

Maciej RADZIĘŃSKI<sup>1</sup>, Łukasz DOLIŃSKI<sup>1</sup>, Magdalena PALACZ<sup>1,2</sup>, Marek KRAWCZUK<sup>1,2</sup><sup>1</sup> POLITECHNIKA GDAŃSKA, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk<sup>2</sup> INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH PAN, Fiszerska 14, 80-231 Gdańsk

## Lokalizacja uszkodzeń konstrukcji z wykorzystaniem skaningowego wibrometru laserowego

**Mgr inż. Maciej RADZIĘŃSKI**

Jest asystentem w Katedrze Robotyki i Systemów Mechatroniki na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Jego praca naukowa obejmuje zagadnienia związane z wykrywaniem uszkodzeń w konstrukcjach z materiałów kompozytowych z zastosowaniem metod modalnych.



e-mail: maciej.radzienski@gmail.com

**Mgr inż. Łukasz DOLIŃSKI**

Jest asystentem w Katedrze Robotyki i Systemów Mechatroniki na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Jego praca naukowa obejmuje zagadnienia związane z wykrywaniem uszkodzeń w konstrukcjach z materiałów kompozytowych z zastosowaniem metod modalnych.



e-mail: ldolin@pg.gda.pl

**Dr inż. Magdalena PALACZ**

Jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Systemów Mechatroniki na WEiA PG i w IMP PAN Gdańsk. Jej praca naukowa obejmuje wibracyjne metody wykrywania uszkodzeń zmęczeniowych, badanie wpływu uszkodzeń zmęczeniowych na zmiany parametrów fizycznych konstrukcji, cyfrowe przetwarzanie sygnałów, optymalizację liczby i rozmieszczenia czujników pomiarowych.



e-mail: M.Palacz@pg.gda.pl

**Prof. dr hab. inż. Marek KRAWCZUK**

Jest kierownikiem Katedry Robotyki i Systemów Mechatroniki na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Jego tematyka badawcza obejmuje dynamikę maszyn, analizę drgań, metody numeryczne w mechanice, metodę elementów skończonych i spektralnych, materiały kompozytowe, oraz zagadnienia związane z detekcją i identyfikacją uszkodzeń. Prof. Marek Krawczuk jest członkiem Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej.



e-mail: mk@imp.gda.pl

### Streszczenie

Praca dotyczy zagadnienia lokalizacji uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych na podstawie laserowych pomiarów wibracyjnych. Badania przeprowadzono mierząc i analizując zmiany w propagującej się fali sprężystej w aluminiowym elemencie płytowym wywołane różnymi uszkodzeniami. Pomiary wykonano przy pomocy laserowego wibrometru skanującego PSV-400 firmy Polytec, wyposażonego w precyzyjny przetwornik optyczny używany do określenia prędkości drgającego punktu, mierzącego zmiany częstotliwości światła odbitego od drgającej powierzchni. W wyniku przeprowadzonych pomiarów zaobserwowano, że zaproponowane metody pozwalają z wysoką dokładnością zlokalizować uszkodzenie niewielkich rozmiarów występujące na powierzchni badanego obiektu. Jedna z metod wymaga informacji o stanie referencyjnym konstrukcji i charakteryzuje się bardzo krótkim czasem pomiaru. Druga metoda wymaga przeskanowania badanej powierzchni. Zaleta drugiego podejścia polega na tym, że informacje o stanie początkowym obiektu są niepotrzebne, wadą jest dłuższy czas pomiaru.

**Słowa kluczowe:** lokalizacja uszkodzeń, propagacja fali sprężystej, laserowy wibrometr skanujący.

### Localisation of damages in constructions with use of scanning laser vibrometer

#### Abstract

The paper is devoted to the problem of localising damage in structures with use of a scanning laser vibrometer. The investigations were performed by measurements and analysis of the changes in propagating elastic waves in an aluminium plate with various damages. The measurements were taken with the PSV-400 scanning laser vibrometer delivered by Polytec, Ltd. The vibrometer is equipped with a precise optical transducer used for determining the vibrating measurement point speed. The transducer measures changes of the frequency of light reflected from the vibrating surface. On the basis of measurements, it can be stated that proposed methods allow localisation of very small damages located on a measured surface with high precision. One of the methods tested requires the basal state information and its advantage is a very short time of acquisition. The second method requires a scan of the surface chosen. Its advantage is that no information on the object initial state is required, however its disadvantage is long scanning time.

