różne dla różnych grubości płyty w całym podanym zakresie częstotliwości, natomiast wykresy dla postaci S0 osiągają różne wartości od około 1 MHz. Liczba falowa jest więc czuła na zmiany grubości oraz defekty występujące w płycie dla częstotliwości, w której wybrana postać jest mocno dyspersyjna. Metoda estymacji lokalnej liczby falowej fal Lamba (z ang. LWE – local wavenumber estimation) [6], [7] umożliwia stworzenie przestrzennej mapy rozkładu liczby falowej wybranej postaci (np. postaci A0) na obszarze mierzonego pola propagacji fal i użycie jej do zlokalizowania uszkodzeń. Zaletami tej metody są wysoka dokładność wykrywania uszkodzeń, oraz możliwość oceny wielkości uszkodzenia na podstawie wartości liczby falowej.

### 3. System pomiarowy

Metoda estymacji lokalnej liczby falowej (LWE) funkcjonuje w połączeniu z systemem pomiarowym umożliwiającym skanowanie pełnego pola propagacji fal prowadzonych. Tego typu pomiar wykonywany jest zazwyczaj przy użyciu technik laserowych. W przedstawionym przykładzie do pomiaru drgań badanej powierzchni wybrano skanujący wibrometr laserowy (z ang. Scanning Laser Doppler Vibrometer, SLDV) firmy Polytec, model PSV-400. Model ten wyposażony jest w skaner galwanometryczny, umożliwiający automatyczny pomiar drgań w predefiniowanej siatce punktów. Do wzbudzenia fal Lamba w płycie można zastosować kontaktowy przetwornik piezoelektryczny (PZT), do którego podany jest sygnał z generatora. Alternatywnie można wykorzystać laser impulsowy o dużej mocy do wzbudzenia fali ultradźwiękowej poprzez wykorzystanie efektu termosprężystego. W tym układzie pomiar może być w pełni bezkontaktowy oraz zachować swój nieniszczący charakter. Schemat takiego zestawu pomiarowego przedstawiono na Rys. 2.

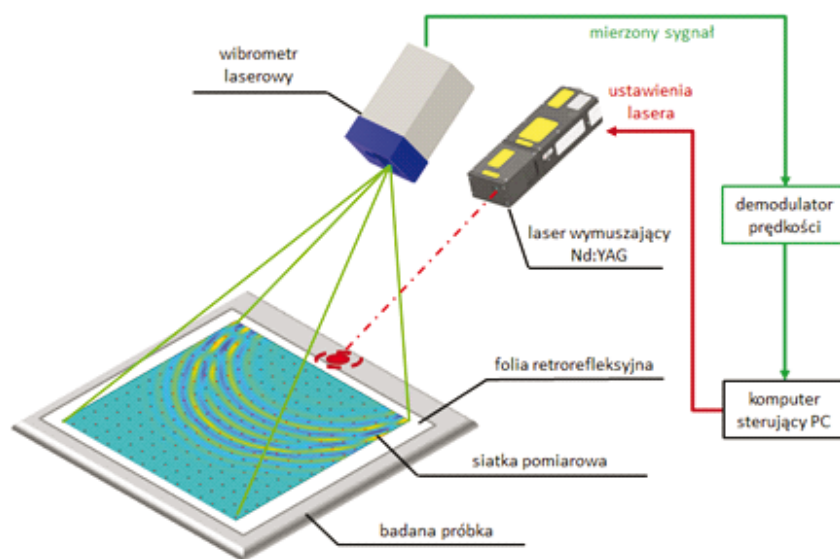


Rys. 1. Krzywe dyspersji płyty aluminiowej o grubości 2 mm i grubości 1 mm

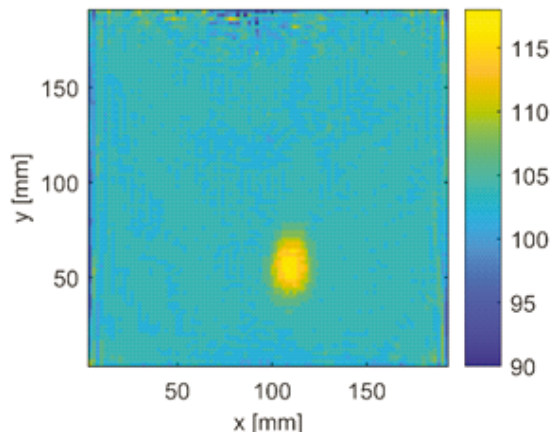
Zestaw pomiarowy wraz z opracowanym algorytmem estymacji lokalnej liczby falowej wykorzystano do detekcji uszkodzeń w dwóch strukturach płytowych: w jednorodnej płycie aluminiowej i w schodkowym demonstratorze wykonanym z laminatu kompozytowego CFRP (z ang. *Carbon Fiber Reinforced Polymer*).

