

Magdalena Rucka\*

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

# Badania nieniszczące i monitoring elementów konstrukcji budowlanych w warunkach laboratoryjnych

## Non-destructive testing and health monitoring of structural elements in laboratory conditions

### ABSTRACT

The paper presents the results of diagnostics of structural elements in laboratory conditions using the mechanical wave propagation method. The tests were carried out on a steel plate, an adhesive lap joint and a bolted flange joint. The research was focused on acquiring and recognizing damage patterns for elements with defects of known geometry and controlled failure. The laboratory tests made it possible to test the effectiveness of the analysed methods and to select diagnostic indicators.

**Keywords:** non-destructive testing; structural health monitoring; damage detection; wave propagation; laboratory testing

### STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki przykładowych badań diagnostycznych elementów konstrukcji inżynierskich w warunkach laboratoryjnych metodą propagacji fal mechanicznych. Testom poddano płytę stalową, zakładkowe połączenie klejone oraz czołowe połączenie śrubowe. Badania ukierunkowano na pozyskiwanie i rozpoznawanie wzorców uszkodzeń dla elementów i defektów o znanej geometrii oraz kontrolowanym sposobie zniszczenia. Przeprowadzone badania laboratoryjne umożliwiły przetestowanie efektywności analizowanych metod oraz wytypowanie wskaźników diagnostycznych.

**Słowa kluczowe:** ocena techniczna, metody nieniszczące, metody seminieniszczące

### 1. Wstęp

Podstawowym warunkiem bezpiecznego użytkowania obiektów infrastruktury technicznej jest efektywne wykrycie uszkodzeń na jak najwcześniejszym etapie ich rozwoju oraz wskazanie ich lokalizacji. Najprostsza metoda oceny stanu konstrukcji polega na diagnostyce wizualnej wykonywanej in-situ przez doświadczonych inżynierów. Wraz z rozwojem technik pomiarowych, rozwinęła się nowa dziedzina wiedzy, jaką jest ocena nieniszcząca (ang. non-destructive evaluation – NDE). Można ją zdefiniować jako proces oceny aktualnego stanu technicznego konstrukcji bez naruszania jej integralności [1]. Ocena nieniszcząca może być przeprowadzana na dwa sposoby: jako badania nieniszczące (ang. non-destructive testing – NDT) oraz jako monitoring techniczny konstrukcji (ang. structural health monitoring – SHM). Testowanie nieniszczące NDT polega na wykorzystaniu metodologii NDE w badaniach okresowych, stosowanych lokalnie do elementów konstrukcji w trybie offline, natomiast w zagadnieniach monitoringu konstrukcji metody NDE wykorzystywane są w trybie online.

Gwałtowny rozwój metod nieniszczących nastąpił w latach 60. XX wieku (np. [2], [3]) i był związany z postępowaniem w konstruowaniu urządzeń pomiarowych. Istnieje wiele technik badań nieniszczących (zob. [4], [5], [6]). W budownictwie szczególne znaczenie mają metody wykorzystujące drgania konstrukcji [7], metody bazujące na propagacji fal ultradźwiękowych (np. metoda fal Lamba [8], [9], metoda

młoteczkowa [10], [11], metoda odpowiedzi na impuls [6]) oraz metody bazujące na propagacji fal elektromagnetycznych, takie jak metoda georadarowa [12], termograficzna [13] czy też radiologiczna [14]. Metody NDT są powszechnie wykorzystywane do badań konstrukcji budowlanych, np. mostowych [10], posadzek [15] czy też przemysłowych [16]. Obiekty inżynierskie o szczególnym znaczeniu (np. mosty, hale widowiskowe) są wyposażane w systemy monitoringu technicznego, za pomocą w sposób ciągły można dokonywać oceny stanu technicznego (np. [17], [18], [19], [20], [21]).

