

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych (w tym materiały typu Glare) Composite metallic materials in aviation applications (including Glare-type materials)

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska,
Instytut Lotnictwa w Warszawie, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

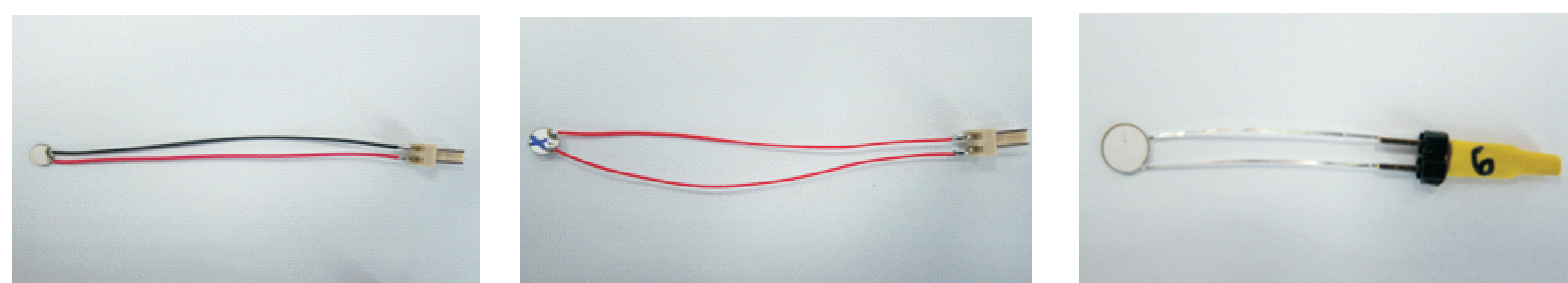
Wyniki badań Results

Plan badań na rok 2014:

- Opracowanie technologii implementacji sensorów i aktuatorów w lotniczych strukturach epoksydowo węglowych i epoksydowo szklanych oraz konstrukcji FML dla możliwości diagnozowania online.
 - Realizacja testów udarowo zmęczeniowych i diagnozowanie konstrukcji – Etap I (opracowanie autonomicznych metod oceny uszkodzeń dla założonych struktur).
 - Realizacja testów udarowo zmęczeniowych i diagnozowanie konstrukcji – Etap II (weryfikacja metod autonomicznej oceny uszkodzeń z wykorzystaniem diagnostyki nieniszczącej).
 - Opracowanie i wykonanie demonstratora konstrukcji 'inteligentnej' z wykorzystaniem sieci czujników i autonomicznych metod przetwarzania danych.
- Testowane są różne rodzaje przetworników PZT oraz przewodów zasilających:

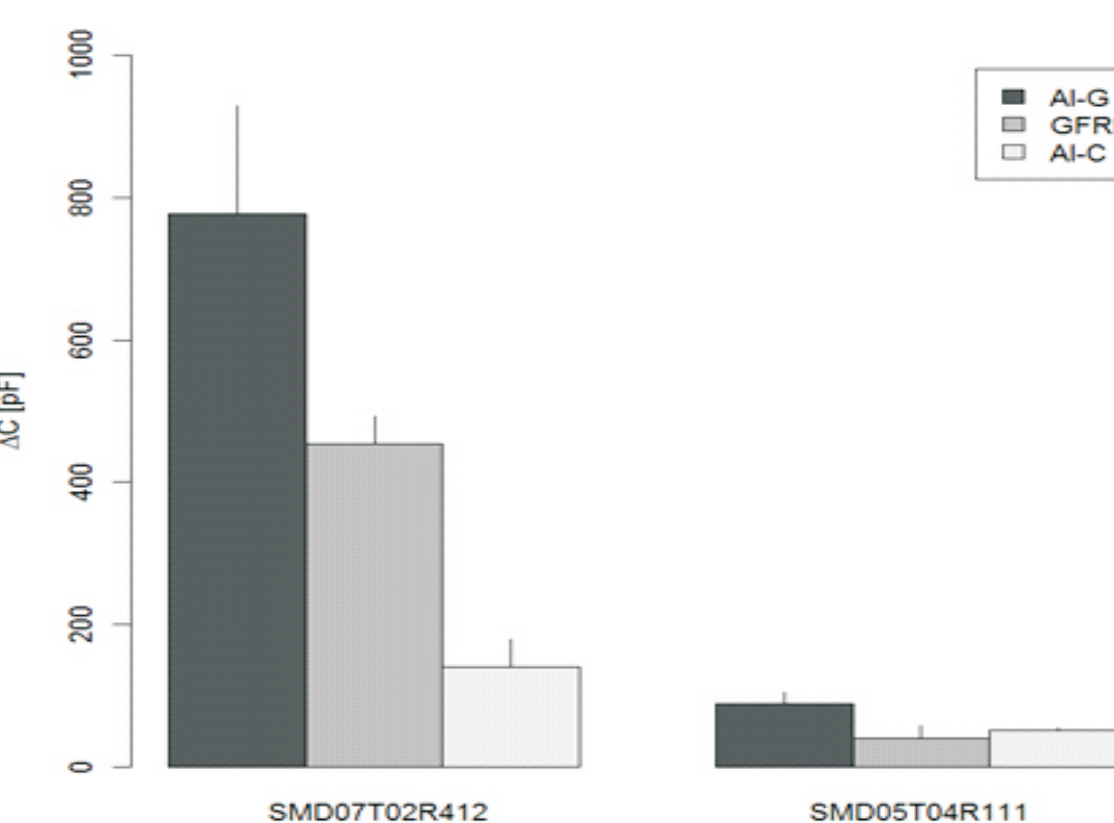
The study plan for the 2014:

- Development of technology for the implementation of sensors and actuators in aircraft epoxy carbon and epoxy glass and FML structures for online diagnostic.
 - Implementation of the impact-fatigue testing and diagnosis construction - Phase I (development of autonomous methods of assessing damage to established structures).
 - Implementation of the impact-fatigue testing and diagnosis construction - Phase II (verification of methods for autonomous damage assessment using non-destructive testing).
 - Development and implementation of a demonstrator of 'smart' structure with the use of sensor networks and autonomous data processing methods.
- Various types of PZT transducers and power cables are testing:

