

# 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

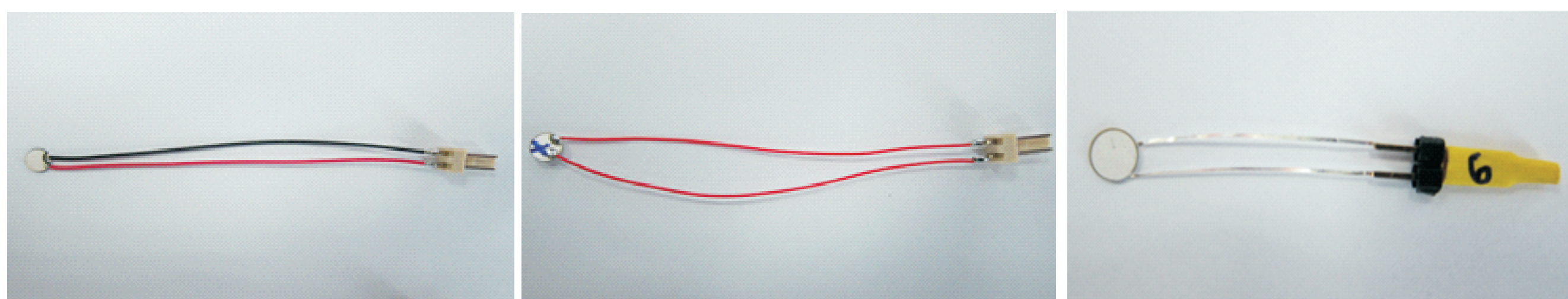
Implementacji sensorów i aktuatorów w lotniczych strukturach epoksydowo węglowych i epoksydowo szklanych oraz konstrukcji FML

The implementation of sensors and actuators in the air structures of carbon epoxy and epoxy glass and construction FML

- Opracowano technologię 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).
- Opracowano i wykonano (w trakcie) demonstrator konstrukcji 'inteligentnej' z wykorzystaniem sieci czujników i autonomicznych metod przetwarzania danych.

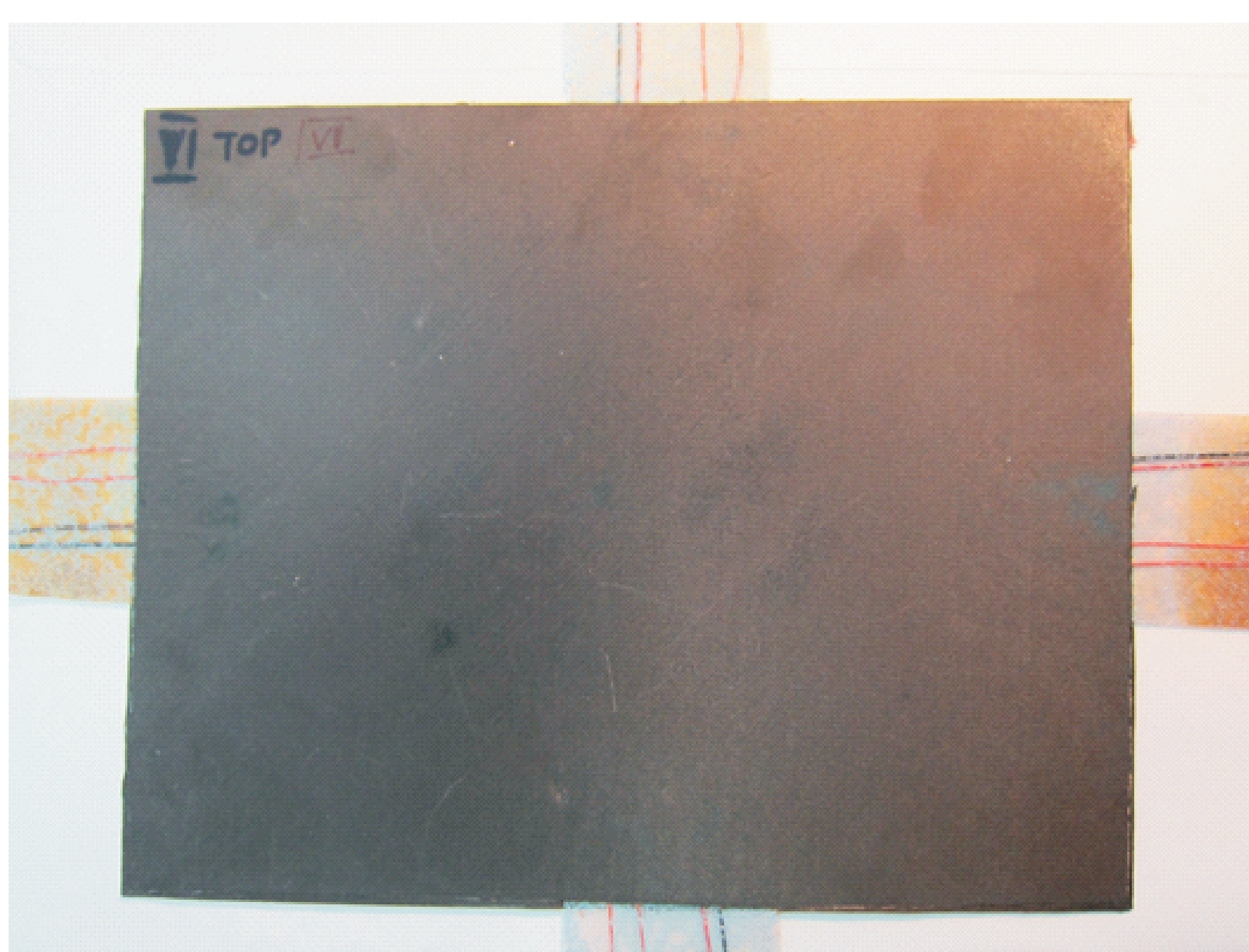
- Technology of the implementation of sensors and actuators in the air structures of carbon epoxy and epoxy glass and construction FML for online diagnostics options was developed.
- Implementation of Impact fatigue testing and diagnosis of construction - Phase I (development of autonomous methods of assessing damage to established structures);
- Implementation of fatigue and shock tests to diagnose design - Phase II (verification of autonomous methods of damage assessment using non-destructive diagnostics);
- Developed and manufactured (in progress) demonstrator of 'smart' structure with the use of autonomous sensor networks and data processing methods.