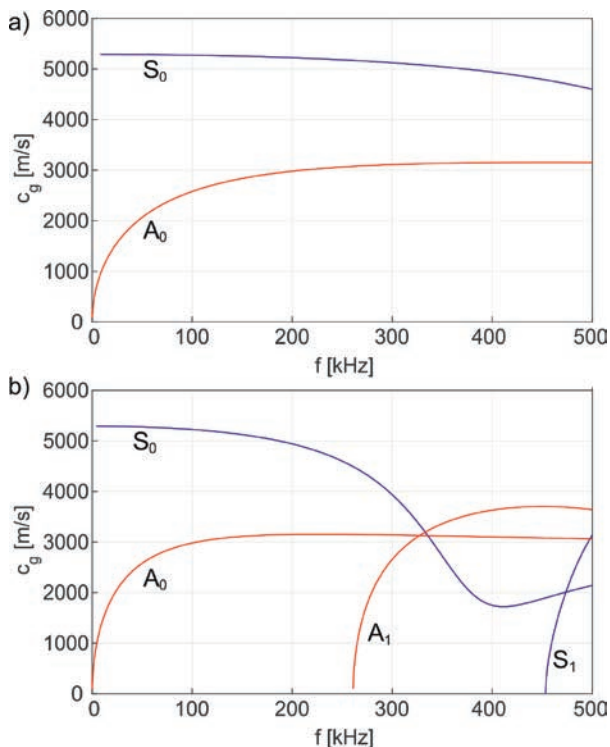
Główną trudnością w efektywnym wykorzystywaniu metod nieniszczących w diagnostyce rzeczywistych obiektów jest interpretacja danych pomiarowych. W celu sprawdzenia zakresu stosowalności danej metody oraz jej wrażliwości na rozwijające się uszkodzenie, często pierwszym krokiem jest jej przetestowanie na obiektach wzorcowych w skali laboratoryjnej. Niniejsza praca poświęcona jest przedstawieniu wybranych przykładów badań nieniszczących oraz monitorowania stanu technicznego. Testy przeprowadzono z wykorzystaniem technik propagacji fal mechanicznych na modelach konstrukcji inżynierskich w warunkach laboratoryjnej.

### 2. Podstawy teoretyczne metody propagacji fal mechanicznych

Fala mechaniczna jest to zaburzenie rozchodzące się w ośrodku sprężystym. W przypadku fal o częstotliwościach większych niż 20 kHz, mówimy o falach ultradźwiękowych. Fale mechaniczne w ośrodkach przestrzennie nieograniczonych mogą propagować jako podłużne

\*Autor korespondencyjny. E-mail: magdalena.rucka@pg.edu.pl

i poprzeczne. W praktyce ośrodek możemy traktować jako nieograniczony, jeżeli najmniejszy wymiar elementu jest dużo mniejszy niż długość fali. Natomiast w ośrodkach przestrzennie ograniczonych w wyniku nakładania się fal podłużnych i poprzecznych powstaje nowy rodzaj fal, tzw. fale prowadzone (ang. guided waves). Mogą one propagować w prętach, płytach, powłokach, których grubość jest rzędu długości fali. Fale prowadzone są falami silnie dyspersyjnymi. Oznacza to, że prędkość ich rozchodzenia zależy od częstotliwości. Dlatego w analizie sygnałów propagujących fal ultradźwiękowych kluczowe są krzywe dyspersji, przedstawiające zależność prędkości grupowej (lub fazowej) od częstotliwości.



Rys. 1. Krzywe dyspersji modów symetrycznych i antysymetrycznych fal Lamba dla płyty stalowej o grubości 3 mm (a) oraz 6 mm (b).  
Fig. 1. Dispersion curves for symmetric and antisymmetric Lamb wave modes for a steel plate with a thickness of 3 mm (a) and 6 mm (b).

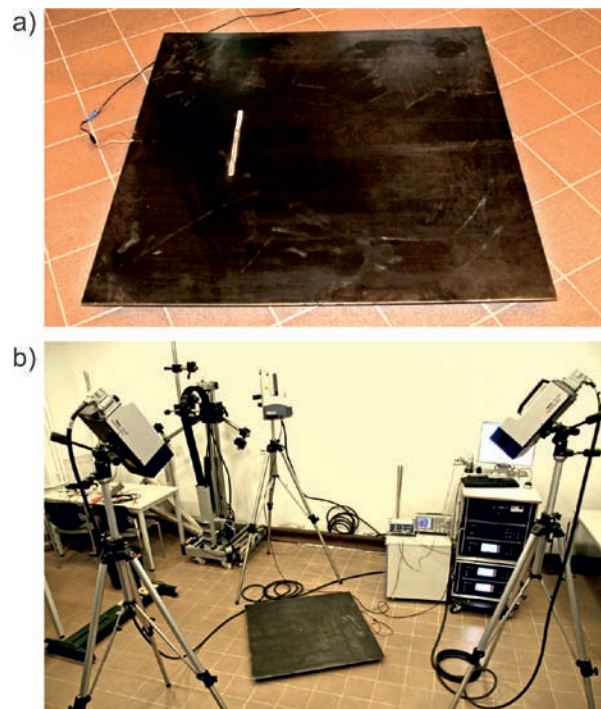
Krzywe dyspersji uzyskuje się w wyniku rozwiązania równania Pochhammera-Chree (dla prętów kołowych) lub równania Rayleigha-Lamba (dla płyt) [8]. Na rysunku 1 pokazano przykładowe krzywe dyspersji dla płyty stalowej o grubości 3 mm oraz 6 mm. Widoczne jest, że nawet dla najniższej częstotliwości mogą wystąpić dwa tryby: symetryczny (S) oraz antysymetryczny (A). W przypadku płyty o grubości 3 mm, w analizowanym zakresie do 500 kHz występują jedynie tryby podstawowe:  $S_0$  oraz  $A_0$ . Wraz ze wzrostem grubości płyty, pojawiają się wyższe tryby ( $A_1$ ,  $S_1$ ). W diagnostyce konstrukcji najczęściej pożądane jest wzbudzenie wyłącznie trybów podstawowych, z uwagi na fakt, iż propagacja większej liczby trybów wiąże się ze znaczną komplikacją procesu wykrywania uszkodzeń. Na podstawie krzywych dyspersji można zatem dokonać wyboru częstotliwość wzbudzenia fali w badanym obiekcie.

