

Materiały inteligentne - oraz bazujące na nich systemy zespolone (ang. smart embedded systems) do zastosowania w lotnictwie

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

Wyniki badań

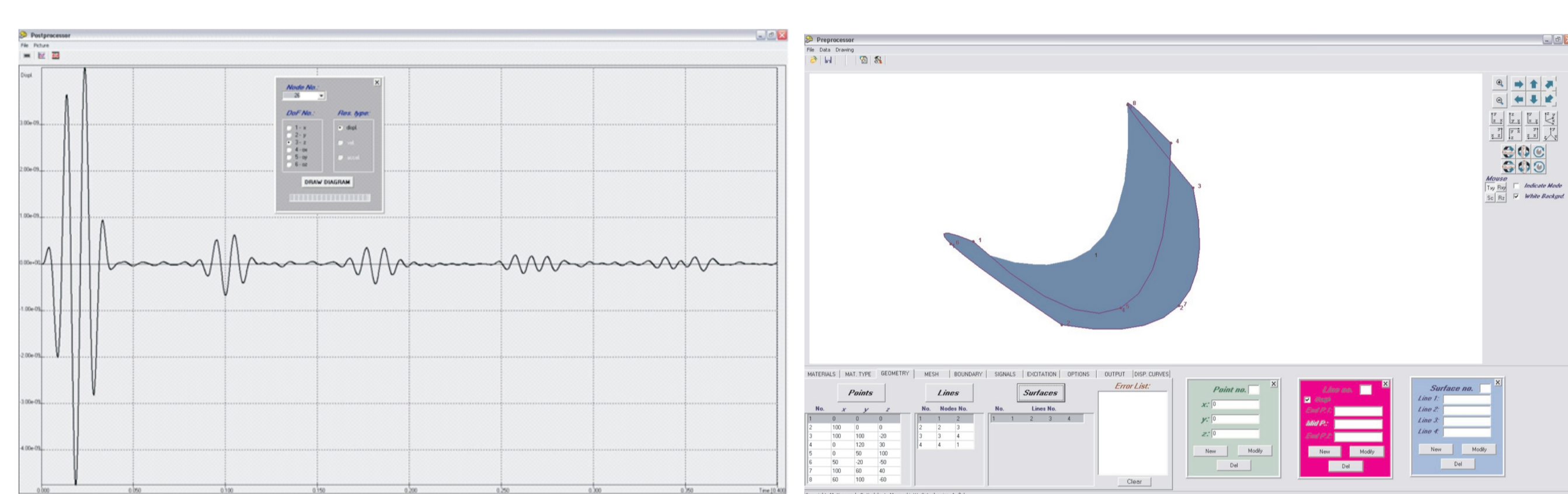
Badania skupione były na analizie możliwości wykrywania i lokalizacji defektów konstrukcji lotniczych metodą propagacji fal sprężystych. Ponadto kontynuowano prace związane z programem do symulacji zjawiska propagacji fal sprężystych i przygotowaniem jego komercyjnej wersji.

Przeprowadzono badania literaturowe nad możliwością zastosowania fal sprężystych w dziedzinie wykrywania uszkodzeń.