Testowane są różne rodzaje przetworników PZT oraz przewodów zasilających:  
Various types of PZT transducers and power cables are tested:

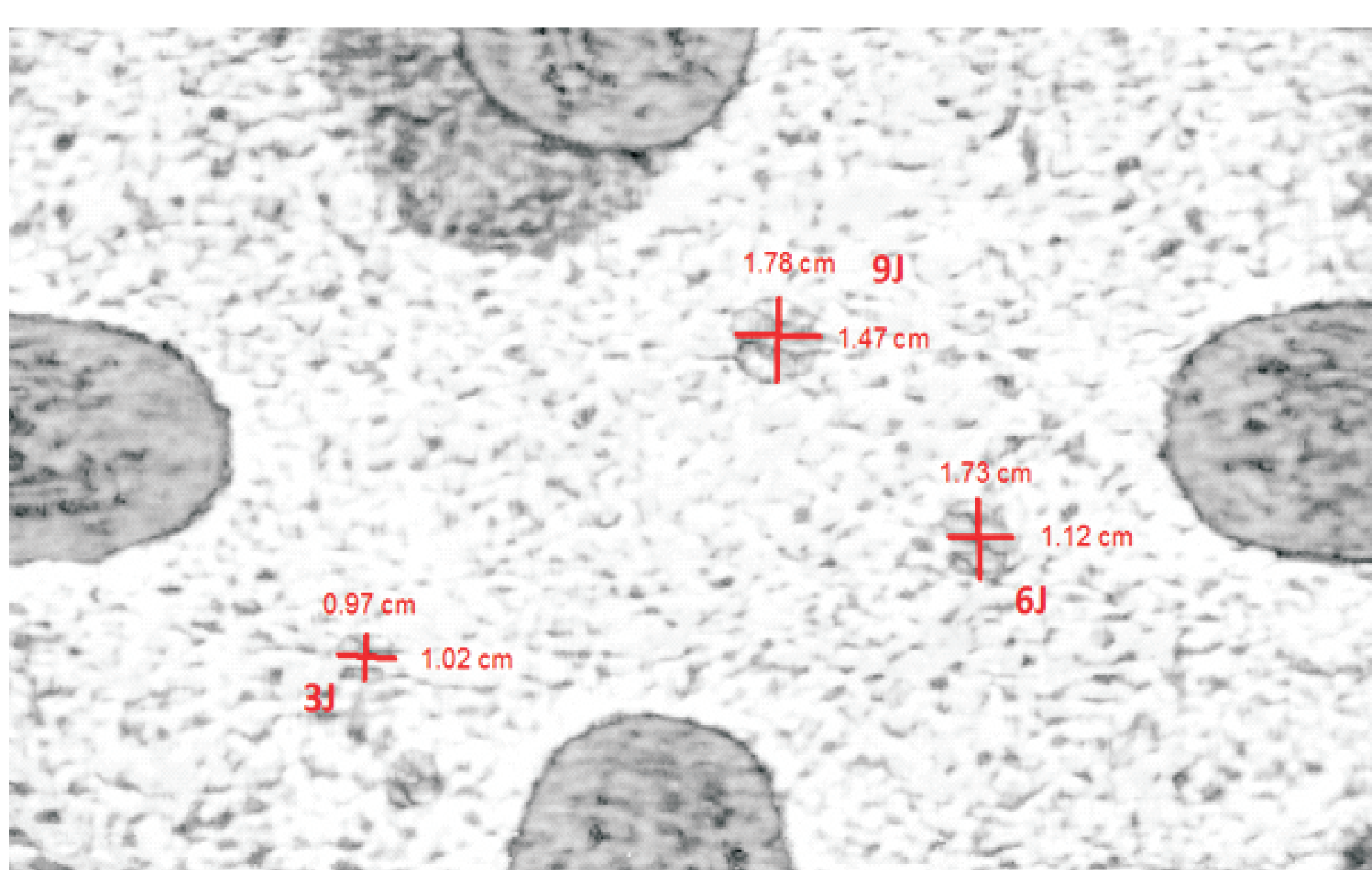


Rys. 1. Przykładowe przetworniki PZT  
Fig. 1. Examples of PZT transducers

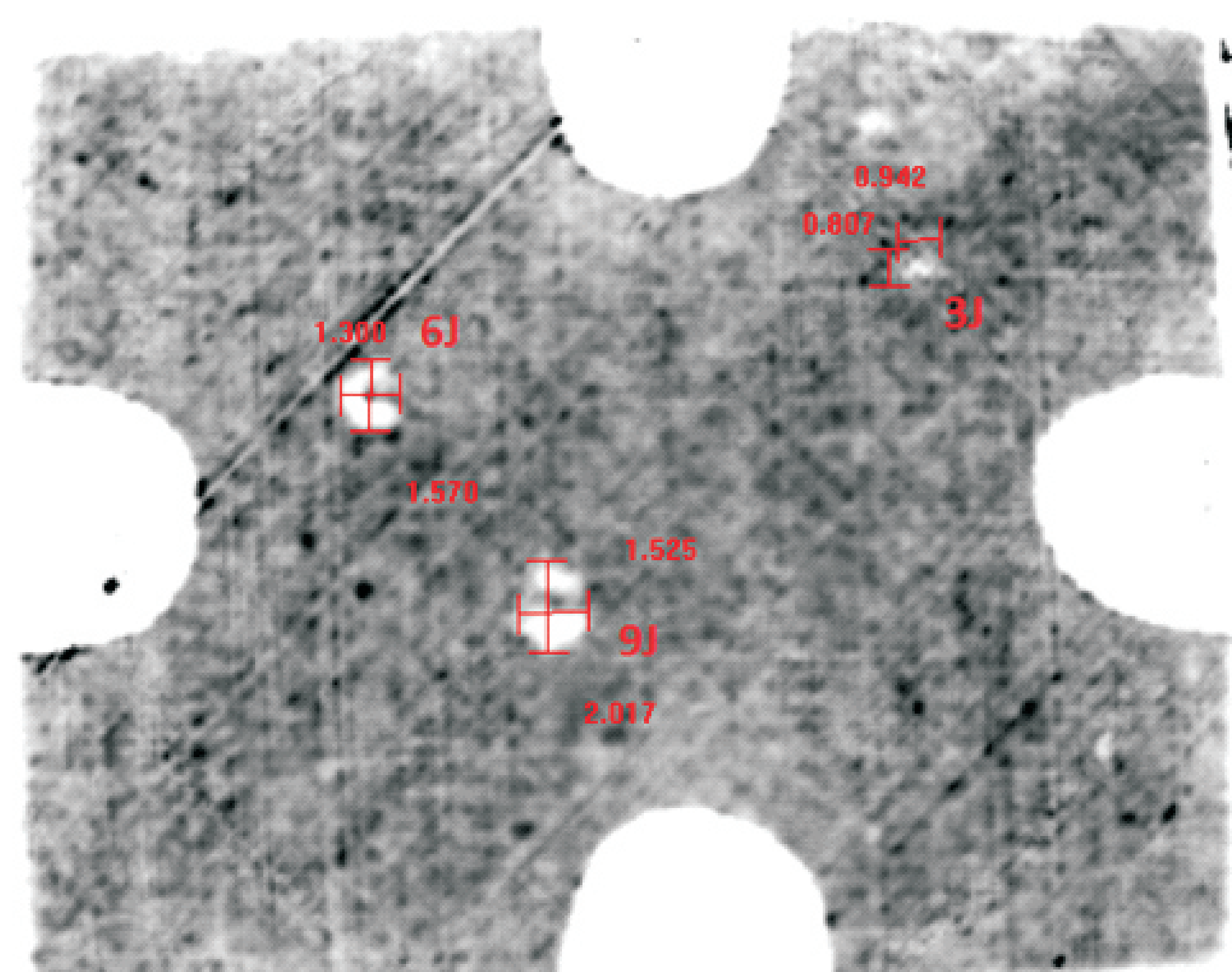
W 2014 roku wykonano łącznie 12 próbek z wbudowanymi przetwornikami PZT oraz demonstrator technologii (w trakcie).  
In 2014 a total of 12 samples with embedded PZT transducers and Technology Demonstrator (in progress) were made.