### 3. Przykłady badań laboratoryjnych

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań doświadczalnych przeprowadzanych z wykorzystaniem metod ultradźwiękowych. Obiektami badawczymi były modele konstrukcji inżynierskich, takie jak płyta stalowa, połączenia klejone oraz połączenia śrubowe. Badania ukierunkowano na pozyskiwanie i rozpoznawanie wzorców uszkodzeń dla elementów i defektów o znanej geometrii oraz kontrolowanym sposobie zniszczenia.

#### 3.1 Lokalizacja uszkodzeń w płycie stalowej

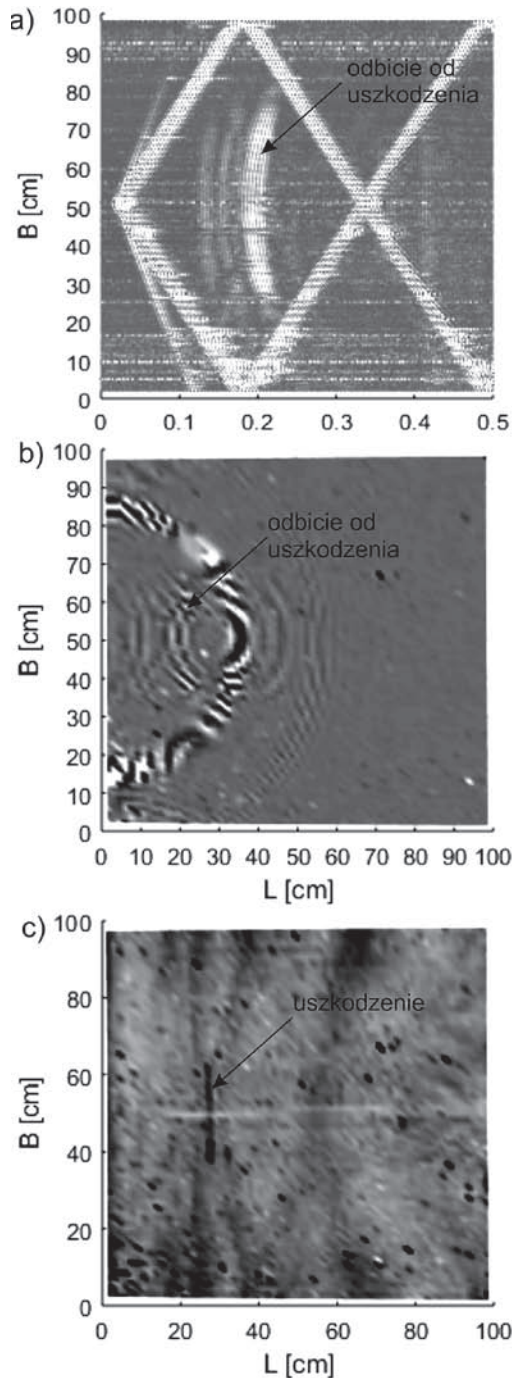
Badania przeprowadzono na płycie stalowej (rysunek 2a) o wymiarach 100 cm x 100 cm i grubości 5 mm, w której wycięto uszkodzenie o wymiarach 25 cm x 1,25 cm i głębokości 2,5 mm [9]. Do wzbudzenia fal użyto aktuator piezoelektryczny Noliac CMAP11. Wymuszenie w postaci paczki falowej o 5 cyklach sinusoidy częstotliwości 200 kHz modulowanej oknem Hanninga przyjęto jako prostopadłe do powierzchni płyty w celu wzbudzenia głównie modu antysymetrycznego  $A_0$  i zminimalizowania wpływu modu  $S_0$ . Pomiary propagacji fal wykonano wibrometrem laserowym skanującym Polytec PSV-3D-400-M (rysunek 2b) w dwóch ustawieniach. W pierwszym z nich mierzono sygnały wzdłuż pionowej linii umieszczonej przy lewej krawędzi płyty (161 punktów pomiarowych), natomiast w drugim – na całej powierzchni płyty (65x65 punktów pomiarowych).



