

Patrycja Pyzik<sup>1</sup>, Aleksandra Ziaja-Sujdak<sup>1</sup>, Krzysztof Grabowski<sup>1</sup>, Grzegorz Góra<sup>2</sup>, Łukasz Ambroziński<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

<sup>2</sup>Wytwórnia Sprzętu Komunikacyjnego "PZL-Świdnik" S.A., Świdnik

# Detekcja wad w połączeniach klejonych płyt aluminiowych z wykorzystaniem laserowo generowanych ultradźwięków

## Detection of disbond defects in adhesively bonded aluminum plates using laser-generated ultrasounds

### ABSTRACT

The paper presents an approach that utilizes laser for ultrasound excitation and measurement to study adhesively bonded aluminum plates in pulse-echo mode. The pulse laser beam generates shear waves propagating at an oblique angle from normal to the surface. The response is measured with a high-sensitivity Sagnac interferometer. To select the optimal distance between the transmitter and receiver, multiphysics numerical simulations were performed. The work presents imaging of bonding layer quality between aluminum 3 sheets of thickness 1, 1.5 and 3.5 mm. The results are shown for the defect in the first adhesive layer, however disbond imaging can also be performed for other layers.

**Keywords:** Laser Ultrasound, bonded joints, shear waves, disbond detection

### STRESZCZENIE

W referacie zostało przedstawione podejście wykorzystujące laserowe wzbudzenie i pomiar ultradźwięków do badania połączeń klejonych blach aluminiowych w trybie echa. Wiązka lasera impulsowego została tak zogniskowana, aby generować falę poprzeczną propagującą pod kątem od normalnej do powierzchni. W celu rejestracji odpowiedzi wykorzystano wysokoczuły interferometr zbalansowany typu Sagnac. Po to, aby dobrać optymalną odległość nadajnika i odbiornika wykorzystano wielofizyczne symulacje numeryczne. Przedstawiono obrazowanie połączeń między 3 blachami o grubościach 1, 1.5 i 3.5 mm. Ukazano obrazowanie wady w pierwszej warstwie kleju, jednak obrazowanie może być też wykonane dla innych warstw.

**Słowa kluczowe:** klejone płyty aluminiowe, detekcja wad, ultradźwięki generowane laserowo

### 1. Wstęp

Wielowarstwowe metalowe płyty klejone są powszechnie stosowane w wielu gałęziach przemysłu, w tym w energetyce jądrowej, branży motoryzacyjnej i lotniczej [1]. Porowatości oraz puste przestrzenie w warstwie kleju można wykryć m.in. za pomocą radiografii rentgenowskiej. Ta technika wymaga jednak dwustronnego dostępu do badanego materiału, jest stosunkowo wolna i nie może wykryć defektów o zerowej objętości, takich jak rozwarstwienia. Dlatego metody wykorzystujące ultradźwięki nadal są często wykorzystywane do badania tych struktur.

W przypadku typowych elementów konstrukcji lotniczych, łączone są z reguły od 2 do 4 płyt o grubości 0,5 - 4 mm w celu uzyskania pożądanej sztywności. W przypadku tych struktur wielokrotne odbicia fal i konwersje modów w kolejnych warstwach sprawiają, że interpretacja sygnału puls-echo jest niezwykle trudna. Dlatego tryb badań techniką przepuszczania pozostaje standardową procedurą, nawet jeśli nie może zapewnić dogłębnej rozdzielczości.

Wiele ograniczeń konwencjonalnych badań ultradźwiękowych zostało ostatnio zredukowanych za pomocą metod Laserowych Ultradźwięków (LU). Impulsy laserowe mogą generować sygnały szerokopasmowe, zapewniając rozdzielczość znacznie lepszą niż w przypadku klasycznych sond ultradźwiękowych. W przypadku kompozytów, fale podłużne odbijane od kolejnych warstw mogą tworzyć obrazy o jakości porównywalnej z rentgenowską tomografią komputerową [2].

W strukturach metalowych, metoda LU jest ograniczona, ponieważ nie może skutecznie wytwarzać fal podłużnych bez ablacji

powierzchni. Niemniej jednak, przy użyciu źródła laserowego, w metalach mogą być generowane inne mody fal. W literaturze opisane są zastosowania laserowo generowanych fal powierzchniowych [3], poprzecznych [4] oraz fal Lamb'a [5].