Rys. 2. Przykładowa próbka CFRP z wbudowanymi przetwornikami PZT typu I i II  
Fig. 2. The CFRP specimen with embedded PZT transducers type I and II



Rys. 3. Zobrazowanie próbki w trybie C-scan metodą ultradźwiękową  
Fig. 3. Imaging of specimen in C-scan mode by the ultrasound



Rys. 4. Wyniki badań próbki CFRP metodą termografii impulsowej  
Fig. 4. Results of pulse thermography test of CFRP specimen

Dokonano porównania wymiarowania uszkodzeń BVID metodami: ultradźwiękową (UT) oraz termograficzną (TT). Uzyskane dane z badań próbek posłużyły do wyznaczenia liniowych modeli analizy kowariancji (ANCOVA) postaci:

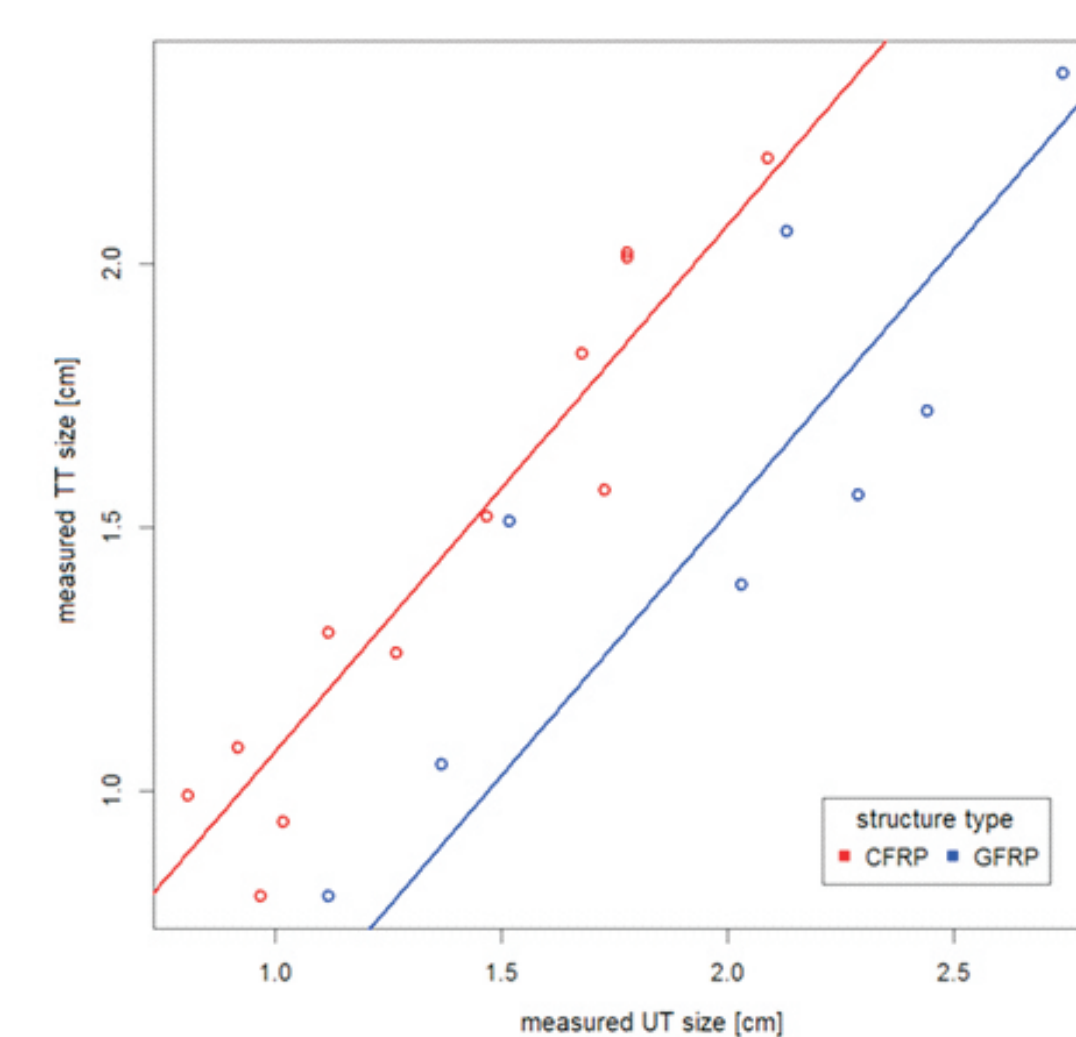
$$S_{TT} = S_{UT} + \alpha_{GFRP} + \alpha_{CFRP}$$

gdzie  $S_{TT}$ ,  $S_{UT}$  są wynikami oceny uszkodzeń metodami TT oraz UT, zaś  $\alpha_{GFRP}$ ,  $\alpha_{CFRP}$  opisują średnie różnice pomiarów pomiędzy metodami odpowiednio dla próbek GFRP oraz CFRP. Stwierdzono statystycznie istotne różnice w wymiarowaniu uszkodzeń metodami UT i TT, zależnie od rodzaju badanej struktury. Większe różnice odnotowano dla kompozytów epoksydowo – szklanych.