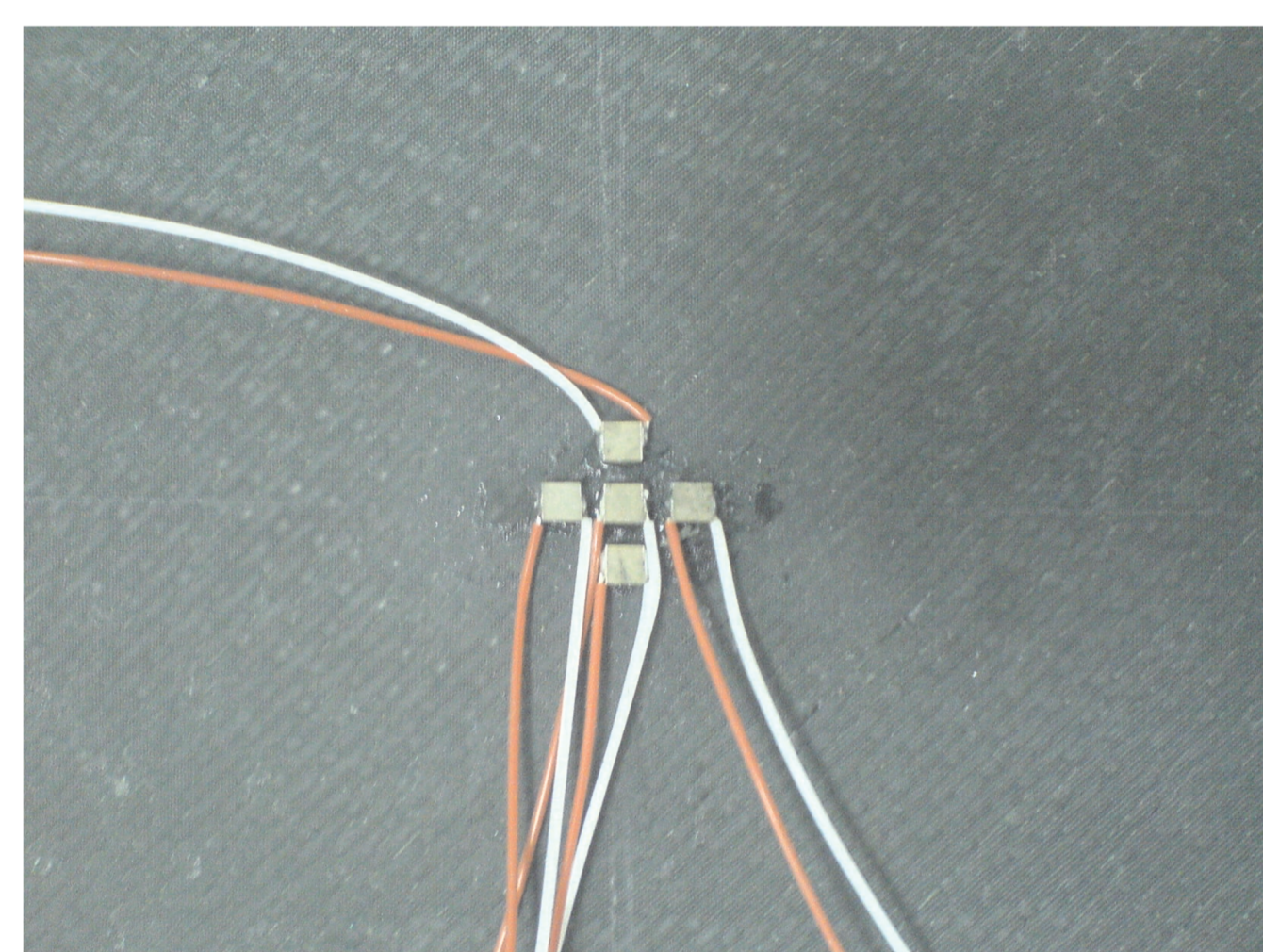
Opracowano algorytmy numerycznej przetwarzania sygnałów cyfrowych pozwalające na określenie położenia uszkodzenia. Rozważano algorytmy oparte na energii fali odbitej od uszkodzenia oraz algorytmy typu beamforming wykorzystujące dodatkowo zjawisko interferencji fal.