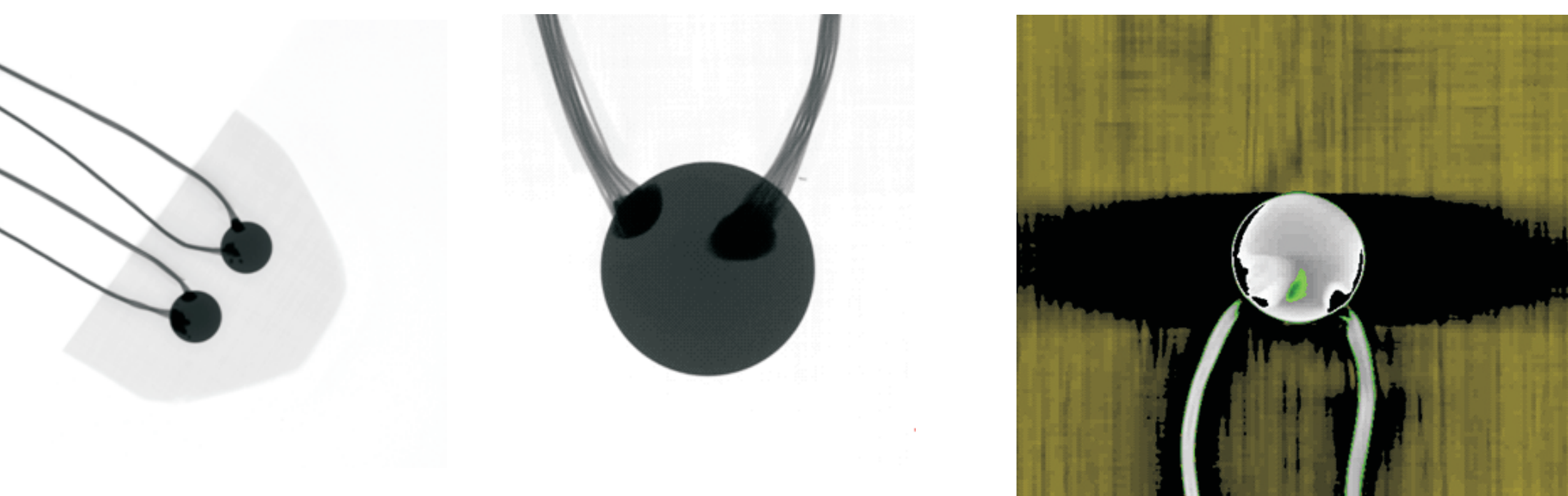


Rys. 1. Przykładowe czujniki PZT
Fig. 1. Examples of PZT sensors

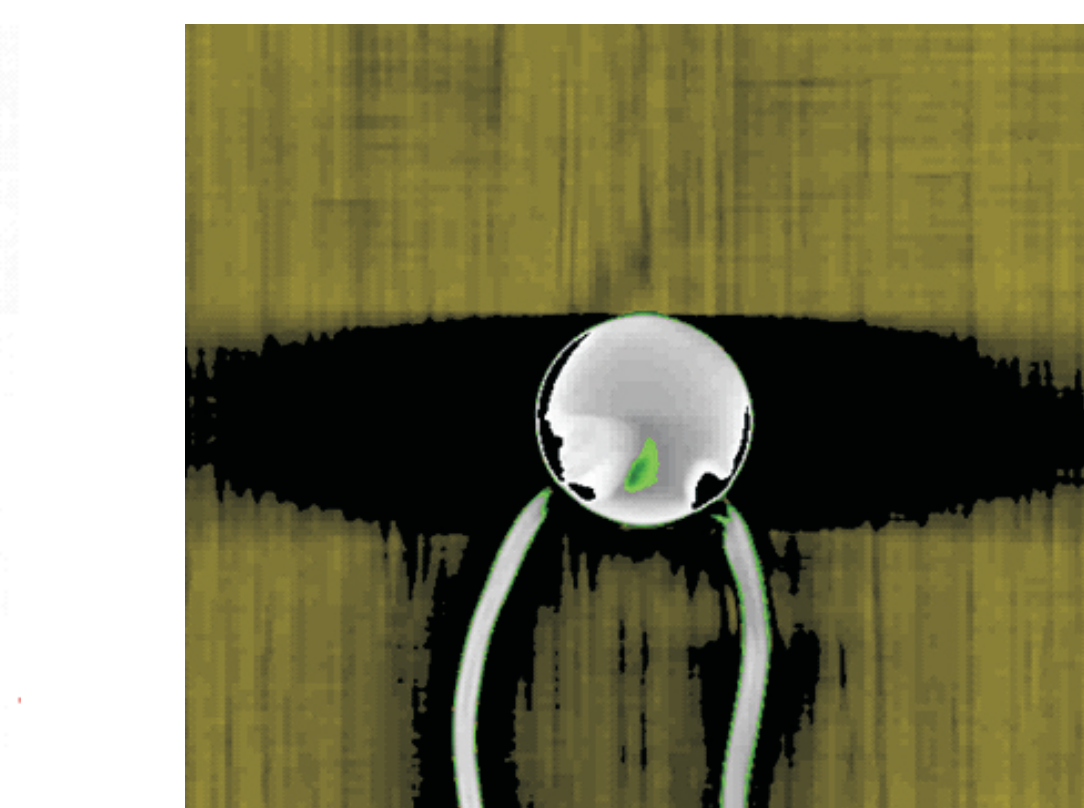
Właściwości przetworników PZT wbudowanych w strukturę mogą ulegać zmianie w procesie technologicznym wytwarzania kompozytu.
Properties of PZT transducers embedded in the structure may change in the process of composite production.



Rys. 2. Spadek pojemności przetworników w zależności od rodzaju przetwornika oraz procesu technologicznego wytwarzania próbek.
Fig. 2. The decrease in transducers capacitance, depending on the type of transducer and the sample preparation process.