A BVID dimensioning was compared by methods: ultrasonic (UT) and thermographic (TT). The obtained samples of the study were used to determine the linear model analysis of covariance (ANCOVA) form:

$$S_{TT} = S_{UT} + \alpha_{GFRP} + \alpha_{CFRP}$$

where  $S_{TT}$ ,  $S_{UT}$  are the result of damage assessment of UT and TT methods, and  $\alpha_{GFRP}$ ,  $\alpha_{CFRP}$  describing the average difference between the methods of measurement respectively GFRP and CFRP samples. There were statistically significant differences in the dimensioning of damages by UT and TT methods, depending on the type of test structure. Greater differences were observed for epoxy-glass composites.



Rys. 5. Porównanie wymiarowania uszkodzeń metodami UT i TT  
Fig. 5. Comparison of damage dimensioning by UT and TT methods.

#### Detekcja uszkodzeń BVID

Systemy detekcji uszkodzeń wykorzystujące zintegrowaną ze strukturą sieć przetworników PZT mogą działać w oparciu o tzw. wskaźniki uszkodzeń - zmienne losowe definiowane za pomocą wybranych charakterystyk sygnału  $f_{g,s}$ , wzbudzonego przez generator  $g$  i odebranego przez sensor  $s$  w odniesieniu do uprzednio zachowanego sygnału bazowego  $f_{g,s,b}$  otrzymanego dla nienuszkodzonego elementu. Oznaczając przez  $f_{g,s}$  obwiednię danego sygnału zdefiniować można następujące wskaźniki uszkodzeń:

$$\begin{aligned} \text{- korelacja obwiedni} &\Rightarrow DI(g,s) = 1 - \text{cor}(f_{g,s}^{\text{env}}, f_{g,s,b}^{\text{env}}), \\ \text{- charakterystyka L2} &\Rightarrow DI(g,s) = \frac{\int (f_{g,s}^{\text{env}} - f_{g,s,b}^{\text{env}})^2 dt}{\int (f_{g,s,b}^{\text{env}})^2 dt} \end{aligned}$$

oraz analogiczne z wykorzystaniem obwiedni sygnałów przefiltrowanych w zadanym zakresie częstotliwości.

#### BVID detection

Damage detection systems based on an integrated network structure PZT transducers can operate on the basis of the so-called indicators of damage - random variables defined by selected characteristics of the signal  $f_{g,s}$  induced by the generator  $g$  and received by the sensor  $s$  with respect to previously stored baseline signal  $f_{g,s,b}$  obtained for intact element. Denoting by  $f_{g,s}^{\text{env}}$  the envelope of the signal can be defined following indicators of damage:

$$\begin{aligned} \text{- envelopes correlation} &\Rightarrow DI(g,s) = 1 - \text{cor}(f_{g,s}^{\text{env}}, f_{g,s,b}^{\text{env}}), \\ \text{- L2 characteristics} &\Rightarrow DI(g,s) = \frac{\int (f_{g,s}^{\text{env}} - f_{g,s,b}^{\text{env}})^2 dt}{\int (f_{g,s,b}^{\text{env}})^2 dt} \end{aligned}$$

and similar using the envelope of the filtered signal in a predetermined frequency range.

#### Lokalizacja uszkodzeń BVID

Największe zmiany wskaźników uszkodzeń występują dla ścieżek pomiarowych przebiegających w pobliżu uszkodzenia, przy czym dla ustalonej pary czujników ich skala zależy od rozmiaru uszkodzenia wzdłuż przebiegu ścieżki. Dla każdego punktu  $(x,y)$  mapy oraz ścieżki pomiarowej  $g \rightarrow s$  wartość:

$$I(x,y,g,s) = \frac{DI(g,s)}{(l_g(x,y) + l_s(x,y))^2}$$

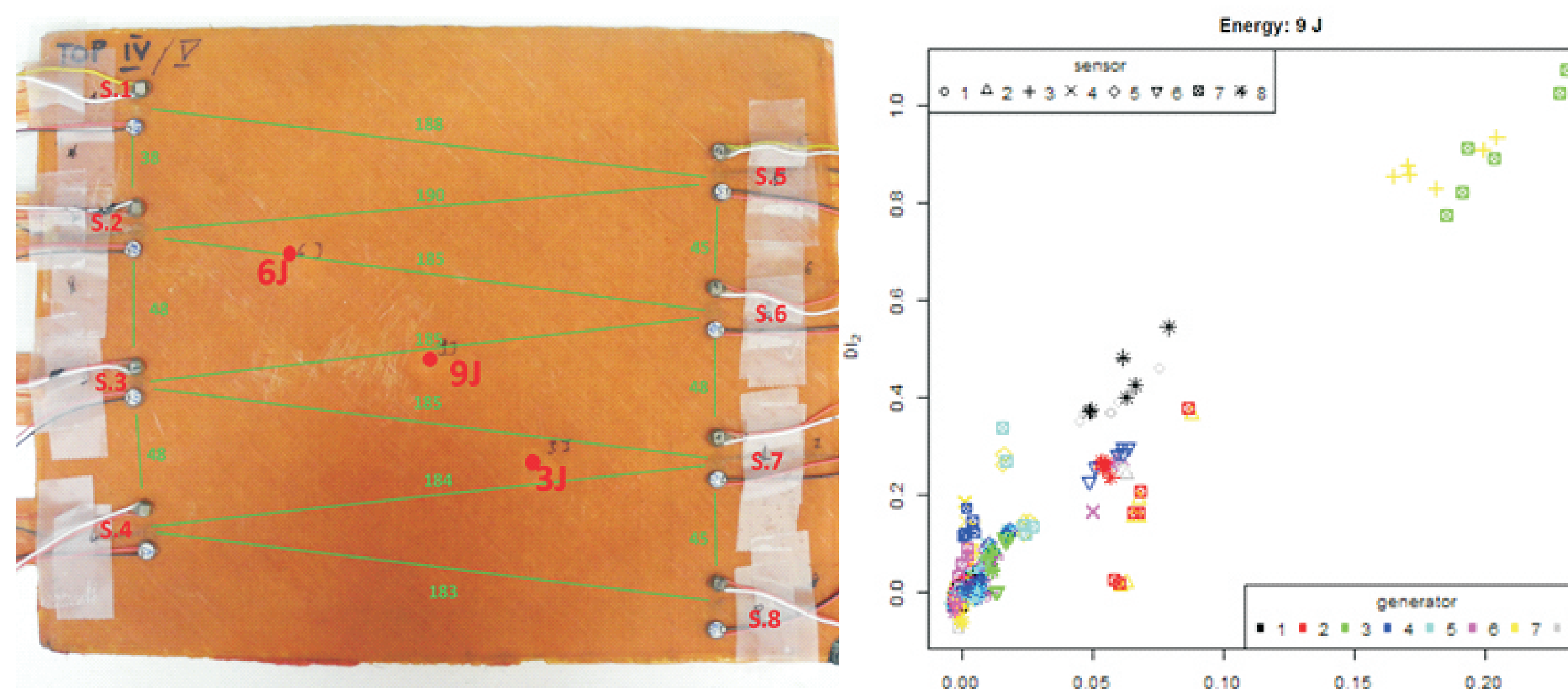
gdzie  $DI(g,s)$  jest wybranym  $l_g(x,y)$ ,  $l_s(x,y)$  jest odpowiednio odległością generatora  $g$  oraz sensora  $s$  od punktu  $(x,y)$  może być wykorzystana do lokalizacji uszkodzeń w obrębie danej sieci PZT.