Czułość fal sprężystych na uszkodzenia - podsumowanie badań literaturowych

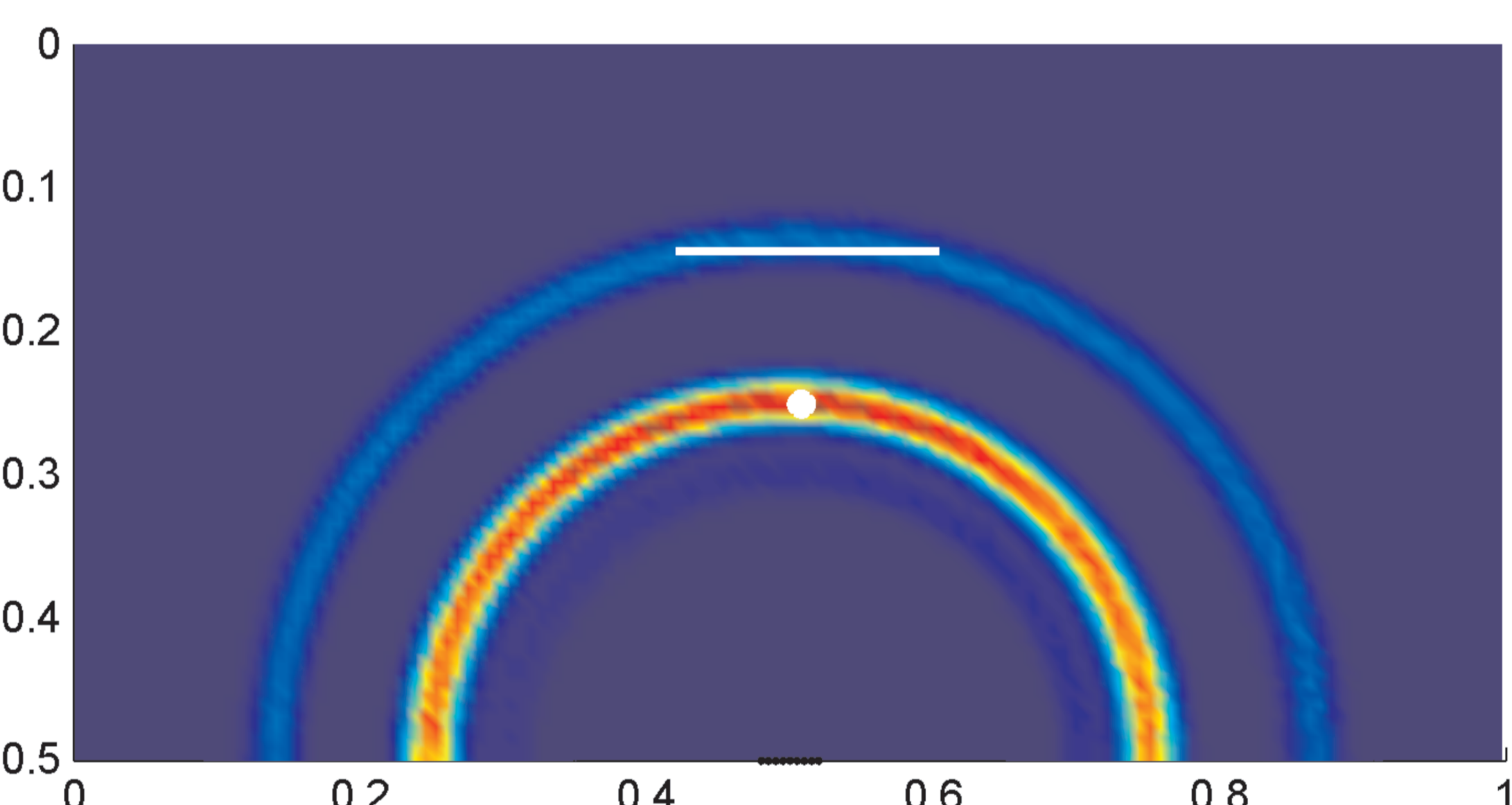
fale A0:
rozwarstwienia i pęknięcia warstw materiału kompozytowego;
powierzchniowe: korozja, pęknięcia
fale S0:
pęknięcia niezależnie od ich położenia wzdłuż głębokości materiału