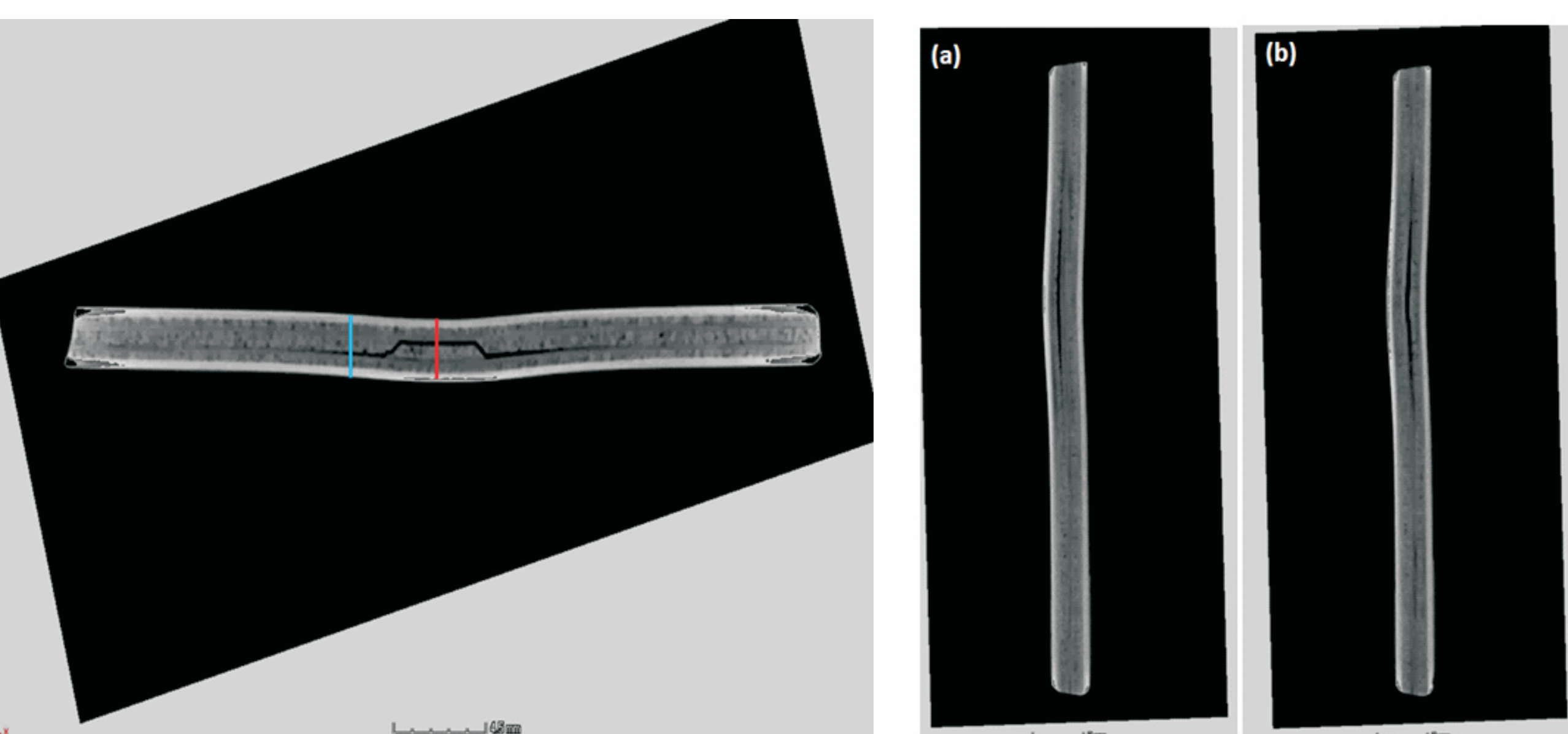


Rys. 3. Badania stopnia integracji przetwornika ze strukturą kompozytową za pomocą tomografii komputerowej (CT).
Fig. 3. Testing the degree of integration of the transducer with the composite structure using computed tomography (CT).