**Keywords:** damage localisation, elastic wave propagation, laser scanning vibrometer.

## 1. Wprowadzenie

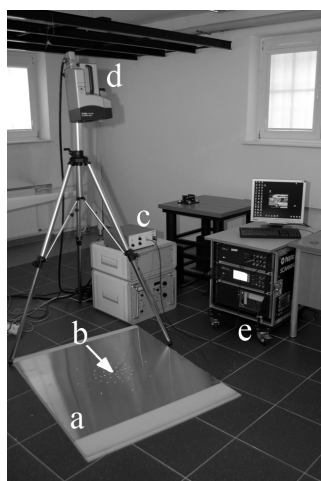
Wykrywanie uszkodzeń w formie pęknięć zmęczeniowych, delaminacji, pustek itp. w elementach konstrukcji stanowi poważny i nie do końca rozwiązany problem. Wykorzystywane w praktyce metody można ogólnie podzielić na metody lokalne oraz globalne. Metody lokalne (np. ultradźwiękowe, rentgenowskie, prądów wirowych, magnetyczne) charakteryzują się bardzo wysoką czułością, ale pozwalają w czasie jednego pomiaru zbadać jedynie mały fragment konstrukcji. Często także wymagają spełnienia szeregu dodatkowych wymagań (np. dostępność do badanych powierzchni, odpowiednie przygotowanie powierzchni badanego obiektów). Z kolei metody globalne (np. wibracyjne) są mniej czułe niż metody lokalne, nie mniej jednak umożliwiają zbadanie całej konstrukcji w jednym pomiarze. Jest to ich wyjątkowa zaleta, która powoduje że inspekcja dużych obiektów staje się zdecydowanie szybsza, niż w przypadku stosowania metod lokalnych.

W ostatnich latach obserwuje się coraz więcej prób wykorzystania propagujących fal sprężystych do stworzenia metod o globalnym charakterze. Jedną z podstawowych kwestii jest generowanie i rejestracja takich fal w obiektach, jak również analiza uzyskanych sygnałów. O ile zastosowanie aktuatorów wykonanych z ceramiki piezoelektrycznej do wzbudzania fal sprężystych nie powoduje żadnych problemów, o tyle ich wykorzystanie do odczytu propagującej fali może powodować pewne błędy. Dlatego też coraz częściej do odczytu propagującej fali stosuje się coraz lepsze rozwiązania optycznych technik pomiarowych.

W literaturze światowej pojawiają się pierwsze wzmianki dotyczące tego problemu. W pracy [1] przedstawiono wyniki pomiarów propagacji fal sprężystych uzyskane przy pomocy skanowania laserowego powierzchni badanego elementu. Wykazano, że możliwym jest zastosowanie opracowanej metody do wykrywania wad powierzchniowych konstrukcjach wykonanych z materiałów izotropowych. Z kolei w pracy [2] opisano zastosowanie skaningowego wibrometru laserowego do wizualizacji fal sprężystych