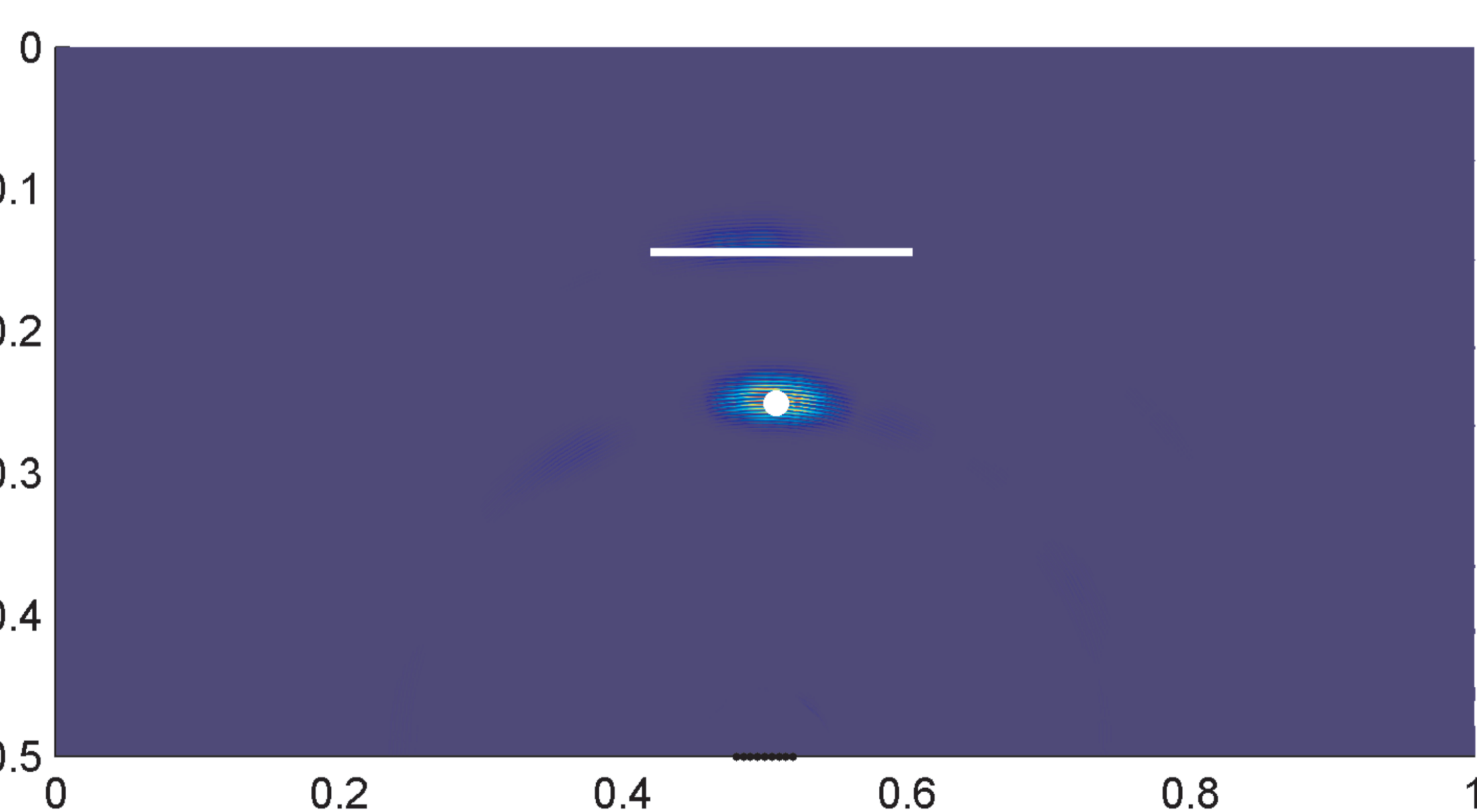
Rys. 1. Przykłady wizualizacji zjawiska propagacji fal sprężystych