#### BVID localization

The largest changes occur damage indicators for measuring paths extending near the damage, wherein the pair of sensors set of scale depends on the size of the damage along the longitudinal path. For each point  $(x,y)$  of the map and the measuring path  $g \rightarrow s$  value:

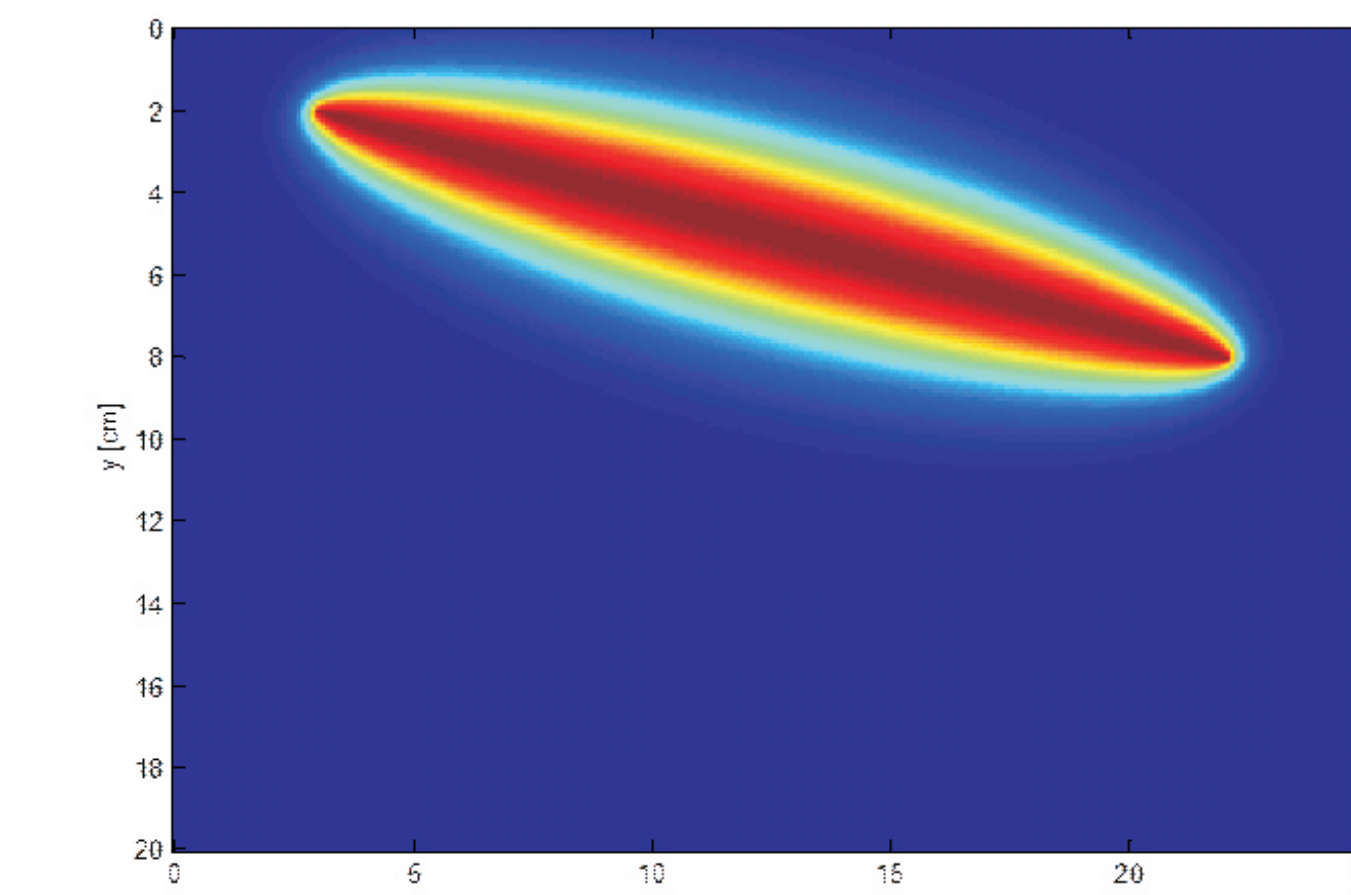
$$I(x,y,g,s) = \frac{DI(g,s)}{(l_g(x,y) + l_s(x,y))^2}$$

where  $DI(g,s)$  is chosen  $l_g(x,y)$ ,  $l_s(x,y)$  is adequately the distance of the generator  $g$  and from the point  $(x,y)$  sensor  $s$  can be used for damage location within the network PZT



Rys. 6. Próba testowa z zaznaczonymi lokalizacjami uszkodzeń oraz geometrią sieci przetworników PZT  
Fig. 6. The test sample with marked locations of defects, and geometry of the PZT transducers

Rys. 7. Zmiany wskaźników uszkodzeń po uderzeniu o energią 9 J  
Fig. 7. Changes in damage indicators after hit with an energy of 9 J