propagujących po powierzchni próbek betonowych. Przedstawiono przykłady ilustrujące zastosowanie metody Puls-Echo i Echo do wykrywania pęknięć w elementach betonowych. Badano także interakcję z pęknięciem zmęczeniowym, zarówno otwartym jak i zamykającym się, wykorzystując do tego celu optyczne techniki pomiarowe [3]. W pracy [3] omówiono metodę wykrywania położenia i wielkości uszkodzeń wykorzystującą powierzchniowe fale akustyczne i pomiary optyczne wykorzystujące dopplerowski skaningowy wibrometr laserowy. Proponowana metoda może być wykorzystywana w monitorowaniu stanu technicznego konstrukcji lotniczych. W pracy [5] badano interakcję fal Lamba propagujących w płytach kompozytowych z defektami w postaci delaminacji. W trakcie badań eksperymentalnych z wykorzystaniem interferometru laserowego zaobserwowano konwersje modów propagującej fali, która może być wykorzystywana w technikach wykrywania tego typu uszkodzeń.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metod umożliwiających wykrywanie uszkodzeń w konstrukcji w oparciu o zmierzone anomalie w propagującej fali sprężystej. Badania wykonano na płytach aluminiowych z różnego rodzaju uszkodzeniami modelowanymi między innymi dodatkową masą. Za pomocą dodatkowych mas modeluje się nieciągłości w strukturze materiału, które z powodzeniem mogą być traktowane jak potencjalne źródła wad. Dodatkową masę można łatwo zamontować i zdemontować bez potrzeby niszczenia próbki. Taka praktyka jest bardzo powszechna w środowisku naukowym zajmującym się tematyką identyfikacji uszkodzeń.



Rys. 1. Stanowisko badawcze: a – analizowany obiekt, b – aktuator piezoelektryczny, c – wzmacniacz, d – głowica wibrometru, e – jednostka sterująca.

Fig. 1. Experimental set: a – analysed structure, b – piezoelectric actuator, c – amplifier, d – scanning head, e – steering unit.

Fale sprężyste wzbudzano wykorzystując aktuator piezoelektryczny pobudzany do drgań sygnałem w postaci paczki (3 okresy sinusoidy modulowane oknem Hanninga) o częstotliwości nośnej 35 kHz. Rejestracja sygnałów wykonywana była przy pomocy skaningowego wibrometru laserowego firmy Polytec, model PSV400. Tak uzyskane przebiegi propagującej fali wykorzystano do obliczenia wartości RMS, które okazały się doskonałym źródłem informacji o położeniu i kształcie uszkodzenia.

## 2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym w Laboratorium Wibracyjnych Pomiarów Laserowych, Katedry Robotyki i Systemów Mechatroniki, Politechnika Gdańska. Widok stanowiska pomiarowego przedstawia rys. 1. Stanowisko składa się z laserowego wibrometru skanującego PSV400 firmy Polytec. Urządzenie jest wyposażone w precyzyjny przetwornik optyczny służący do określenia prędkości drgającego punktu poprzez po-

miar zmiany częstotliwości światła odbitego od drgającej powierzchni. W skład zestawu wibrometru wchodzi: głowica pomiarowa, sterownik wibrometru, skrzynka przyłączeniowa (łącząca wszystkie moduły systemu) oraz jednostka sterująca (akwizycja danych, generator sygnału, jednostka obliczeniowa).

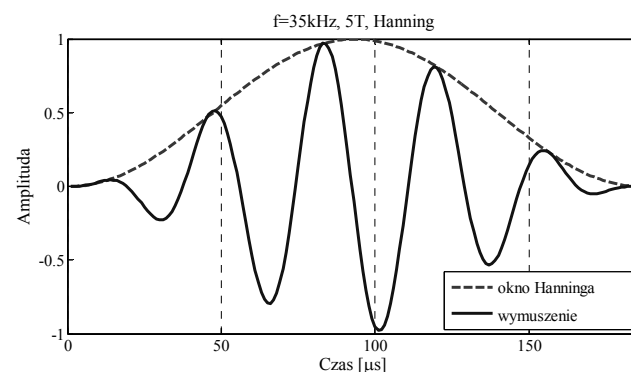
Do wzbudzenia sygnałów zastosowano aktuator piezoelektryczny firmy PIEZO SYSTEMS, Inc. Aktuator ten zbudowany jest z dwóch warstw piezoceramicznych, które odkształcają się po przyłożeniu napięcia do jego elektrod. Efekt zginania powstaje, gdy jedna z warstw zwiększa swoje wymiary, a druga się kurczy. Dokładny opis parametrów, z oznaczeniem producenta, stosowanego aktuatora zawiera tab. 1. W przypadku tego typu aktuatorów istnieje konieczność zastosowania wzmacniacza. Wybrano urządzenie dedykowane do elementów piezoelektrycznych typu EPA-104-230 firmy PIEZO SYSTEMS, Inc., [6].