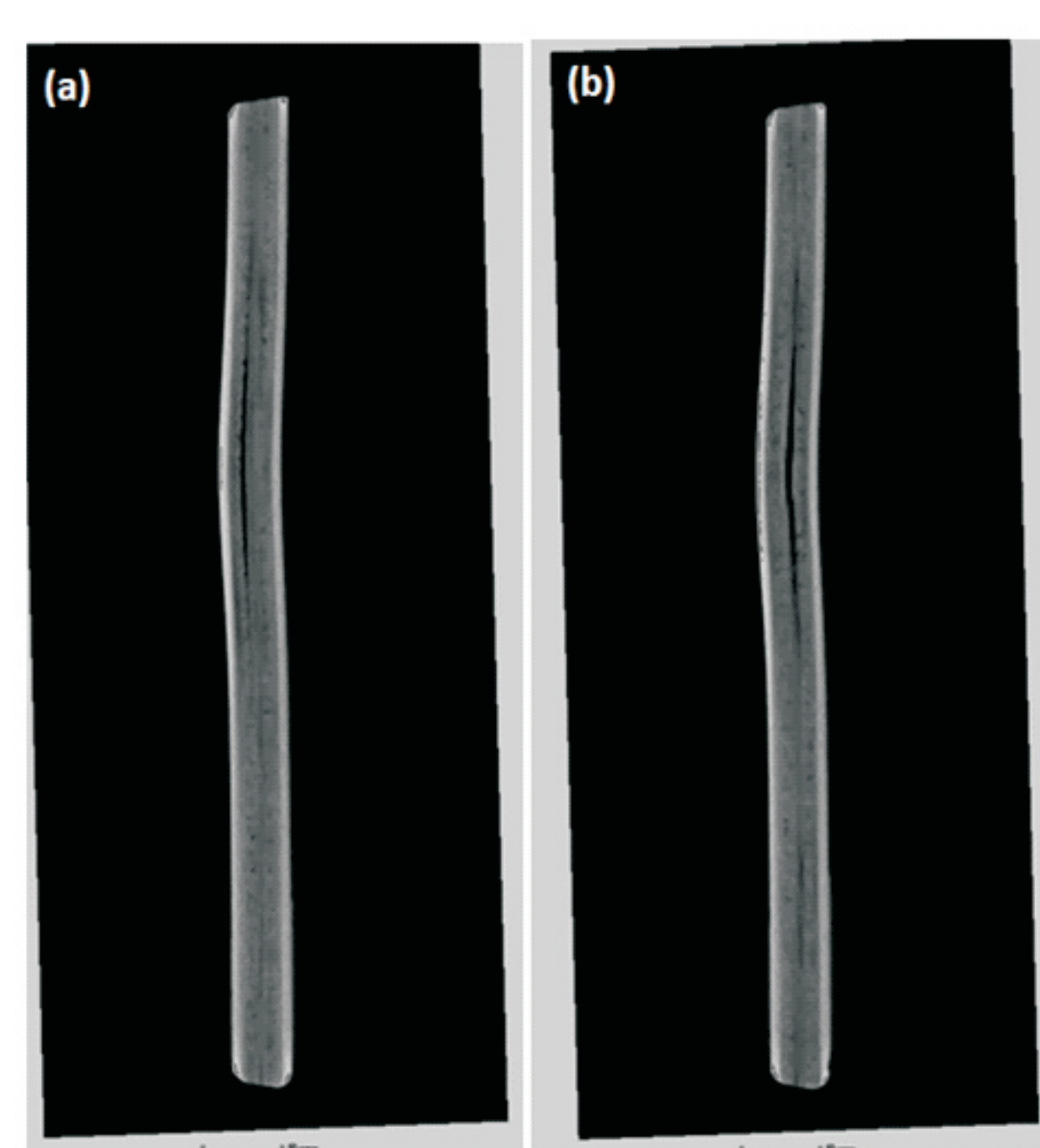


Rys. 4. Zobrazowanie CT próbki w obszarze zabudowania przetwornika. Różnice gęstości przetwornika, próbki i przewodów powodują powstanie zaciemnionych obszarów obrazu.
Fig. 4. CT imaging of the embedded transmitter area in the specimens. Differences in density transmitter, samples and wires causes the shaded areas of the image.

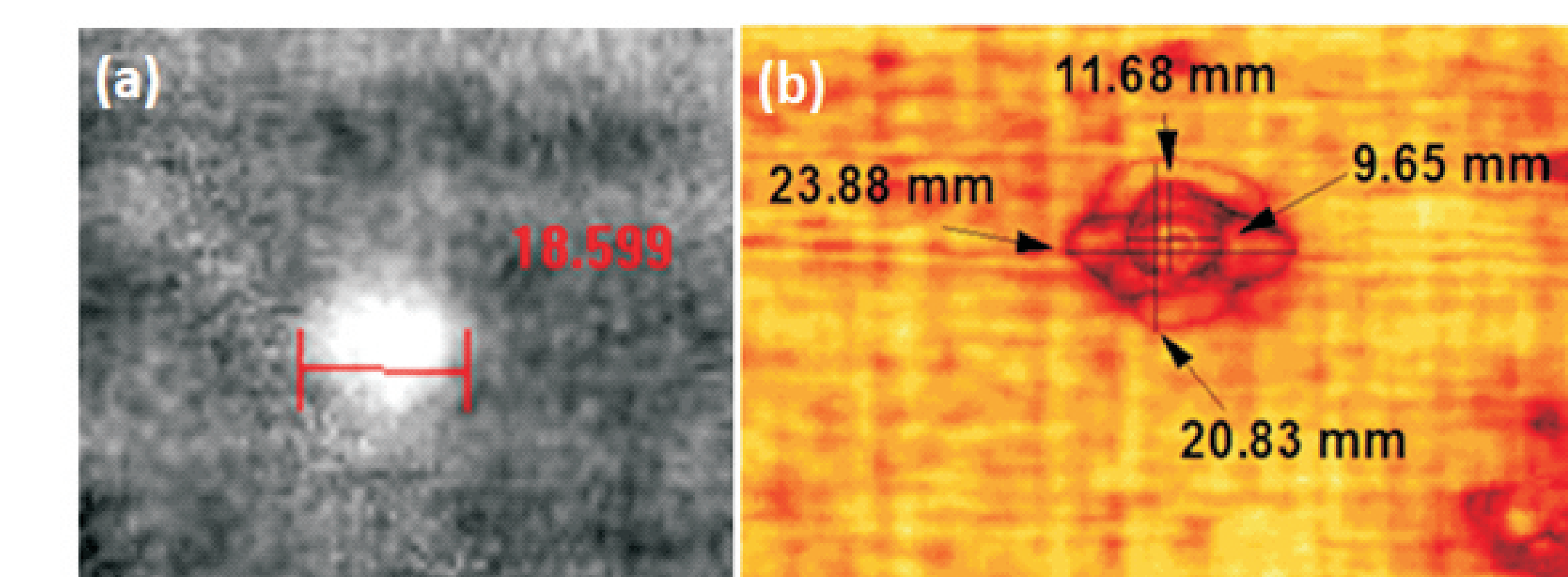
Porównanie wskaźników metod badań nieniszczących: ultradźwiękowej (UT) i termografii impulsowej (IR).
Comparison of results from different NDI methods: ultrasonic (UT) and pulsed thermography (IR).



Rys. 5. Tomogram przekroju próbki w miejscu uderzenia z zaznaczonymi lokalizacjami przekrojów prostokątnych.
Fig. 5. Scan of the sample cross section in place of impact with the locations of perpendicular cross-sections marked.



Rys. 6. Przekroje poprzeczne próbki w miejscu uderzenia według oznaczeń na Rys. 5: (a) niebieski oraz (b) czerwony
Fig. 6. Cross-sections of the sample in place of impact - the signs in Figure 5: (a) blue and (b) red



Rys. 7. Zobrazowanie NDT rozwarstwienia z Rys. 5 i Rys. 6: (a) metoda IR oraz (b) metoda UT
Fig. 7. NDT imaging of delamination from Figure 5 and Figure 6: (a) IR method and (b) UT method

Wyniki badań Results

Tabela przedstawia wyniki badań rozwarstwienia próbki metodą termografii impulsowej oraz metodą ultradźwiękową. Ze względu na zwiększoną dyssypację ciepła przez oksydację wierzchniej aluminiowej warstwy kompozytu, badanie metodą termografii impulsowej zaniża rzeczywisty rozmiar uszkodzenia. Metoda UT zawyża rozmiar rozwarstwienia, co związane jest z rozbieżnością wiązki ultradźwiękowej oraz jej rozpraszaniem na zakrzywieniach linii separacji warstw.

The table shows pulse thermography and ultrasonic test results for sample with delamination. Due to increased heat dissipation caused by strain of outer aluminum layer, the results obtained from pulse thermography method decreases the real size of the damage. On the other hand the UT method overestimates the damage size, due to divergence of ultrasonic beam and its dispersion on the curved layer separation lines.