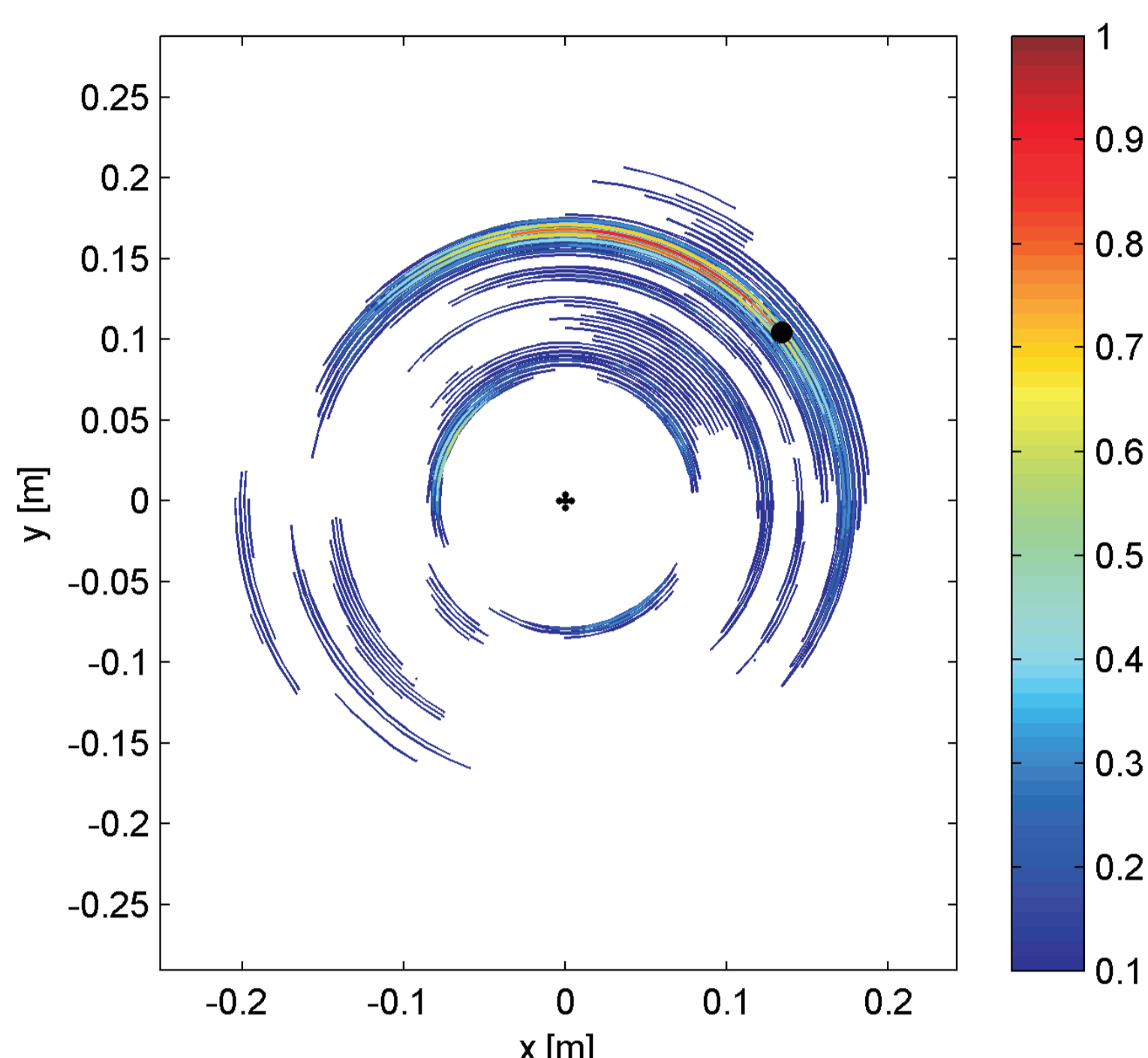
Rys. 2. Przykładowy układ czujników



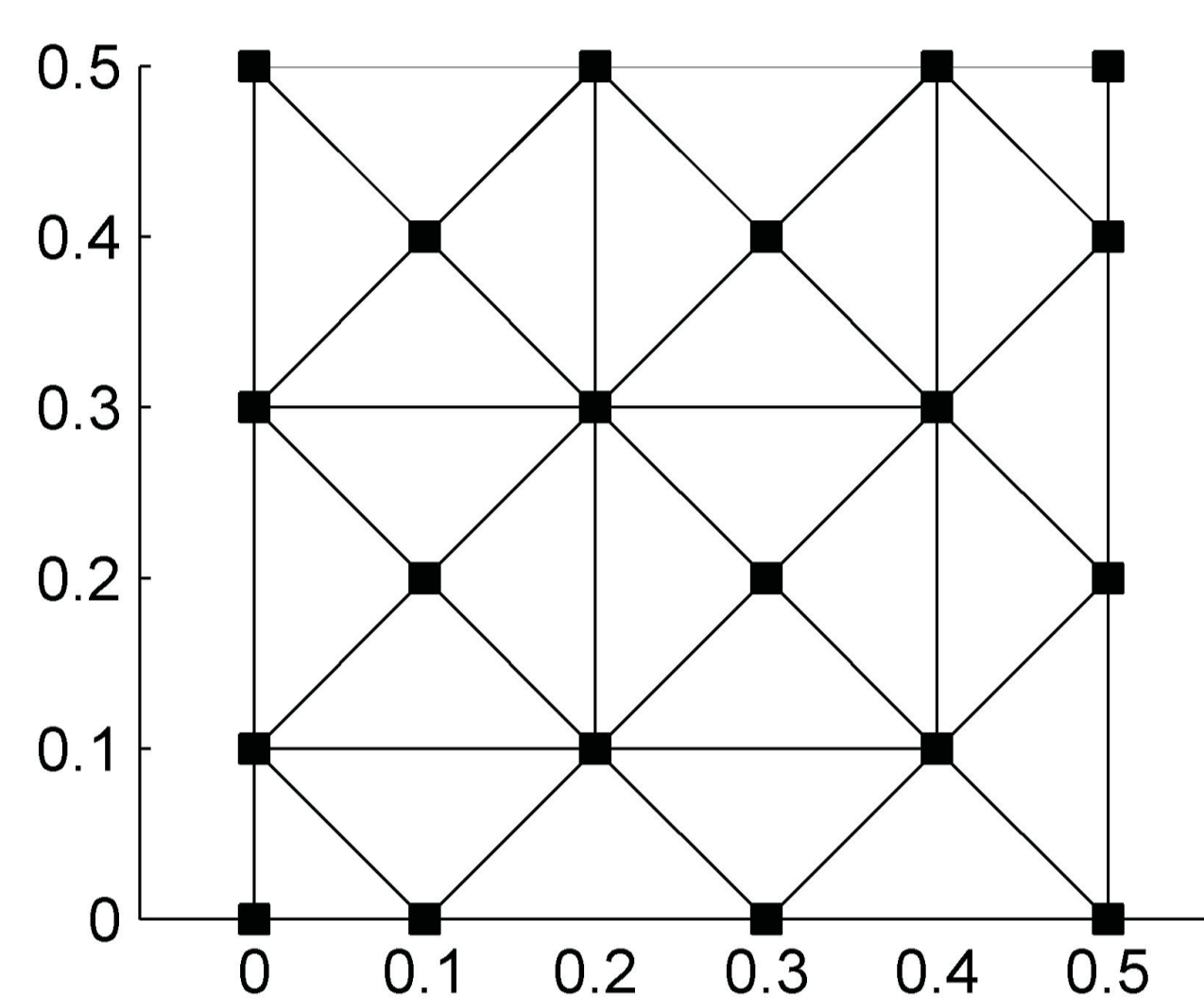
Rys. 3. Wynik lokalizacji dwóch uszkodzeń dla algorytmu opartego na energii fali odbitej