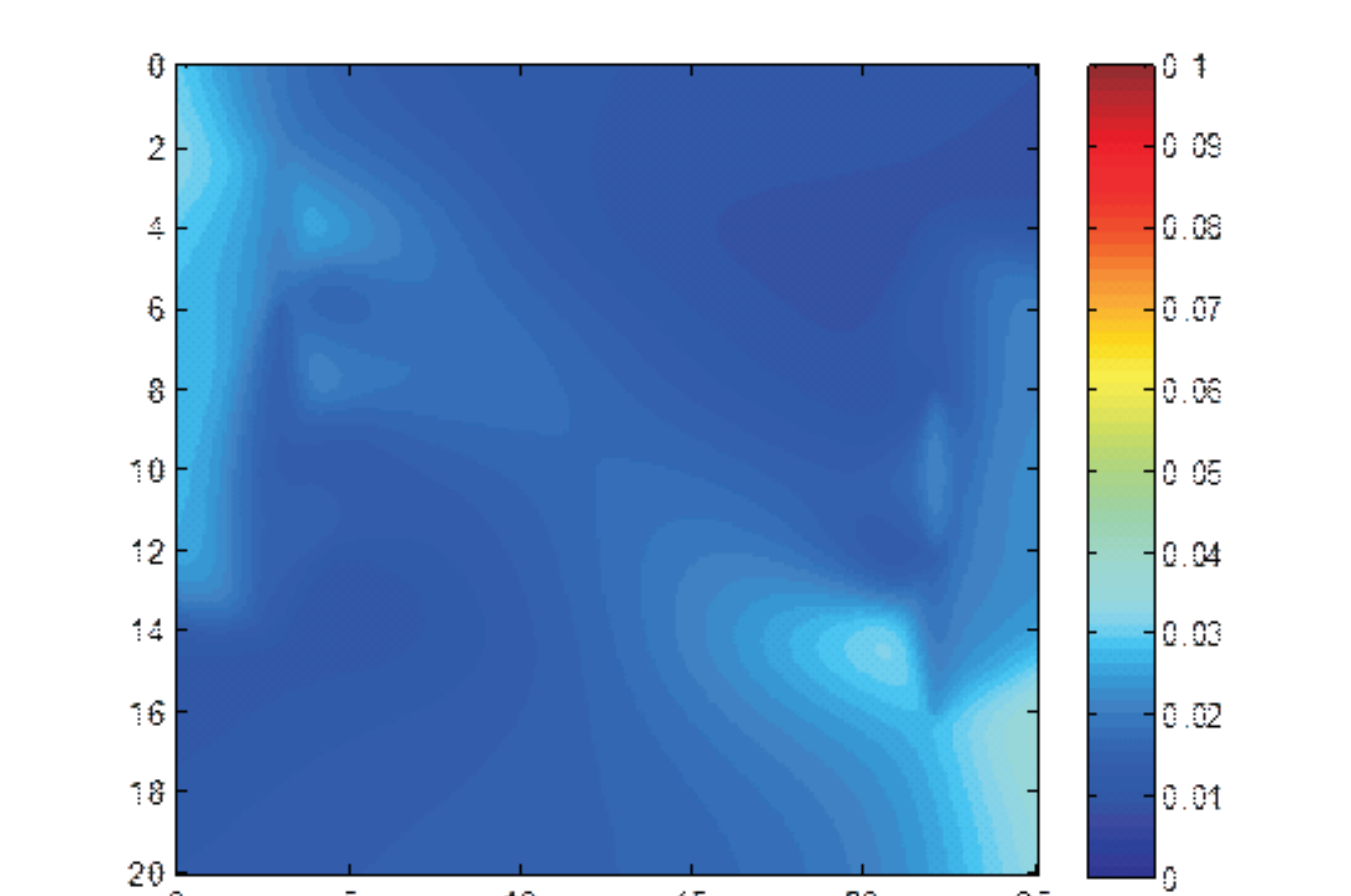
Rys. 8. Odzworowanie dla przykładowej ścieżki pomiarowej  
Fig. 8. Mapping for the sample measuring path

Do oceny lokalizacji uszkodzeń, wykorzystaną można wielkość znormalizowaną:  
To evaluate the damages location, can be used standardized size:

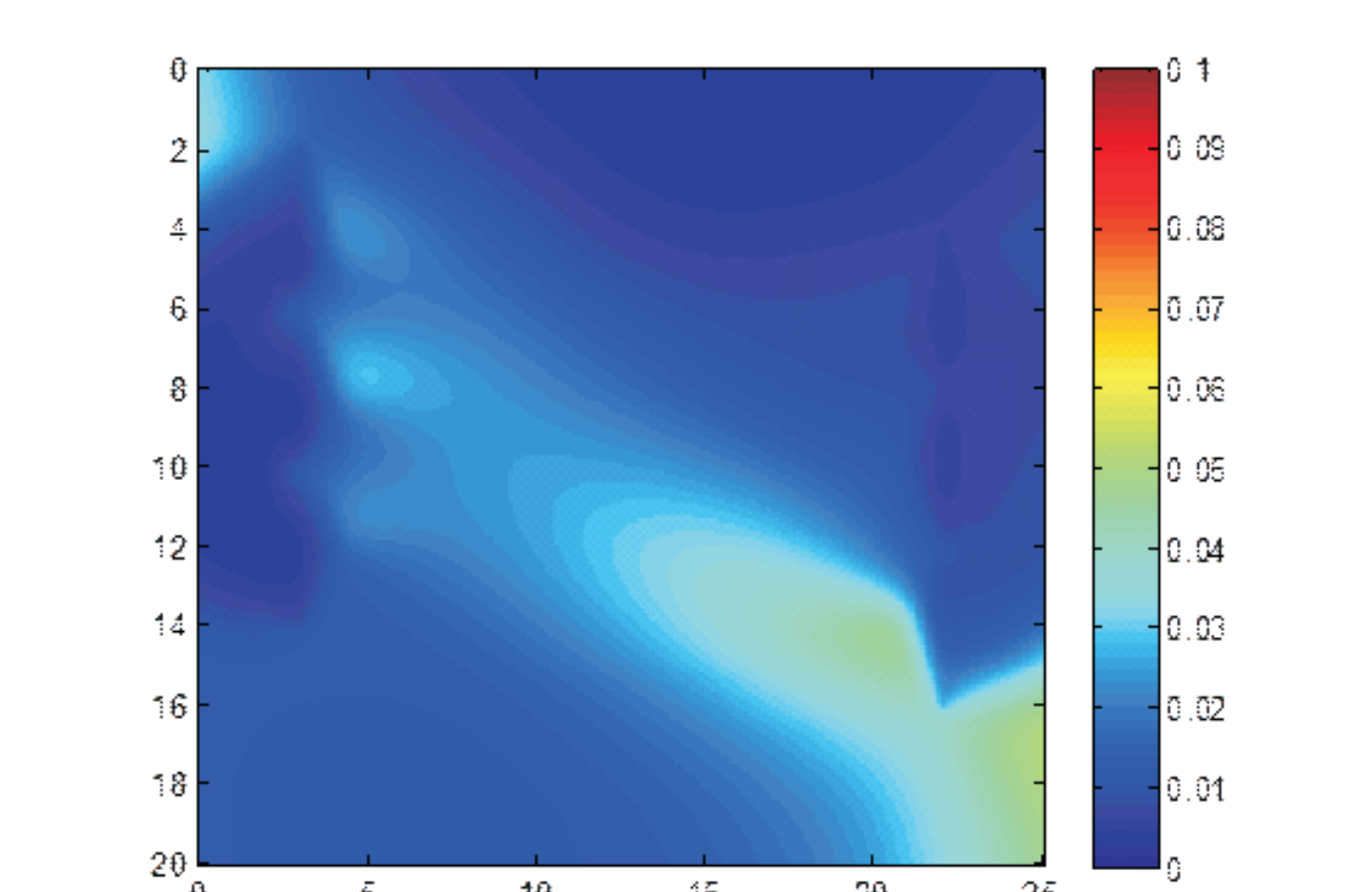
$$\tilde{I}(x,y) = \frac{1}{N(x,y)} \sum_{g,s} I(x,y,g,s)$$