Rys. 2. Badana płyta stalowa z uszkodzeniem (a) oraz stanowisko pomiarowe (b).

Fig. 2. Tested steel plate with defect (a) and experimental setup (b).

Wyniki pomiarów pokazane są na rysunku 3. Analizując skan liniowy (rysunek 3a), można dostrzec wyraźne odbicie od uszkodzenia. Odbicie zawiera czoła dwóch fal, tj. propagujących z niższą prędkością mod  $A_0$  (dominujący) oraz z wyższą prędkością mod  $S_0$ . Bazując na danych prędkości



Rys. 3. Zobrazowanie uszkodzenia w płycie stalowej w postaci planu czasowo-przestrzennego (a), pola fal sprężystych dla  $t = 0,12$  ms (b) oraz ważonej średniej kwadratowej (c).

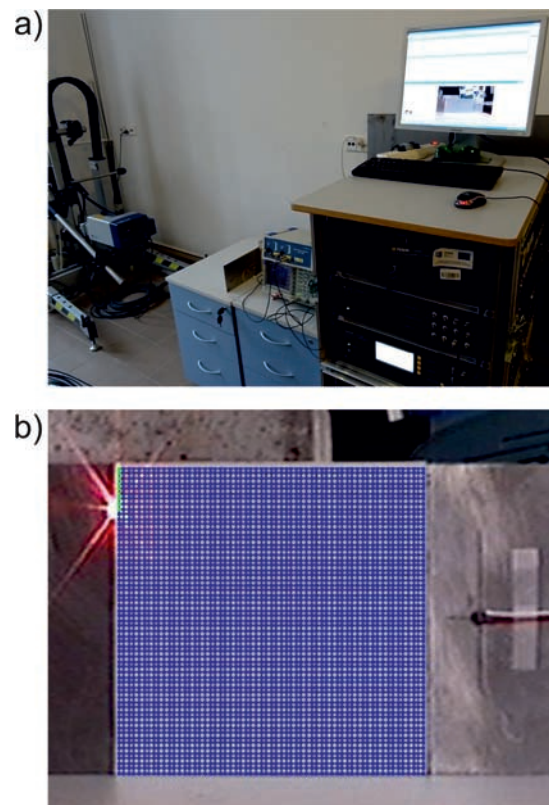
Fig. 3. Damage identification in steel plate in the form time-position plane (a), guided wavefield at  $t = 0,12$  ms (b) and weighted mean root square (c).

grupowej fali oraz czasie odbicia, możliwe jest określenie położenia defektu w stosunku do lewej krawędzi. Dodatkowo z obserwacji planu czasowo-przestrzennego możliwe jest oszacowanie długości uszkodzenia na podstawie rozmiaru fali odbitej. Na rysunku 3b widoczne jest pole fal sprężystych (tj. dwuwymiarowy obraz konstrukcji) w wybranej chwili czasowej ( $t = 0,12$  ms). Na podstawie czoła fali propagującej i odbitej można zidentyfikować miejsce położenia uszkodzenia. Najlepsze zobrazowanie lokalizacji i rozmiarów defektu

uzyskano za pomocą ważonej średniej kwadratowej (rysunek 3c) obliczonej dla 4225 sygnałów pomierzonych na całej powierzchni płyty.