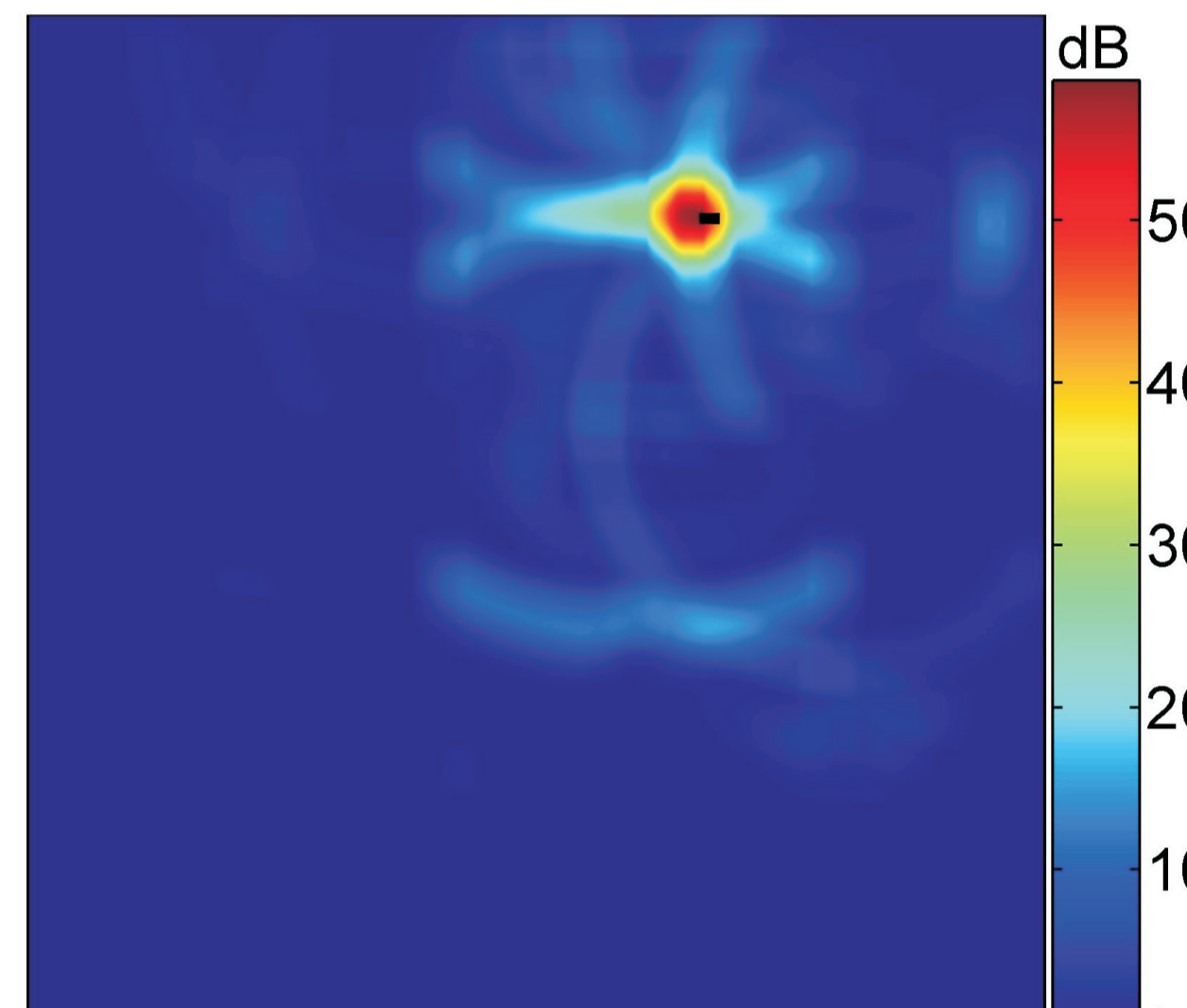
Rys. 4. Wynik lokalizacji dwóch uszkodzeń dla algorytmu typu beamforming



Rys. 5. Wynik lokalizacji uszkodzenia w lotniczym panelu kompozytowym



Rys. 6. Rozproszona siatka czujników



Rys. 7. Wynik wykrywania pęknięcia za pomocą rozproszonej siatki czujników

Wnioski

Możliwe jest jednoznaczne określenie położenia zarówno jednego jak i większej liczby uszkodzeń.

Algorytm typu beamforming zapewnia jednoznaczne wskazanie uszkodzenia w przypadku zastosowania go do sygnałów zarejestrowanych przez skupiony układ czujników.