Tab. 1. Dane techniczne zastosowanego aktuatora piezoelektrycznego  
Tab. 1. Data sheet of the piezoelectric actuator used

Oznaczenie	T216-A4NO-373X
Waga [g]	2,5
Średnica [mm]	31,8
Szttywność [N/m]	$20 \times 10^3$
Pojemność [nF]	27
Napięcie znamionowe [Vp]	$\pm 180$
Częstotliwość rezonansowa [Hz]	1,170
Swobodne wygięcie [ $\mu\text{m}$ ]	$\pm 119$

Celem badań było zlokalizowanie uszkodzeń w płycie aluminiowej o wymiarach  $1 \times 1 \times 0,001$  m. Uszkodzenia modelowano poprzez przyłożenie dodatkowych mas, rozmieszczonych w różnych punktach badanego obiektu oraz otwory i nacięcia o różnych wymiarach.

W obu przypadkach konstrukcję pobudzano do drgań sygnałem sinusoidalnym, modulowanym oknem Hanninga. Przebieg wymuszenia przedstawiony jest na rys. 2.



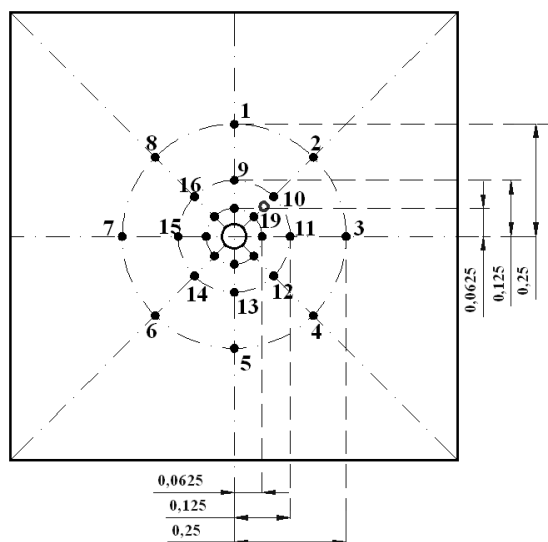
Rys. 2. Sygnał wymuszający  
Fig. 2. Excitation signal

### Metoda I – pomiar propagacji fali w wybranych punktach konstrukcji

W pierwszym etapie badań testowano możliwości wykrywania uszkodzeń przy zastosowaniu pomiaru propagacji fali sprężystej w wybranych punktach konstrukcji. Przyjęto układ 24 punktów pomiarowych rozmieszczonych równomiernie na trzech współśrodkowych okręgach (8 punktów na 1 okrąg), o promieniach odpowiednio 0,25; 0,125 i 0,625 m (rys. 3).

Uszkodzenie było symulowane poprzez dodatkową masę przyklejaną do powierzchni płyty. Masę umieszczono między punkta-