### 3.2 Lokalizacja uszkodzeń w połączeniu klejonym dwóch blach

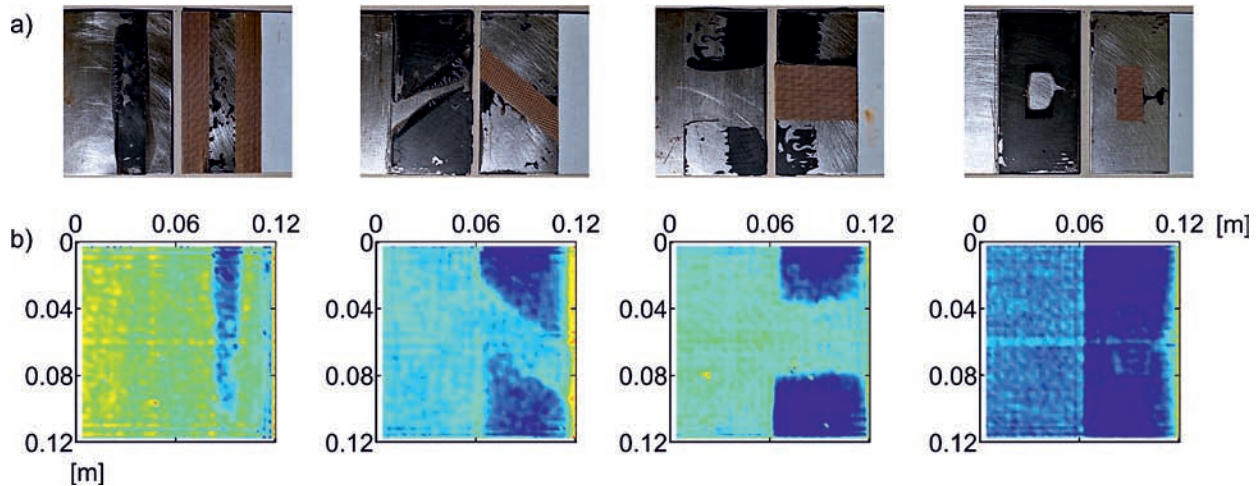
Przedmiotem badań było zakładkowe połączenie dwóch blach stalowych o wymiarach 12 cm x 27 cm i grubości 3 mm [22]. Blachy zostały połączone na długości 6 cm przy użyciu kleju epoksydowego Loctite EA 9461. Badanie polegało na wzbudzeniu fal Lamba za pomocą przetwornika piezoelektrycznego Noliac NAC2024 oraz pomiarze sygnałów w punktach rozłożonych na powierzchni złącza za pomocą laserowego wibrometru skanującego PSV-3D-400-M. Wzbudzenie miało postać paczki falowej o 5 cyklach i częstotliwości 200 kHz. Stanowisko pomiarowe oraz widok na próbkę przez kamerę wibrometru pokazano na rysunku 4. Badaniom poddano złącza z różnymi wariantami uszkodzenia wprowadzonego w postaci braku kleju na zadanych powierzchniach. W miejscach planowanych defektów na jednej z blach przyklejono taśmę teflonową (rysunek 5a).



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe (a) oraz widok na próbkę przez kamerę wibrometru (b).

Fig. 4. Experimental setup (a) and view of the sample through a vibrometer camera (b).

Pomierzone sygnały poddano przetwarzaniu z użyciem ważonej średniej kwadratowej. Wartości średniej kwadratowej uzyskane w obszarach defektów mają wartości zbliżone do pojedynczej płyty, co świadczy o braku kontaktu między blachami w tych miejscach. Na podstawie analizy uzyskanych map (rysunek 5b) możliwe było zidentyfikowanie zarówno położenia, jak i rozmiarów defektów.



Rys. 5. Fotografie badanych próbek po otwarciu blach (a) oraz mapy uszkodzeń wskazujące położenie defektów (b).  
Fig. 5. Photographs of tested specimens after separation (a) and damage maps indicating localization of defects (b).

### 3.3 Monitorowanie siły sprężającej w połączeniu czołowym

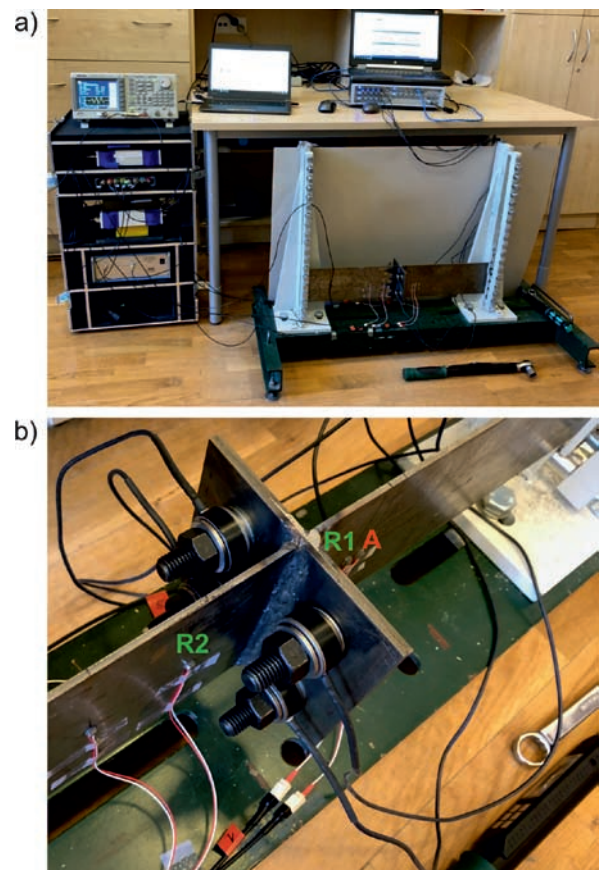
Testom poddano złącze czołowe składające się z dwóch płaskowników o wymiarach 12 cm x 24 cm i grubości 3 mm oraz dospawanych do nich blach doczołowych o wymiarach 12 cm x 12 cm. Blachy doczołowe połączone ze sobą przy użyciu czterech śrub klasy 10.9 o średnicy 12 mm. Śruby zostały sprężone za pomocą klucza dynamometrycznego. Do pomiaru siły sprężającej w każdej ze śrub użyto czujnik siły PCB model 054212-01084. Na rysunku 6 pokazano stanowisko pomiarowe. Do wzbudzenia i pomiaru fal Lamba użyto przetworniki piezoelektryczne Noliac NAC2024 (A – aktuator, R1 oraz R2 – odbiorniki zamocowane po obu stronach połączenia). Wzbudzenie przyjęto jako paczkę falową o 5 cyklach i częstotliwości 100 kHz.