gdzie

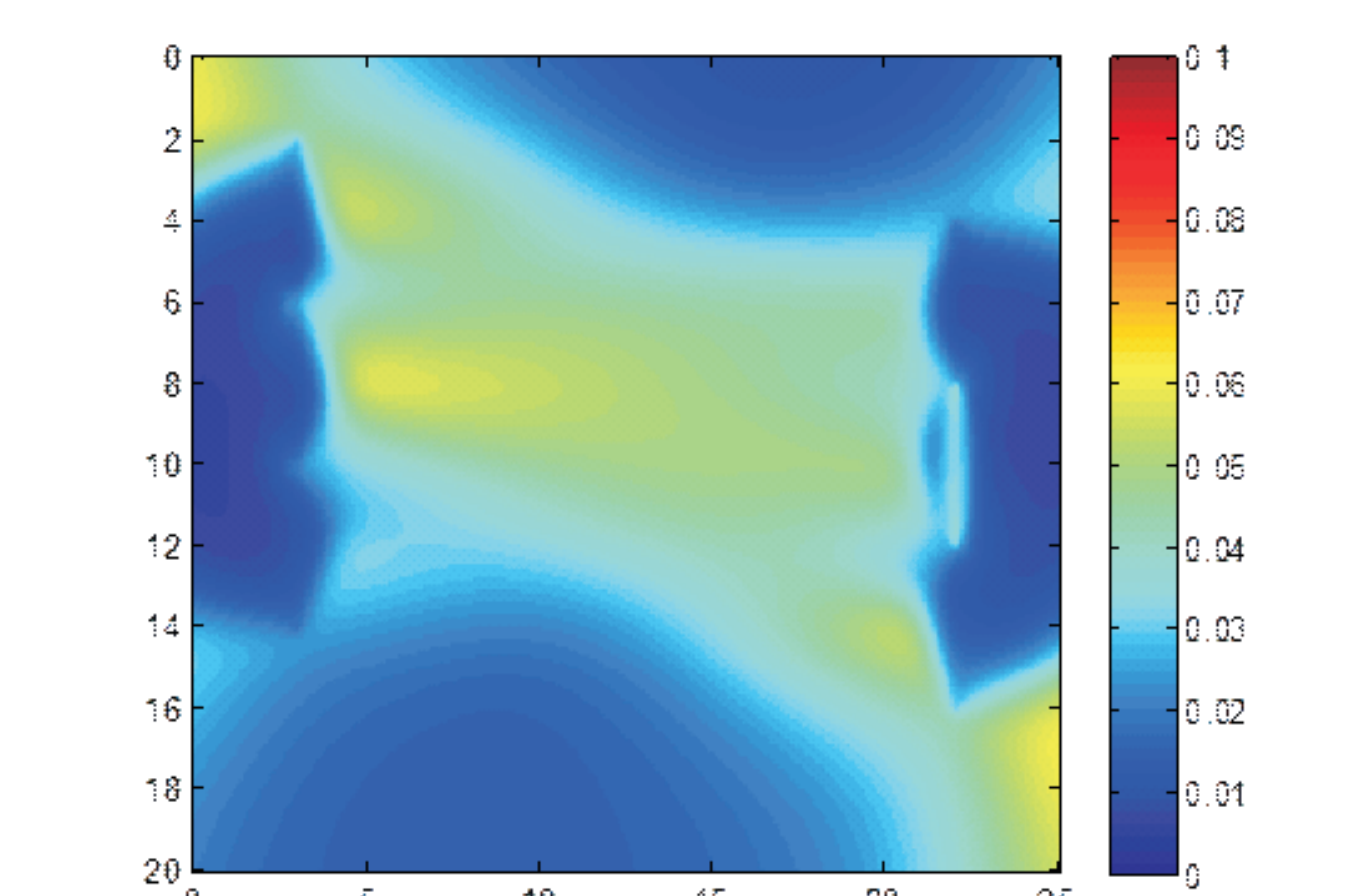
$$N(x,y) = \frac{1}{(l_g(x,y) + l_s(x,y))^2}$$