Tab. 1. Zmierzanie uszkodzenia metodami NDT w odniesieniu do rozmiaru rzeczywistego (uzyskanego na podstawie tomogramów rozwarstwienia – Rys. 5, Rys. 6).
Tab. 1. Dimensioning by NDT methods damages in relation to the actual size (obtained by dissection of the tomograms – Figure 5, Figure 6).

Badanie IR	Badanie UT	Tomografia komputerowa
18,6	23,9	19,6

Detekcja uszkodzeń BVID.

Rozwarstwienia elementów kompozytowych powstałe wskutek uderzeń, poprzez pęknięcia poszczególnych warstw mogą wpłynąć na lokalną zmianę sztywności danego elementu oraz grubości materiału przez który propagować mogą fale sprężyste. Zmiana prędkości propagacji modów falowych w obszarze uszkodzenia, zależnie od jego rozmiarów, może spowodować przesunięcie paczek falowych rejestrowanego sygnału, dając obserwowalny efekt w rejestrowanym przebiegu czasowym. Efekt ten może jednak istotnie zależeć od lokalizacji uszkodzenia w sieci pomiarowej. Do analizy sygnałów wybrano następujące wskaźniki uszkodzeń:

BVID damages detection.

Delamination of composite caused by impact, through the cracks of the individual layers, can affect the local change in stiffness of the component and the thickness of the material through which the elastic waves can propagate. Changing the speed of propagation wave modes in the area of damage, depending on its size, can cause a shift of wave packets recorded signal, giving a noticeable effect on the registered course of time. But this effect may significantly depend on the location of damage in the measurement network. For the analysis of signals selected the following indicators of damage:

$$DI_1(g,s) = 1 - \frac{f_{gs}^{env} - f_{gs,b}^{env}}{f_{gs}^{env}}, \quad DI_2(g,s) = \frac{\int (f_{gs}^{env} - f_{gs,b}^{env})^2 dt}{\int (f_{gs}^{env})^2 dt}$$

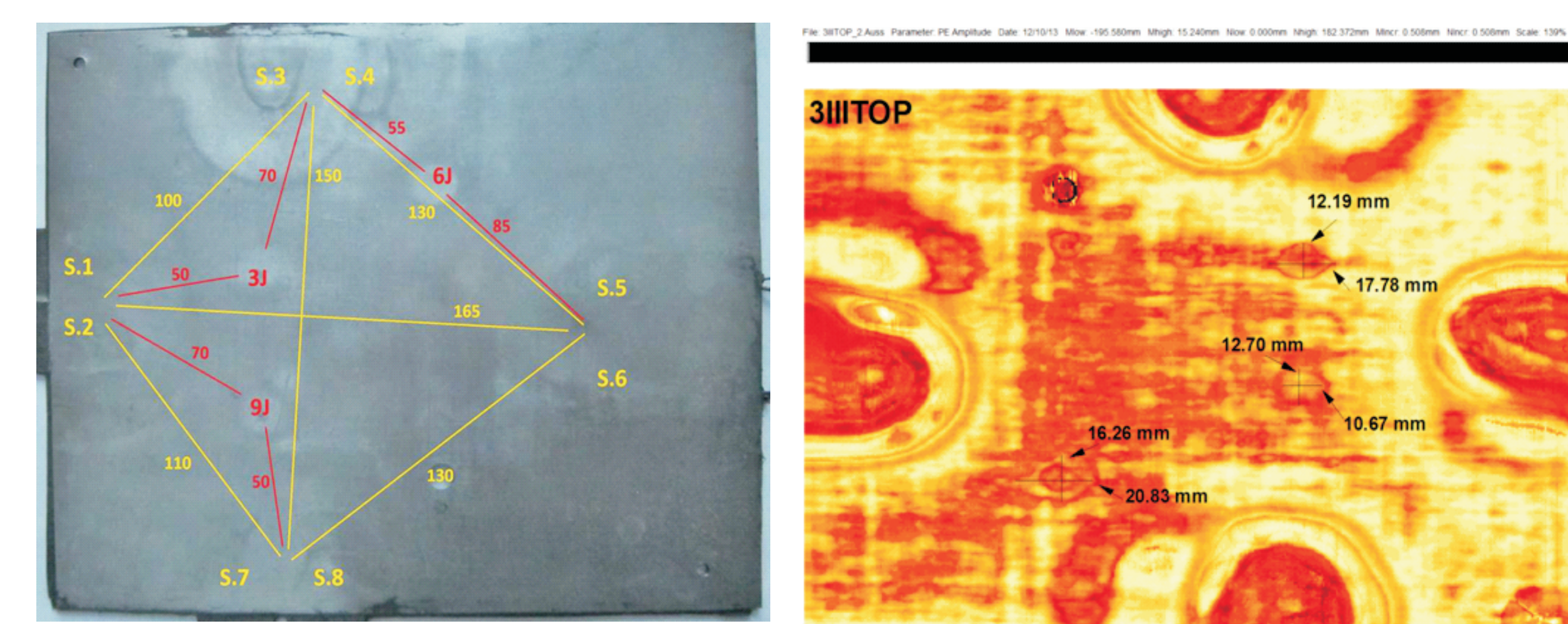
gdzie przez f_{gs} oznaczono sygnał wygenerowany przez generator i zarejestrowany przez sensor dla danego stanu struktury, przez $f_{gs,b}$ jego obwiednię oraz przez $f_{gs,b}^{env}$ odpowiadający sygnał odniesienia wraz z obwiednią. Wprowadzone charakterystyki sygnału zależą od lokalizacji uszkodzenia względem danej ścieżki pomiarowej, zadanej przez generator oraz sensor. W celu zmniejszenia zależności wskaźnika systemu od lokalizacji uszkodzenia zaproponowano wykorzystanie tzw. uśrednionych wskaźników uszkodzeń $ADI_j(g,s)$

where f_{gs} stands for the signal produced by the generator and recorded by the sensor for the given condition of the structure, $f_{gs,b}$ stands for the signal envelope, $f_{gs,b}^{env}$ for the reference signal with the envelope. Used signal characteristics depend on the damage location in relation to the measurement path defined by the localization of the generator and the sensor. In order to decrease the dependency between system indications and location of the damage the so-called mean damage indices