W trakcie eksperymentu stopniowo zwiększano wartość momentu dokręcającego, powodując wzrost siły sprężającej. Dla poszczególnych wartości siły dokonywano pomiarów fal Lamba. Następnie obliczono wartość energii dla każdego z sygnałów. Na rysunku 7 zobrazowano rozkład energii w zależności od siły w śrubie. Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że wartość energii na odbiorniku R1 maleje wraz ze wzrostem wartości siły. Spowodowane jest to faktem, iż wraz ze wzrostem siły sprężającej, większa część energii sygnału jest transmitowana do drugiej części połączenia. Odwrotną zależność zaobserwowano dla odbiornika R2. W tym przypadku, wraz ze wzrostem wartości siły sprężającej, następował wzrost energii sygnału rejestrowanego po drugiej stronie połączenia.

### 3.4 Monitorowanie rozwoju uszkodzeń w połączeniu klejonym

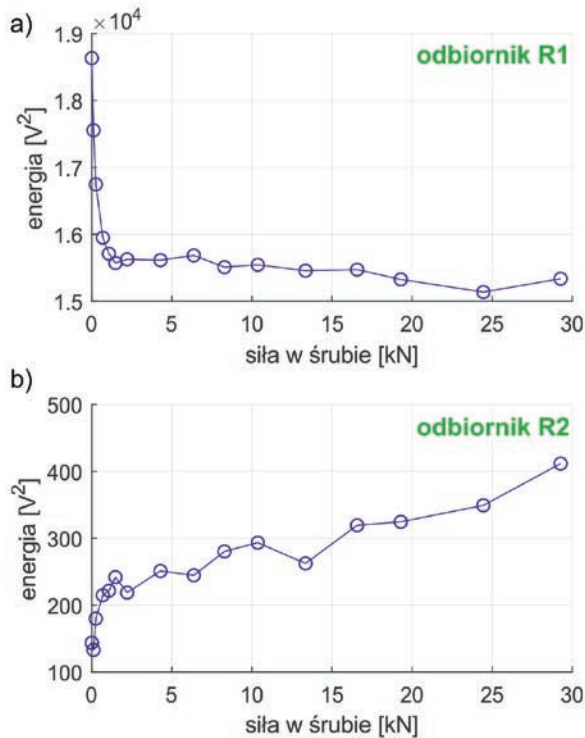
Doświadczenie przeprowadzono na klejonym połączeniu dwóch blach stalowych o wymiarach 12 cm x 27 cm i grubości 3 mm. Celem badania był monitoring połączenia (przeprowadzony w trybie ciągłym) poddanego degradacji mechanicznej. Próbką została umieszczona w maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z100 i rozciągana z prędkością 2 mm/min, aż do zerwania spoiny klejonej. Stanowisko pomiarowe oraz rozmieszczenie punktów pomiarowych

pokazano na rysunku 8. W trakcie rozciągania, fale ultradźwiękowe były automatycznie wyzwalane i zapisywane co 1 s. Łącznie pomierzono 180 sygnałów.

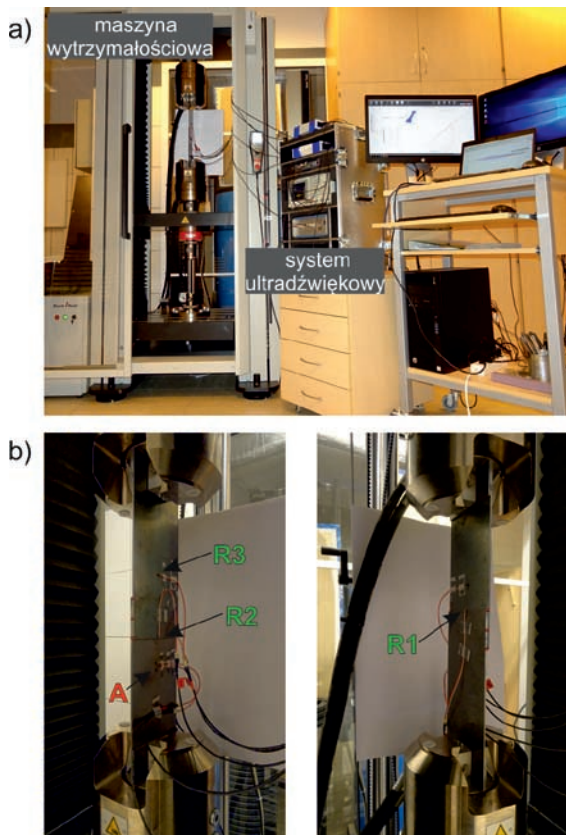


Rys. 6. Stanowisko pomiarowe (a) oraz lokalizacja punktów pomiarowych (b) w śrubowym połączeniu czołowym.  
Fig. 6. Experimental setup (a) localization of measurement points (b) in bolted flange joint.