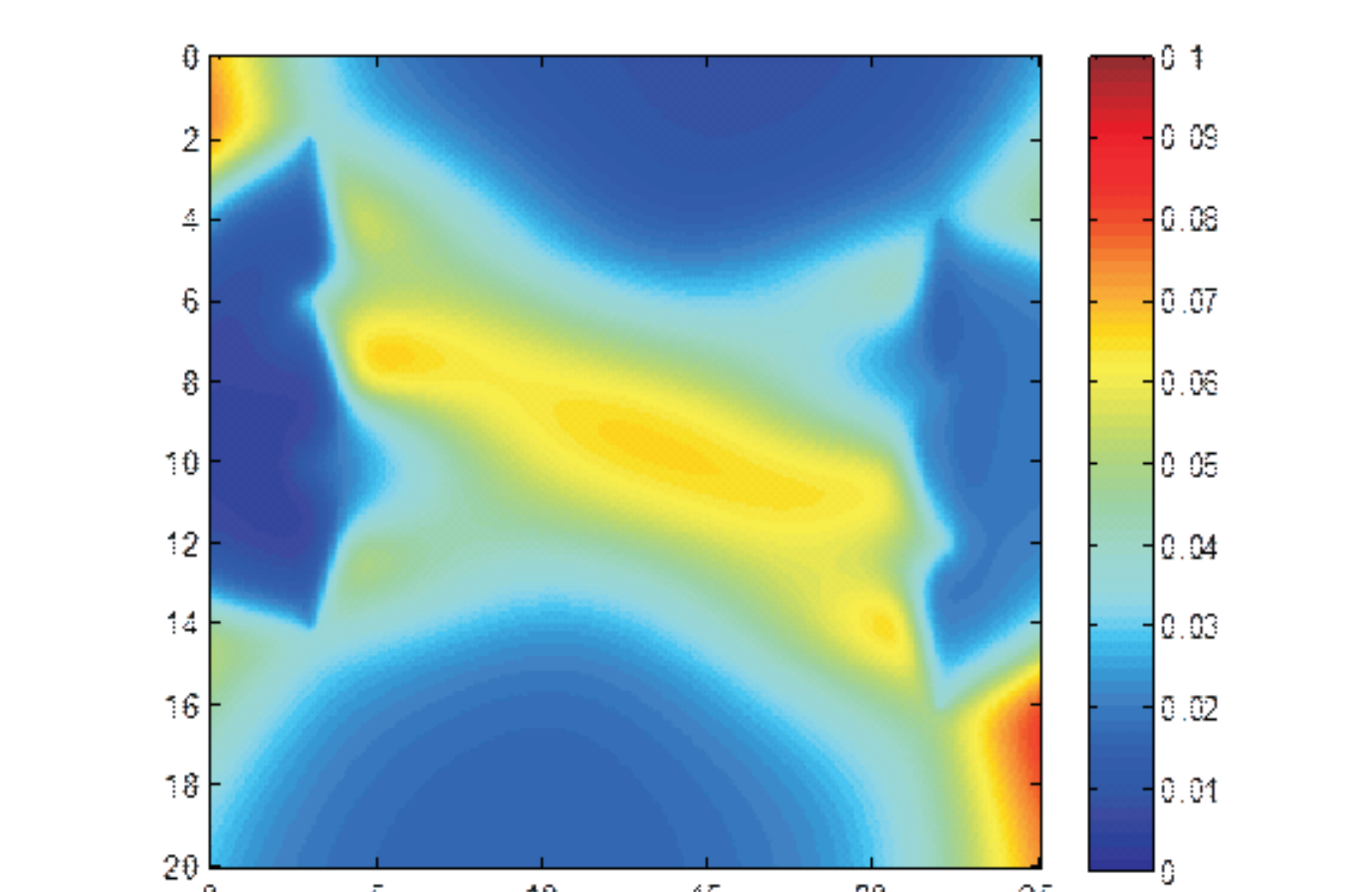
Rys. 9. Mapa lokalizacji uszkodzeń dla próbki nienuszkodzonej  
Fig. 9. Damages location map for the undamaged sample



Rys. 10. Mapa lokalizacji uszkodzeń po uderzeniu o energię 3 J  
Fig. 10. Damages location map after drop with an energy of 3 J



Rys. 11. Mapa lokalizacji uszkodzeń po uderzeniu o energię 6 J  
Fig. 11. Damages location map after drop with an energy of 6 J



Rys. 12. Mapa lokalizacji uszkodzeń po uderzeniu o energię 9 J  
Fig. 12. Damages location map after drop with an energy of 9 J

#### Wnioski Conclusions

- Relacje pomiędzy szacowanymi rozmiarami rozwarstwień wykrytych metodą termografii impulsowej (TT) oraz metodą ultradźwiękową (UT) zależą od rodzaju struktury poddanej badaniom nieniszczącym. W przypadku próbek epoksydowo – szklanych (GFRP) wyniki oceny uszkodzeń metodą TT są wyraźnie mniejsze od rezultatów uzyskanych metodą UT, zaś w przypadku próbek epoksydowo – węglowych (CFRP) są one porównywalne. Efekt ten spowodowany jest różnicami we własnościach termodynamicznych lub mechanicznych obydwu materiałów.
- Możliwa jest detekcja uszkodzeń udarowych z wykorzystaniem przetworników PZT zintegrowanych ze strukturą materiału. Możliwości diagnostyczne systemu zależą głównie od rodzaju monitorowanej struktury (GFRP lub CFRP) oraz parametrów sygnału wymuszenia.
- Opracowano i przetestowano metody oceny wpływu integracji czujników ze strukturą kompozytu i wpływu ich integracji na parametry impedancyjne czujnika.
- W zależności od rodzaju zastosowanych przetworników możliwe jest oszacowanie położenia uszkodzeń udarowych w obrębie danej sieci przetworników PZT, dzięki opracowanym algorytmom wizualizacji uszkodzeń.

1. Relations between the estimated size of the delamination detected by pulsed thermography (TT) and ultrasonic (UT) depend on the type of structures subjected to non-destructive testing. For samples epoxy - glass (GFRP) the results of the evaluation of damage by TT are clearly lower than the results obtained by the UT, and in the case of samples epoxy - carbon (CFRP) are comparable. This effect is due to differences in the mechanical or thermodynamic properties of both materials.

2. It is possible to impact damage detection using PZT transducers integrated with the structure of the material. Diagnostic capabilities of the system depends mainly on the type of the monitored structure (GFRP or CFRP) and signal parameters extortion.

3. Methods to assess the impact of the integration of sensors with composite structure and the impact of their integration into the sensor impedance parameters were developed and tested.

4. Depending on the nature of the transducers it is possible to estimate the position of impact damage in a given network PZT transducers, thanks to developed algorithms of visual damage.

#### Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

#### Referaty

- Dziendzikowski M., Dragan K., Kurnyta A., Klysz S., Leski A.: „Health Monitoring of the Aircraft Structure during a Full Scale Fatigue Test with Use of an Active Piezoelectric Sensor Network”, Solid State Phenomena, Vol. 220-221, 328-332, 2014
- Kurnyta A., Dragan K., Dziendzikowski M., Latoszek A., „Wykrywanie uszkodzeń w konstrukcji samolotu w trakcie realizacji pełnoobrotowej próby zmęczeniowej z wykorzystaniem czujników zintegrowanych” Przegląd spawalnictwa nr 12/2013, ISSN 0033-2364, pp. 54-57
- Dragan K., Dziendzikowski M., Kurnyta A., Leski A., Bienias J., „Structural Health Monitoring of Composite Structures with Use of Embedded PZT Piezoelectric Sensors”, 16th European Conference on Composite Materials, 22-26.06.2014
- Dragan K., Dziendzikowski M., Kurnyta A., Klysz S.: „Long Term Monitoring of an Aircraft Structure During a Full Scale Fatigue Test”, 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, 8-11.07.2014
- Dziendzikowski M., Dragan K., Kurnyta A., Klysz S., Leski A.: „Sensing Damages of Aircraft Structures with Use of Elastic Waves Generated by Embedded PZT Transducers”, 10th International Conference Mechatronic Systems and Materials, 7-10.07.2014