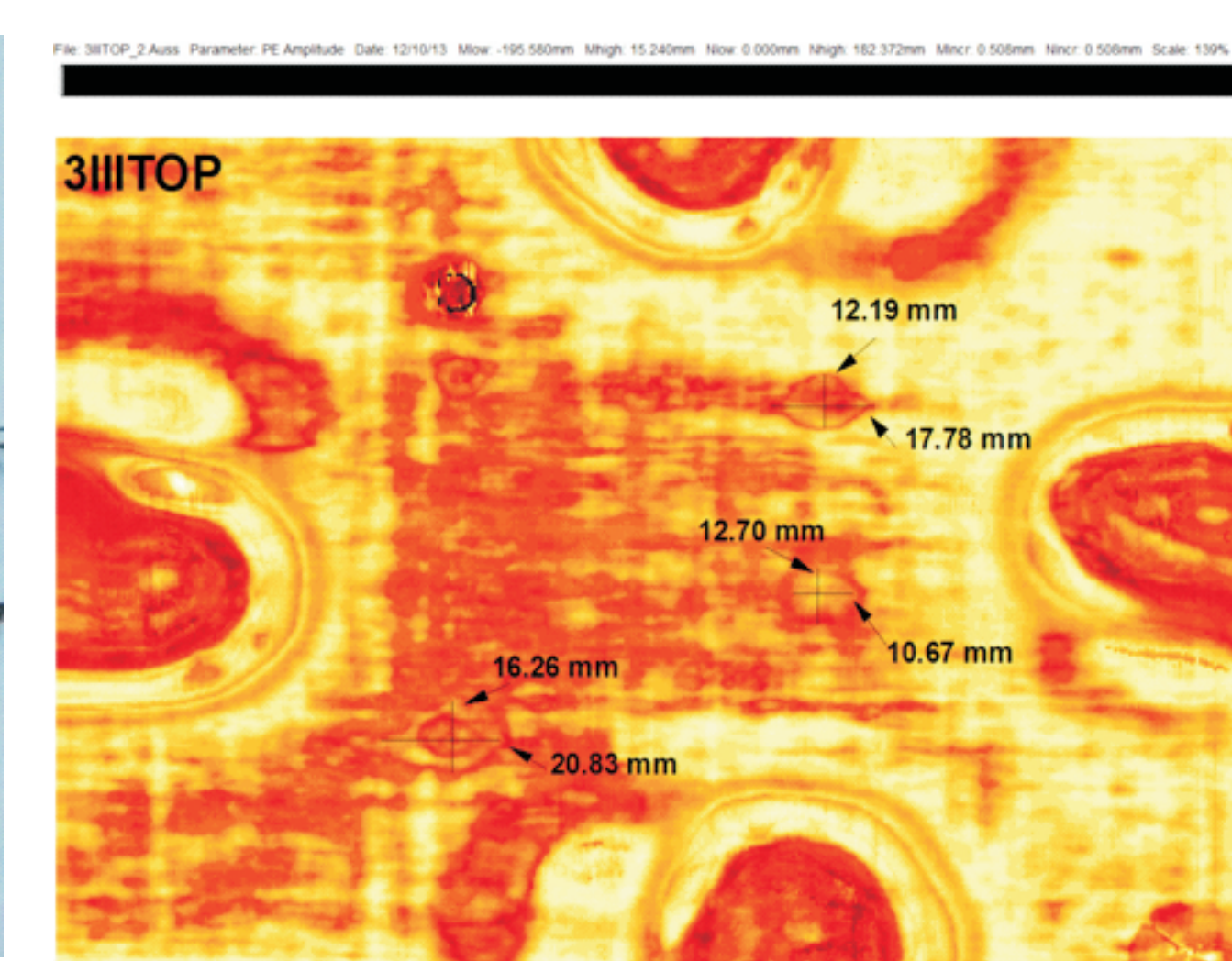
$$ADI_j = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{g,s} DI_j(g,s), \quad j = 1, 2$$

gdzie n jest liczbą sensorów w danej komórce sieci, zaś j oznacza wybrany wskaźnik uszkodzeń.

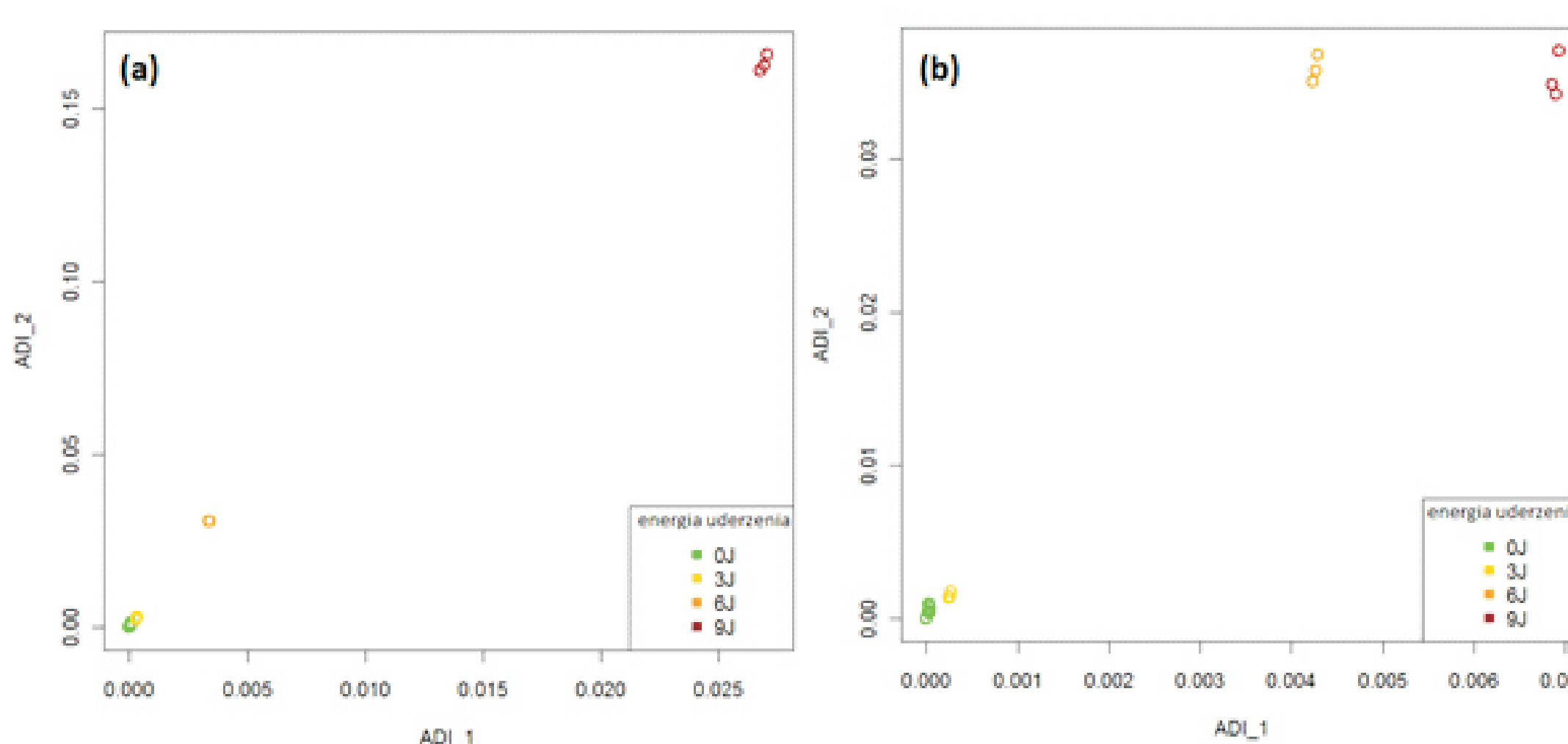
where n is the number of sensors in the network cell, whereas j represents chosen damage index.