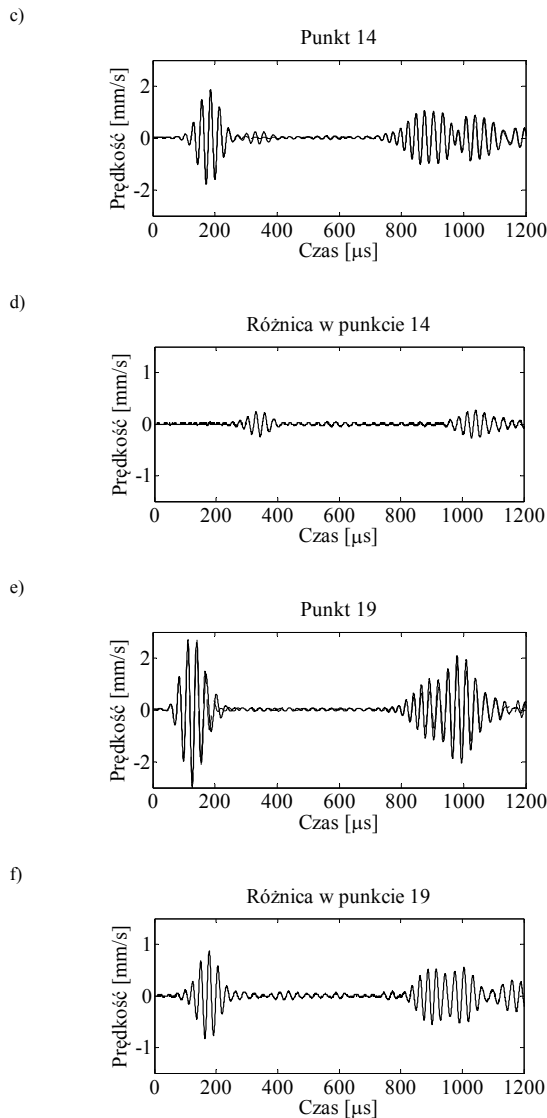
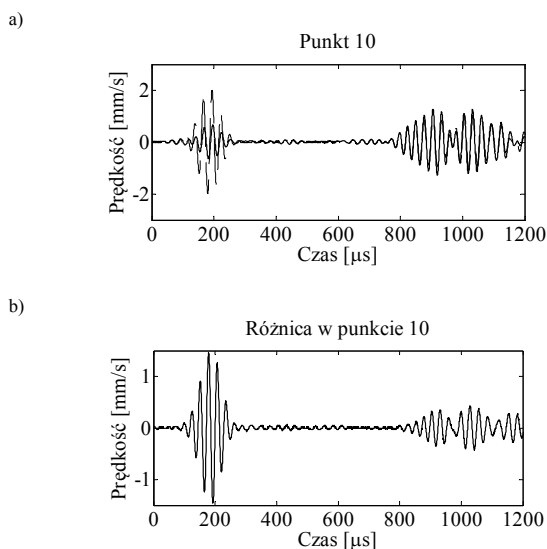
mi pomiarowymi oznaczonymi numerami 10 i 19 (rys. 3). Dodatkowa masa stanowiła 0,37% masy badanego obiektu.



Rys. 3. Układ punktów pomiarowych – metoda I  
Fig. 3. Arrangement of measurement points – metod I

Pomiar polegał na odczytaniu prędkości w kierunku prostopadłym do powierzchni płyty. W celu zwiększenia dokładności każdy pomiar powtarzano 100 razy co 50ms, a wyniki uśredniono. Czas trwania jednego pomiaru w każdym punkcie to 1,2 ms. Po tym czasie w rejestrowanym sygnale obserwowano pojawienie się wielu interferujących odbić, skutecznie utrudniających interpretację otrzymanych wyników.

Wykresy z rys. 4 przedstawiają wybrane sygnały zarejestrowane w punktach pomiarowych oznaczonych jako 10, 14 i 19 (rys. 3). Krzywe oznaczone literami (a), (c) oraz (e) przedstawiają przebiegi czasowe zarejestrowane dla konstrukcji bez uszkodzenia (linie przerywane) i z uszkodzeniem (linie ciągłe). Krzywe (b), (d) i (f) to różnice poprzednich przebiegów. Punkt 10 (rys. 4a) jest zlokalizowany 'za uszkodzeniem'. Dlatego amplituda sygnału przedstawionego linią ciągłą, jest dużo mniejsza niż w przypadku sygnału przedstawionego linią przerywaną – propagująca fala w miejscu uszkodzenia zostaje podzielona na część odbitą i przechodzącą przez uszkodzenie. Punkt 14 (rys. 4c) jest zlokalizowany 'przed uszkodzeniem', dlatego w sygnale zarejestrowanym w tym punkcie można wyraźnie zaobserwować odbicie od uszkodzenia. W podobny sposób zachowuje się fala zarejestrowana w punkcie 19 (rys. 4e).