W niniejszej pracy zaprezentowane jest wykrywanie uszkodzeń na bazie LU w aluminiowych płytach klejonych. Generowane laserowo fale poprzeczne rozchodzą się pod kątem skośnym do badanej struktury. Jeśli nieciągłość leży na ich ścieżce propagacji, fala odbita propaguje się na powierzchnię, gdzie można ją wykryć. Znając kąt generowania fali i głębokość przewidywanych defektów, położenie detektorów optycznych można regulować tak, aby zmaksymalizować czułość systemu.

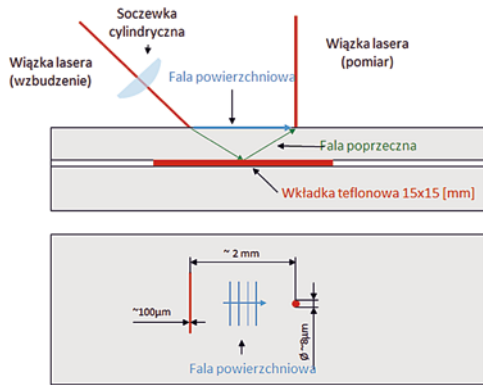
### 2. Badania eksperymentalne

#### 2.1 Tor pomiarowy

Eksperymenty przeprowadzono przy użyciu skanera LU opisanego szczegółowo w [6]. Tor pomiarowy przedstawiono schematycznie na rys. 1. Wiązkę laserową zogniskowano za pomocą cylindrycznej soczewki, aby utworzyć ciekłą linię na powierzchni próbki. Na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych odległość źródło-odbiornik dobrano jako 2 mm.

Badana próbka składała się z trzech płyt aluminiowych (o grubości 1; 1,5 i 3,5 mm) połączonych ze sobą cienką warstwą kleju epoksydowego. Wkładka teflonowa 15 x 15 mm została umieszczona między pierwszą, a drugą warstwą. Próbkę przymocowano do skanera mechanicznego i zbadano w obszarze uszkodzenia z rozdzielczością 0,02 mm. Sygnały uśredniono przestrzennie za pomocą dwuwymiarowego okna Gaussa (15 x 15 punktów) i filtru dolnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia 9 MHz.

\*Autor korespondencyjny. E-mail: ambrozin@agh.edu.pl



Rys. 1. Tor pomiarowy wykorzystujący technikę laserowych ultradźwięków

Fig. 1. Schematics of the experimental setup for the laser ultrasound technique

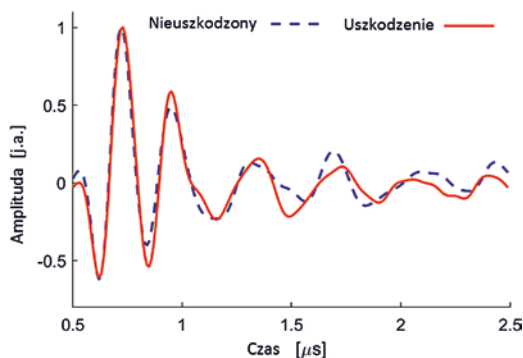


Rys. 2. Przekrój badanej próbki. Trzy warstwy aluminiowe połączone klejem epoksydowym

Fig. 2. Cross-section of the tested sample. Three aluminum layers bonded with epoxy adhesive

## 2.2 Wyniki

Zarejestrowane sygnały zostały przefiltrowane oraz uśrednione zgodnie z powyższym opisem. Przykładowe sygnały czasowe (A-skany) zarejestrowane w obszarze uszkodzonym i nieuszkodzonym są pokazane na Rys.3.