#### Płyta aluminiowa

Pierwszą próbką badawczą, na której wykonano inspekcję, była płyta aluminiowa o wymiarach 1000×1000×2 mm. Do płyty wprowadzono uszkodzenie w formie prostokątnego podfrezowania na powierzchni około 20×20 mm i do głębokości 0.5 mm. Za pomocą wibrometru laserowego SLDV wykonano skan obszaru 200×200 mm wokół obszaru z ubytkiem grubości. Do wzbudzenia fali wykorzystano kontaktowy przetwornik piezoelektryczny (PZT) przyklejony do powierzchni płyty. Sygnał z jednego przetwornika był wystarczający do uzyskania pola falowego na całym badanym obszarze.



Rys. 2. Schemat pomiarowy obrazowania pełnego pola propagacji fal Lamba w płycie



Rys. 3. Mapa lokalnej liczby falowej dla pola zmierzonego na płycie aluminiowej. Obszar o współrzędnych około  $x: 100-120$  i  $y: 40-65$  mm odpowiada podfrezowaniu o głębokości  $0.5$  mm, co skutkuje wyższymi wartościami liczb falowych w tym obszarze.

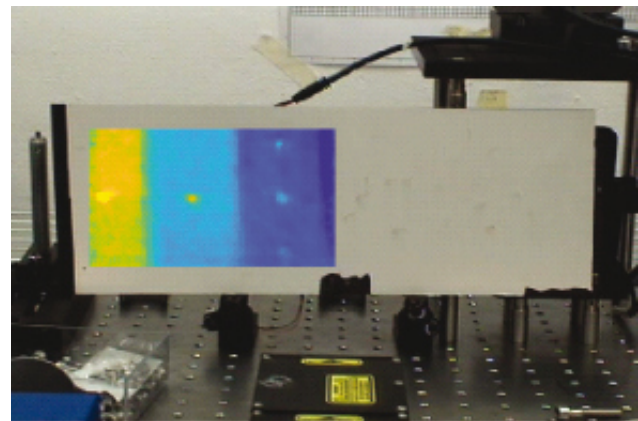
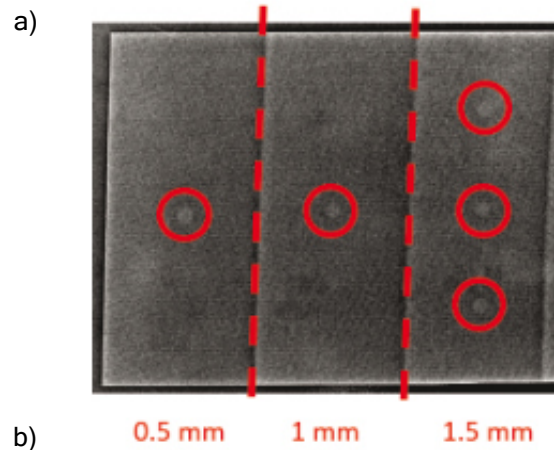
### Demonstrator kompozytowy

Drugą analizowaną próbką badawczą był demonstrator kompozytowy do inspekcji ultradźwiękowej. Demonstrator składał się z 3 poziomów grubości:  $0.5$ ,  $1$  i  $1.5$  mm, a całkowite wymiary próbki wynosiły  $180 \times 145$  mm. Pomiędzy warstwami kompozytu umieszczono wkładki teflonowe, aby zasymulować lokalne delaminacje wewnątrz płyty. Otrzymane defekty są niewidoczne gołym okiem, a ich położenie pokazane jest na zdjęciu rentgenowskim na Rys. 4a. Pomiar wykonano na płaskiej stronie płyty na obszarze  $170 \times 110$  mm. W celu poprawy jakości pomiaru wibrometrycznego na powierzchni próbki przyklejono folię retrorefleksyjną. Do wymuszenia wykorzystano komercyjny laser Quantel Ultra Nd:YAG  $1064$  nm.

### Wyniki eksperymentalne

Zestawy danych pomiarowych z płyty aluminiowej i demonstratora CFRP zostały przetworzone przy użyciu metody estymacji lokalnej liczby falowej (LWE). Mapa liczby falowej dla płyty aluminiowej została przedstawiona na Rys. 3. Skala kolorystyczna odpowiada maksymalnej lokalnej liczbie falowej. Dla większości obszaru mapy estymowana liczba falowa ma podobną wartość, odpowiadającą stałej grubości płyty. Na mapie wyraźnie widoczny jest obszar zwiększonej liczby falowej (żółty kolor), który odpowiada wprowadzonemu ubytkowi grubości. Uzyskana mapa pozwala na łatwe określenie wymiarów oraz lokalizacji wady.