Na rysunku 9 zobrazowano wyniki przeprowadzonego doświadczenia. Relacja siła-czas uzyskana z maszyny wytrzymałościowej (rysunek 9a) ma charakter quasi-liniowy. W celu sprawdzenia, czy nie występują w niej lokalne nieciągłości, sygnał ten poddano transformacji falkowej.

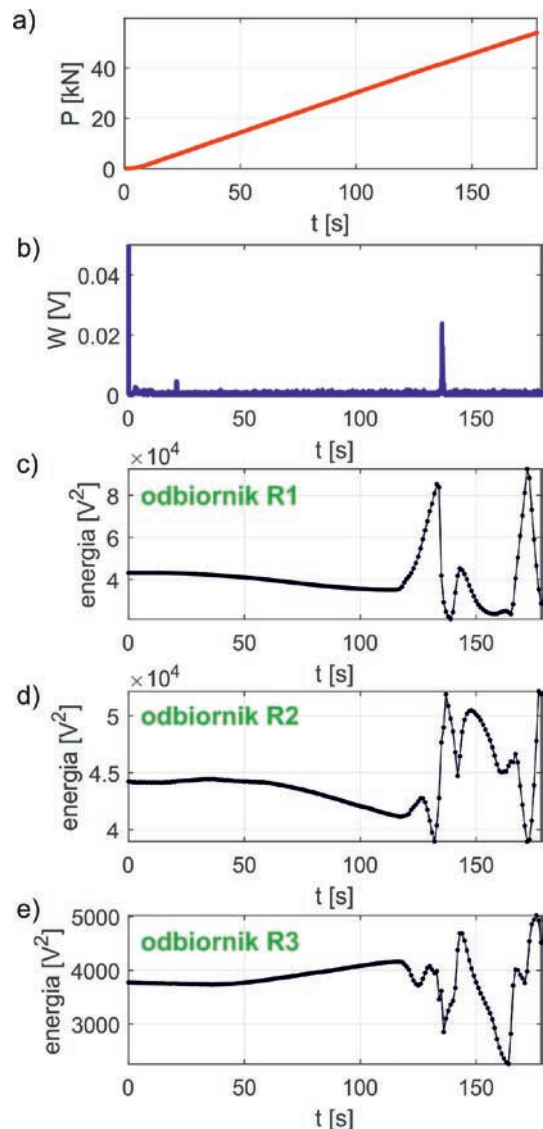


Rys. 7. Energia sygnałów zarejestrowana podczas monitoringu siły sprężającej przez odbiornik R1 (a) oraz R2 (b).  
Fig. 7. Signal energy recorded during the monitoring of the pre-tension force by receiver R1 (a) and R2 (b).



Rys. 8. Stanowisko pomiarowe (a) oraz lokalizacja punktów pomiarowych (b) w klejonym połączeniu zakładkowym.  
Fig. 8. Experimental setup (a) localization of measurement points (b) in adhesive lap joint.

Stwierdzono, że w wyniku otrzymano dwa piki wskazujące na czas wystąpienia dwóch zjawisk powodujących lokalny skok w relacji siła-czas (rysunek 9b). Pierwszy z nich, na początku procesu rozciągania, związany jest z poślizgiem próbki w szczękach maszyny, natomiast drugi z uszkodzeniem próbki. Na rysunkach 9c-e pokazano energię sygnałów zarejestrowanych przez poszczególne odbiorniki. Można zaobserwować, że na początku procesu degradacji wartość energii utrzymuje się na zbliżonym poziomie. Po wystąpieniu pierwszego pęknięcia w próbce, zaobserwowano skok, a następnie gwałtowne zmiany energii aż do rozerwania połączenia.



Rys. 9. Zależność siła-czas (a), współczynnik transformaty falkowej (b) oraz energia sygnału zarejestrowana podczas monitoringu połączenia klejonego przez odbiornik R1 (c), R2 (d) oraz R3 (e).  
Fig. 9. Force-time relation (a), wavelet transform coefficient (b) and signal energy recorded during the monitoring of the adhesive joint by receiver R1 (c), R2 (d) and R3 (e).