Rys. 8. Próbkę FML złożoną z dwóch warstw CFRP z wbudowanymi sieciami przetworników PZT rozdzielonych warstwą aluminium. Geometria sieci oraz lokalizacja uszkodzeń podane w milimetrach.
Fig. 8.



Rys. 9. Wyniki badania UT próbki FML.
Fig. 9. The results of UT method for FML specimen.



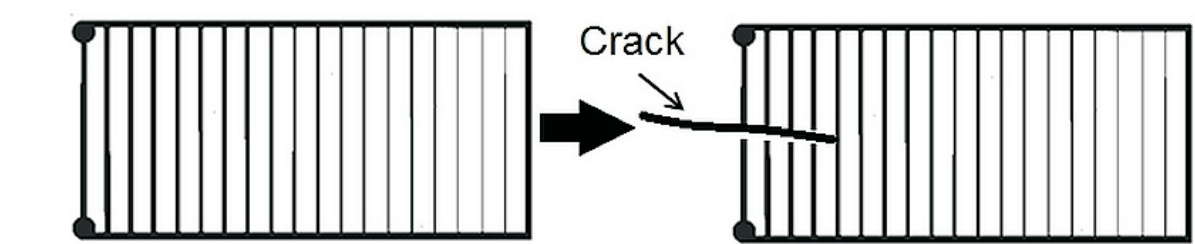
Rys. 10. Próbkę FML. Porównanie uśrednionych wskaźników uszkodzeń dla 100kHz: (a) sieć wbudowana w dolną warstwę CFRP oraz (b) sieć wbudowana w wierzchnią warstwę CFRP (bezpośrednio narażoną na uderzenie).
Fig. 10. FML specimen. Comparison of average indicators damages for 100kHz: (a) network embedded into the bottom layer of CFRP and (b) network embedded into the top layer of CFRP (directly exposed to impact)

W przypadku wielowarstwowych laminatów metalowo włóknistych (FML) istotność wskaźnika systemu uzależniona jest od warstwy, w którą wbudowana jest sieć przetworników PZT. Dane odpowiadające energii uderzenia 6J są lepiej odseparowane od obserwacji nieuszkodzonych dla wierzchniej warstwy kompozytu (Rys. 10(b)) w porównaniu z warstwą nie narażoną bezpośrednio na uderzenie (Rys. 10(a)).

In case of multilayer fiber metal laminates (FML) the indications relevance depends on the layer in which the PZT sensor network is installed. Data corresponding to impact with 6J energy are much more separated from undamaged specimen observations for the surface layer of composite (Fig. 10(b)) in comparison to the layer not directly exposed to damage (Fig. 10(a)).

Wyniki badań Results

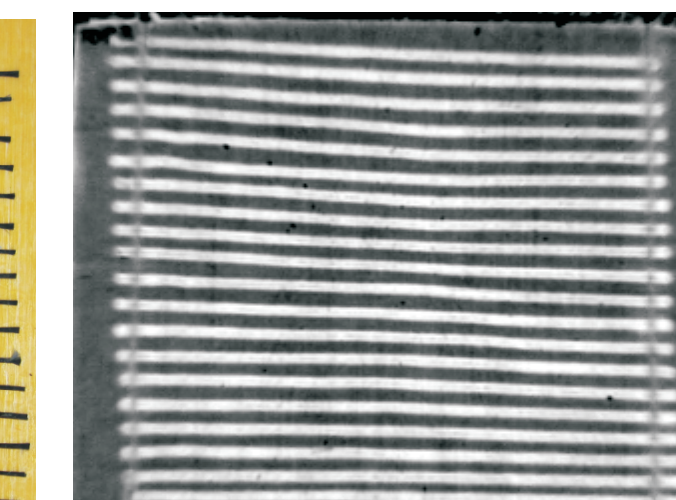
Monitorowanie stanu struktury za pomocą czujników rezystancyjnych
Monitoring of the structure using resistive sensors



Rys. 1. Czujnik drabinkowy z propagującym pęknięciem
Fig. 1. Crack propagation sensor with a crack propagating underneath



Rys. 11. Drabinkowy czujnik rezystancyjny utworzony z włókien węglowych
Fig. 11. Resistive sensors formed from carbon fibers



Rys. 12. Drabinkowy czujnik rezystancyjny utworzony z włókien węglowych - termografia
Fig. 12. Resistive sensors formed from carbon fibers - termography



Rys. 13. Punkt pomiarowy z czujnikiem typu TFDBP1 przed i po rozpoczęciu propagacji pęknięcia
Fig. 13. Measuring point TFDBP1 type sensor before and after the start of crack propagation

Poprawność działania czujników została potwierdzona zarówno w trakcie badań laboratoryjnych, jak i podczas pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu PZL-130 Orlik TCII.
Proper operation of sensors has been confirmed both during laboratory tests, as well as during full-scale fatigue test aircraft PZL-130 Orlik TCII.