Uzyskana mapa liczby falowej dla demonstratora CFRP została przedstawiona na Rys. 4b, po nałożeniu na obraz z kamery wibrometru laserowego. Obszar pomiarowy zawiera trzy różne grubości płyty, co powoduje, że na mapie widoczne są trzy kolory tła, odpowiadające grubościom  $0.5$ ,  $1$  i  $1.5$  mm (od lewej do prawej). Na obszarach o grubości  $0.5$  mm i  $1$  mm widać po jednym okrągłym detalu o wyższej liczbie falowej, a na obszarze o grubości  $1.5$  mm widać trzy detale o zwiększonej liczbie falowej. Detale te odpowiadają defektom w kompozycie pokazanym na Rys. 4a. Metoda LWE umożliwia więc wykrycie uszkodzeń w płytach CFRP.



Rys. 4. (a) Obraz rentgenowski badanego obszaru płyty kompozytowej o trzech poziomach grubości –  $0.5$ ,  $1$  i  $1.5$  mm (od lewej do prawej) z widocznymi wadami, oraz (b) uzyskana mapa rozkładu lokalnej liczby falowej naniesiona na obraz z kamery umieszczonej w głowicy wibrometru. W poszczególnych sekcjach widoczne są obszary o odstającej wartości liczby falowej wskazujące lokalizację wad.

### 4. Wnioski

W artykule zaprezentowano metodę estymacji lokalnej liczby falowej do wykrywania uszkodzeń w strukturach cienkościennych. Pokazano, że mapy rozkładu lokalnej liczby falowej mogą być użyte do wykrywania uszkodzeń zarówno w strukturach jednorodnych jak i kompozytowych. Prezentowana metoda wykorzystuje bezkontaktowy pomiar, który umożliwia stosunkowo szybką inspekcję dużych powierzchni. Do wzbudzenia pola falowego w strukturze można wykorzystać zarówno wymuszenie przetwornikiem kontaktowym, jak i laserem impulsowym. To drugie rozwiązanie umożliwia wykonywanie w pełni bezkontaktowych inspekcji.

### Podziękowania

Badania przeprowadzono w ramach projektu LIDER/2/0117/L-7/15/NCBR/2016 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Autorzy pragną podziękować firmie Tworzywa Sztuczne PZL Mielec Sp. z o.o. sp.k., za udostępnienie materiału do badań.

## 5. Literatura

- [1] Stepinski, T., Uhl, T., & Staszewski, W. (2013). *Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications*. Wiley.
- [2] Pieczonka, Ł., Ambroziński, Ł., Staszewski, W. J., Barnoncel, D., & Pérès, P. (2017). Damage detection in composite panels based on mode-converted Lamb waves sensed using 3D laser scanning vibrometer. *Optics and Lasers in Engineering*, 99(June 2016), 80–87.
- [3] Kudela, P., Radziński, M., & Ostachowicz, W. (2018). Impact induced damage assessment by means of Lamb wave image processing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 102, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.09.020>
- [4] Katunin, A., Dragan, K., & Dziendzikowski, M. (2015). Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. *Composite Structures*, 127, 1–9.
- [5] M. Ruzzene, “Frequency-wavenumber domain filtering for improved damage visualization,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 894, pp. 1556–1563, 2007.
- [6] T. E. Michaels and J. E. Michaels, “Application of acoustic wavefield imaging to non-contact ultrasonic inspection of bonded components,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 820 II, no. 2006, pp. 1484–1491, 2006.
- [7] E. B. Flynn, S. Y. Chong, G. J. Jarmer, and J. R. Lee, “Structural imaging through local wavenumber estimation of guided waves,” *NDT E Int.*, vol. 59, pp. 1–10, 2013.
- [8] M. D. Rogge and C. A. C. Leckey, “Characterization of impact damage in composite laminates using guided wavefield imaging and local wavenumber domain analysis,” *Ultrasonics*, vol. 53, no. 7, pp. 1217–1226, 2013.
- [9] J. Spytek, J. Mrowka, L. Pieczonka, and L. Ambrozinski, “Multi-resolution non-contact damage detection in complex-shaped composite laminates using ultrasound,” *NDT E Int.*, vol. 116, p. 102366, 2020, doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102366.
- [10] J. Spytek, L. Ambrozinski, and L. Pieczonka, “Evaluation of disbonds in adhesively bonded multilayer plates through local wavenumber estimation,” *J. Sound Vib.*, no. November, p. 116624, 2021, doi: 10.1016/j.jsv.2021.116624.