Rys. 3. Porównanie A-skanów zarejestrowanych w nieuszkodzonym i uszkodzonym obszarze próbki

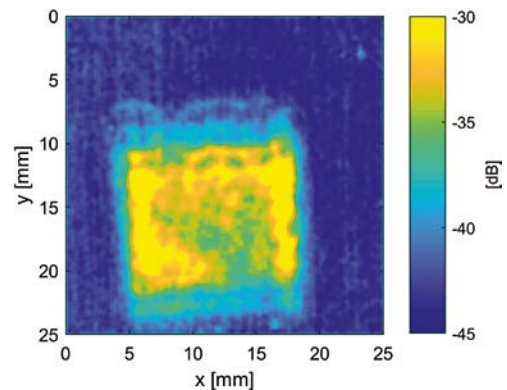
Fig. 3. Comparison of A-scan signals acquired over undamaged and damaged area of the sample

Globalne maksimum sygnału widoczne dla ok.  $0.7 \mu\text{s}$  odpowiada fali powierzchniowej, która utrudnia interpretację uzyskanego wyniku. Aby skupić się na różnicach sygnałów związanych z defektem, otrzymane dane zostały poddane procesowi filtracji odwrotnej, opisaną bardziej szczegółowo w [7]. Następnie, otrzymane dane zostały przedstawione na rys. 4. w formie zobrazowania typu C pokazującego amplitudę odbitej fali poprzecznej. Wyniki jednoznacznie pokazują umiejscowienie wkładki teflonowej.

## 3. Wnioski

W niniejszej pracy zaprezentowano metodę badania klejonych płyt aluminiowych przy użyciu laserowego wzbudzenia i pomiaru ultradźwięków. Chociaż fale podłużne nie mogą być skutecznie

wzbudzone w metalowych płytach za pomocą impulsów laserowych (bez ablacji materiału), struktury te można badać za pomocą innych typów fal. Przedstawione w tej pracy wyniki pokazują, iż klejone płyty aluminiowe można badać za pomocą fal poprzecznych efektywnie wzbudzonych pod kątem do normalnej powierzchni. Ze względu na złożoną naturę odbieranych sygnałów, identyfikacja indywidualnych odbić fal w strukturach wielowarstwowych może być trudna. Jednak odpowiednio dobrana odległość pomiędzy źródłem a detektorem pozwala zmaksymalizować czułość techniki pomiarowej. Proponowana metoda jest bezkontaktowa, szybka oraz daje wysokoczułe wyniki, pozwalając na ocenę nieciągłości m.in. w materiałach klejonych.



Rys. 4. Zobrazowane wkładki teflonowej przedstawiające amplitudę odbitej fali poprzecznej

Fig. 4. Result of Teflon insert imaging by the amplitude of the reflected shear wave

## 4. Podziękowanie

Przedstawione wyniki uzyskano w ramach realizacji projektu „Bezkontaktowe techniki laserowe do szybkich ultradźwiękowych badań nieniszczących metalowych elementów konstrukcyjnych” Nr LIDER/15/0085/L-8/16/NCBR/2017, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

## 5. Literatura

- [1] Guyott, C. C. H., Cawley, P., and Adams, R. D., 1986, “The Non-Destructive Testing of Adhesively Bonded Structure: A Review,” *J. Adhes.*, 20(2), pp. 129–159.
- [2] Pelivanov, I., Ambroziński, Ł., Khomenko, A., Koricho, E. G., Cloud, G. L., Haq, M., and O’Donnell, M., 2016, “High Resolution Imaging of Impacted CFRP Composites with a Fiber-Optic Laser-Ultrasound Scanner,” *Photoacoustics*, 4(2), pp. 55–64.
- [3] Aindow, A. M., Dewhurst, R. J., Hutchins, D. A., and Palmer, S. B., 1981, “Laser-generated Ultrasonic Pulses at Free Metal Surfaces,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 69(2), pp. 449–455.
- [4] Davies, S. J., Edwards, C., Taylor, G. S., and Palmer, S. B., 1993, “Laser-Generated Ultrasound: Its Properties, Mechanisms and Multifarious Applications,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 26(3), pp. 329–348.
- [5] Hutchins, D. A., Lundgren, K., and Palmer, S. B., 2005, “A Laser Study of Transient Lamb Waves in Thin Materials,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(4), pp. 1441–1448.
- [6] Pelivanov, I., Shtokolov, A., Wei, C. W., and O’Donnell, “Ultrasound System for Robust Inspection of Composites,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 62(9), pp. 1696–1703.
- [7] Ambroziński, L. et al. (2019) ‘Detection of disbonds in adhesively bonded aluminum plates using laser ultrasound’, in 46th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Portland.