Wnioski Conclusions

- W wyniku procesu technologicznego wytwarzania struktur kompozytowych, ulegają pogorszeniu parametry charakteryzujące przetworniki piezoelektryczne. Nie wpływa to jednak negatywnie na możliwość detekcji uszkodzeń BVID.
- W procesie integracji pojemność przetworników PZT zmniejsza się, zaś ich indukcyjność rośnie. Na wielkość tych zmian ma wpływ rodzaj materiału z jakiego wykonany jest przetwornik.
- Implementacja przetworników PZT w strukturach węglowych wymaga ich izolacji elektrycznej. W ramach realizacji zadania opracowano osnowy przetworników dwójakiego rodzaju.
- W badaniach tomografii komputerowej nie stwierdzono powstania rozwarstwień, ani innych uszkodzeń materiału w obszarze umieszczenia przetworników PZT.
- W przypadku próbek FML badanie UT pozwala na pełniejsze scharakteryzowanie uszkodzeń, w szczególności wyróżnienie stref rozwarstwienia materiału oraz plastycznej deformacji powierzchni próbki.
- Szacowany rozmiar uszkodzeń w metodzie IR jest zaniżony, zaś UT zawyżony w stosunku do rzeczywistego rozmiaru uszkodzeń, wyznaczonego na podstawie badań tomografii komputerowej.
- Możliwa jest detekcja uszkodzeń BVID z wykorzystaniem przetworników PZT zintegrowanych ze strukturą materiału oraz zaproponowanych wskaźników uszkodzeń. Wykorzystanie schematu adaptacyjnego uzyskania pomiarów odniesienia, umożliwiło wyeliminowanie pozostałych czynników mogących wpłynąć na rejestrowane sygnały.
- Zmiany wskaźników uszkodzeń zależą od parametrów generowanego sygnału oraz rodzaju badanego materiału. Wskazana jest optymalizacja sygnału wymuszenia dla danego problemu badawczego.
- Wskazania systemu dla wielowarstwowych laminatów metalowo włóknistych (FML) uzależnione jest od warstwy, w której znajduje się sieć przetworników PZT, co w perspektywie może umożliwić charakteryzacje uszkodzeń na różnych głębokościach pod powierzchnią próbki, często niedostępnych tradycyjnymi metodami badań NDT.
- Wyniki monitorowania uzyskane dla przetworników różnego rodzaju są porównywalne.
- Wykorzystanie metod klasyfikacji danych w celu określenia rozmiaru uszkodzeń wymaga modyfikacji wskaźników uszkodzeń dla zapewnienia porównywalnych zmian wskaźników uszkodzeń dla analogicznych sieci przetworników PZT.

As a result of the technological process for producing composite structures, parameters characterizing piezoelectric transducers are getting worse. However, this does not adversely affect to the possibility of BVID damage detection.

- In the integration process capacity of PZT transducers is reduced, and the inductance increases. The size of these changes is influenced by the type of material used to make the transmitter.
- Implementation of PZT transducers in the structures of carbon requires their electrical insulation. The task developed two types of converters matrix.
- In computed tomography studies, there was no uprising delaminations, or other damage to the material in the placement of PZT transducers area.
- For FML specimens UT testing allows for more complete characterization of the damage, and in particular distinction delamination zones and plastic deformation of the material surface.
- The estimated size of defects in the IR method is underestimated and in UT method is overestimated compared to the real extent of the damage, determined on the basis of computed tomography.
- It is possible BVID damages detection using PZT transducers integrated with the structure of the material and the proposed indicators of damage. The use of an adaptive scheme obtain reference measurements enabled the elimination of other factors that may affect the recorded signals.
- Changes in the indicators of damage depends on the parameters of the generated test signal and the type of material. It is advisable to optimize the force signal for a given research problem.
- Indication system for multi-layer metal fiber laminates (FML) is dependent on the layer in which there is PZT network transducers embedded, which perspective may enable the characterization of damages at different depths below the surface of the sample, often inaccessible by traditional NDT methods.
- Monitoring results obtained for various types of sensors are comparable.
- Use of data classification methods to determine the extent of damage requires modification of damages indicators to ensure comparable changes in damages indicators to the analogous network PZT transducers.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Referaty

- Dziendzikowski M., Dragan K., Kurnyta A., Kornas Ł., Latoszek A., Zablocka M., Klysz S., Leski A., Chalimoniuk M., Giewon J.: **An approach to Structural Health Monitoring of composite structures based on embedded PZT transducers**, 7 CONFERENCE "FATIGUE OF AIRCRAFT STRUCTURES", Warsaw, 16-17 January 2014
- Dragan K., Dziendzikowski M., Kurnyta A., Leski A.: **Monitoring of the degradation composite aeronautical structures with the use of embedded sensors network**, XVIII Symposium "KOMPOZYTY 2014 - Teoria i praktyka", Poraj, 23-25 kwietnia 2014
- Dragan K., Dziendzikowski M., Kurnyta A., Leski A., Bienias J.: **Structural health monitoring of composite structures with use of embedded pzt piezoelectric sensors**, ECCM-16th European Conference on Composite Materials, Seville, Spain, 22-26 June 2014

Publikacje

- Dragan K., Zablocka M., Dziendzikowski M., Leski A., Bienias J.: **Composite aerospace structure in-situ diagnostics with use of network of PZT sensors**, Composites Theory and Practice 13: 4 (2013) 269-274
- Dziendzikowski M., Dragan K., Kurnyta A., Klysz S., Leski A.: **Damage Size Estimation of the Aircraft Structure with use of Embedded Sensor Network Generating Elastic Waves**, Key Engineering Materials Vol. 598 (2014), pp 57-62 2014-01-08

Prace mgr., dr. hab.

Praca habilitacyjna: dr inż. Krzysztof Dragan. **Nowoczesne metody monitorowania kompozytowych konstrukcji lotniczych**. status: w trakcie realizacji