#### 4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki przykładowych badań nieniszczących oraz monitoringu obiektów testowych warunkach laboratoryjnych. W rezultacie przeprowadzonych

badania stwierdzono, że pomiar sygnałów fal Lamba na powierzchni obiektu oraz ich dalsze przetwarzanie przy użyciu ważonej średniej kwadratowej umożliwiają identyfikację zarówno lokalizacji, jak i rozmiaru uszkodzenia. Analizując dane z monitoringu, zaobserwowano, że zmiany energii sygnałów fal Lamba mogą skutecznie wskazywać na wzrost lub spadek siły sprężającej oraz rozwój uszkodzeń. Przeprowadzone badania laboratoryjne umożliwiły przetestowanie efektywności analizowanych metod oraz wytypowanie wskaźników diagnostycznych.

#### Podziękowania

Praca została wykonana w ramach projektu nr 2015/19/B/ST8/00779, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

#### 5. Literatura/References

- [1] D. Adams, *Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [2] D. C. Worlton, "Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies," *J. Appl. Phys.*, vol. 32(6), pp. 967–971, 1961.
- [3] L. Brunarski, J. Basin, and R. Makarow, "Określenie jakości betonu w konstrukcjach przy zastosowaniu kompleksowej metody ultradźwiękowo-radiologicznej," *Przegląd Bud.*, vol. 3, pp. 373–376, 1960.
- [4] L. Runkiewicz, "Application of non-destructive testing methods to assess properties of construction materials in building diagnostics," *Archit. Civ. Eng. Environ.*, no. 2, pp. 79–86, 2009.
- [5] Ł. Drobiec, R. Jasiński, and A. Piekarczyk, *Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010.
- [6] J. Hoła and K. Schabowicz, "State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 5–18, 2010.
- [7] M. Rucka and K. Wilde, "Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates," *J. Sound Vib.*, vol. 297, no. 3–5, pp. 536–550, 2006.
- [8] J. L. Rose, *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [9] M. Rucka, *Guided Wave Propagation in Structures. Modelling, Experimental Studies and Application to Damage Detection*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2011.
- [10] M. Rucka and K. Wilde, "Non-destructive diagnostics of concrete cantilever beam and slab by impact echo method," *Diagnostyka*, vol. 3, no. 55, pp. 63–68, 2010.
- [11] A. Garbacz, T. Piotrowski, L. Courard, and L. Kwaśniewski, "On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis," *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 311–323, 2017.
- [12] J. Lachowicz and M. Rucka, "3-D finite-difference time-domain modelling of ground penetrating radar for identification of rebars in complex reinforced concrete structures," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 18, pp. 1228–1240, 2018.
- [13] A. Katunin, "A concept of thermographic method for non-destructive testing of polymeric composite structures using self-heating effect," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 1, 2018.
- [14] K. Schabowicz, Z. Ranachowski, D. Józwiak-Niedźwiedzka, Ł. Radzik, S. Kudela, and T. Dvorak, "Application of X-ray microtomography to quality assessment of fibre cement boards," *Constr. Build. Mater.*, vol. 110, pp. 182–188, 2016.
- [15] J. Hoła, Ł. Sadowski, and K. Schabowicz, "Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods," *Autom. Constr.*, vol. 20, no. 7, pp. 799–807, 2011.
- [16] Ł. Drobiec, "Diagnostyka konstrukcji przemysłowych," *Mater. Bud.*, vol. 2, pp. 32–34, 2015.
- [17] K. Wilde et al., "System ciągłej obserwacji stanu technicznego hali 'Olivia' w Gdańsku," *Inżynieria i Bud.*, vol. 10, pp. 552–556, 2009.
- [18] M. T. Yarnold and F. L. Moon, "Temperature-based structural health monitoring baseline for long-span bridges," *Eng. Struct.*, vol. 86, pp. 157–167, 2015.
- [19] M. Miskiewicz, L. Pyrzowski, J. Chroscielewski, and K. Wilde, "Structural Health Monitoring of Composite Shell Footbridge for Its Design Validation," in *2016 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, 2016, pp. 228–233.
- [20] M. Miśkiewicz, Ł. Pyrzowski, K. Wilde, and O. Mitrosz, "Technical Monitoring System for a New Part of Gdańsk Deepwater Container Terminal," *Polish Marit. Res.*, vol. 24, no. s1, pp. 149–155, 2017.
- [21] R. Xi, W. Jiang, X. Meng, H. Chen, and Q. Chen, "Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 120, pp. 128–139, 2018.
- [22] M. Rucka, E. Wojtczak, and J. Lachowicz, "Damage imaging in Lamb wave-based inspection of adhesive joints," *Appl. Sci.*, vol. 8, pp. 1–9, 2018.