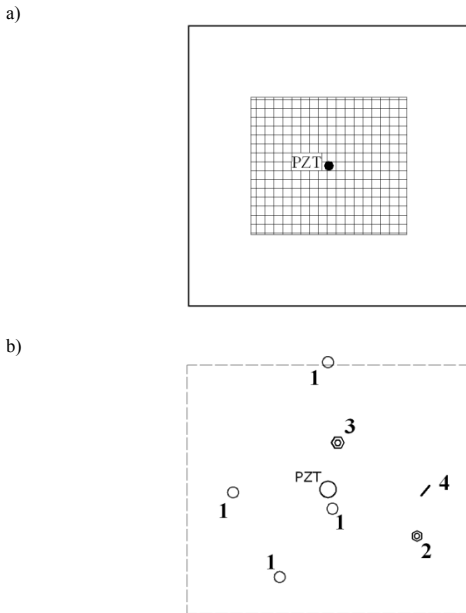
Rys. 4. Przebiegi czasowe rejestrowane w wybranych punktach  
Fig. 4. Signals registered at several measurement points

Dysponując pomiarami wykonanymi dla wszystkich punktów oraz danymi takimi jak prędkość propagacji fali, geometria konstrukcji i punktów pomiarowych, można na tej podstawie określić czas propagacji, a tym samym określić miejsce występowania uszkodzenia.

#### Metoda II – pomiar propagacji fali w wybranym obszarze konstrukcji

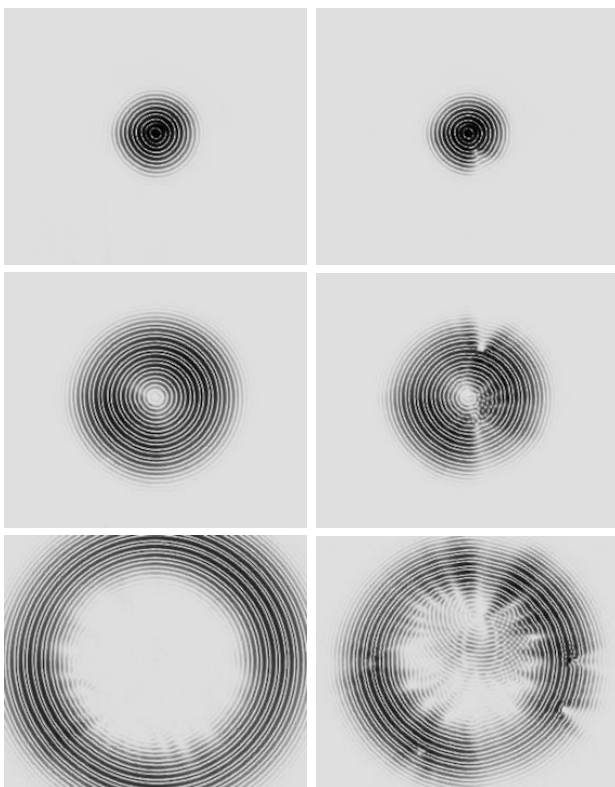
Metoda II polegała na pomiarze propagującej fali na wybranym fragmencie płyty – prostokąt o wymiarach  $0,555 \times 0,490$  m zlokalizowany w geometrycznym środku konstrukcji – rys. 5a. Pomiar odbywał się w 93011 punktach – siatka pomiarowa liczyła 331 linii pionowych i 281 linii poziomych. W tym przypadku analizowano układ uszkodzeń przedstawiony jest na rys. 5b. Uszkodzenia oznaczone cyfrą 1 to dodatkowe masy, każda stanowiąca 0,06% masy całkowitej konstrukcji, oznaczone cyfrą 2 – 0,09% masy całkowitej konstrukcji, cyfrą 3 – 0,37% masy całkowitej. Cyfra 4 oznacza nacięcie o długości 0,025 m.

W celu poprawienia jakości pomiarów (potencjalne rozproszenie wiązki lasera) na badanej powierzchni zastosowano folię retrorefleksyjną, której cechą charakterystyczną jest odbijanie światła w kierunku jego źródła.



Rys. 5. Widok obszaru na którym mierzono propagującą falę (a), przyjęty układ uszkodzeń (b)  
 Fig. 5. Area in which the propagating wave was measured (a), damages modelled (b)

Rys. 6 ilustruje propagację fali zarejestrowaną w wybranym obszarze konstrukcji w kilku chwilach czasowych dla obiektu bez uszkodzeń i z uszkodzeniami. Jak widać z przedstawionych wykresów nawet niewielkie uszkodzenia powodują zakłócenia, które mogą być skutecznie wykorzystane do zlokalizowania uszkodzeń w konstrukcji.

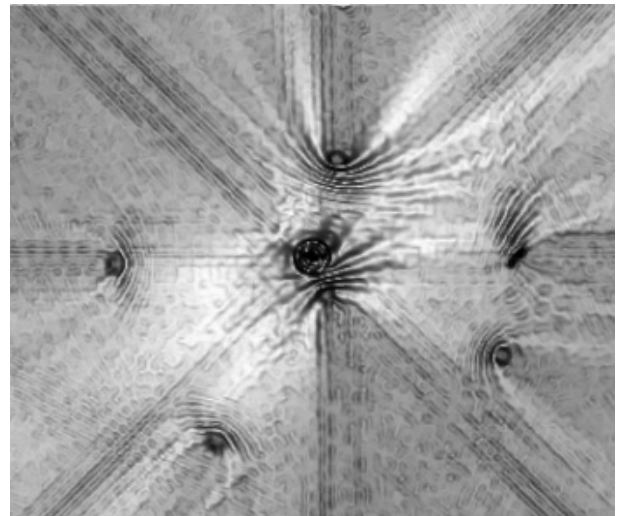


Rys. 6. Propagacja fali sprężystej (0,0762 ms, 0,1523 ms i 0,2383 ms) bez uszkodzeń (lewa kolumna) i z uszkodzeniami (prawa kolumna)  
 Fig. 6. Wave propagation (0,0762 ms, 0,1523 ms i 0,2383 ms) without (left hand-side) and with damages (right hand-side)

W celu zlokalizowania uszkodzeń wykonano obliczenia polegające na wyznaczeniu RMS (ang. root mean square), czyli średniej kwadratowej, zwanej też wartością skuteczną sygnału, dla każdego zarejestrowanego przebiegu. Rys. 7 przedstawia otrzymany RMS. Jak wynika z przedstawionego wykresu zaproponowana metoda pozwala zlokalizować każde z 7 umieszczonych uszkodzeń.

### 3. Wnioski

Przedstawiony artykuł omawia metody lokalizacji uszkodzeń w konstrukcji na podstawie zmian w propagującej fali sprężystej. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można powiedzieć, że proponowane metody pozwalają na lokalizowanie bardzo niewielkich uszkodzeń występujących na powierzchni konstrukcji. Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na czułość metody jest mocowanie aktuatora piezoelektrycznego do powierzchni jak również zastosowanie folii retrorefleksyjnej, poprawiającej jakość rejestrowanych sygnałów. Dalsze badania przewidują możliwość wykorzystania propagującej fali do lokalizacji uszkodzeń w elementach wykonanych z materiału anizotropowego.



Rys. 7. RMS  
 Fig. 7. RMS

*Praca została wykonana w ramach realizacji grantu 3028/B/T02/2009/37 finansowanego przez MNiSW.*

### 4. Literatura

- [1] NDT&E International, 41, pp.137-144, 2008.
- [2] Journal Nondestruction Evaluation, 27, pp.83-97, 2008.
- [3] NDT&E International, Elsevier 43 (2010) 432-439.
- [4] Ultrasonic 50, pp.76-80, 2010.
- [5] Composite Structures, 79, pp.229-233, 2007.
- [6] <http://www.piezo.com>
- [7] <http://www.polytec.com>
- [8] Journal of Sound and Vibration, no. 295, p. 753-780, 2006.
- [9] Smart Materials and Structures 13, p. 251-260, 2004.
- [10] Smart Materials and Structures 13, p. 261-269, 2004.
- [11] Smart Materials and Structures 14, p. 1387-1395, 2005.

otrzymano / received: 24.06.2010  
 przyjęto do druku / accepted: 02.08.2010

artykuł recenzowany