Zaproponowane algorytmy przetwarzania sygnałów zostały z powodzeniem zastosowane do fragmentu poszycia śmigłowca.

Przykłady zastosowania w lotnictwie

Układ czujników przedstawiony na Rys. 2 zastosowano do lokalizacji uszkodzenia w panelu z włókna węglowego pochodzącym ze śmigłowca AW 139. Rysunek 5 przedstawia wynik lokalizacji.

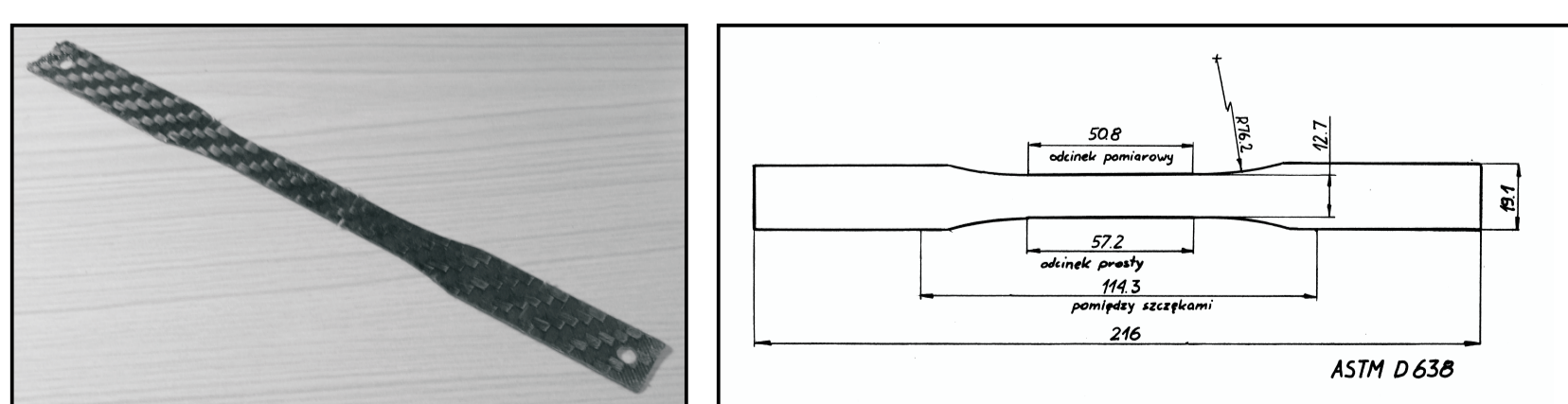
Wyniki badań

Struktury przekładkowe stanowią szeroko stosowane elementy ustrojów nośnych, pracujące jako płyty, powłoki lub belki, rzadziej jako kolumny. Z punktu widzenia statyki przenoszą obciążenia zgodnie z modelem struktury skorupowej. Dominującym stanem obciążenia jest zginanie z udziałem sił poprzecznych, a w mniejszym stopniu rozciąganie i ściskanie. Podstawową konfiguracją jest struktura złożona z trzech warstw. Między dwiema zewnętrznymi warstwami o małej grubości i wysokiej wytrzymałości umieszczona jest warstwa o niskiej wytrzymałości i małej gęstości, lecz o stosunkowo dużej grubości. Warstwy zewnętrzne nazywane są okładzinami, natomiast wewnętrzna rdzeniem [8].

Okładziny z kompozytów polimerowych zbrojonych włóknem

Rolą okładzin jest zapewnienie przenoszenia momentów gnących oraz sił normalnych, a w niewielkim stopniu sił tnących. Przeprowadzanie obliczeń wytrzymałościowych uwarunkowane jest wyznaczeniem stałych sprężystych oraz granicznych wartości naprężeń niszczących kompozyt. Jest to czynność o istotnym znaczeniu, gdyż wartości stałych zależą nie tylko od materiałów-składników kompozytu, ich procentowego udziału w kompozycie, ale również, w dużej mierze, od sposobu i warunków jego wykonania. Aby zapewnić ich powtarzalność, wymaga się rygorystycznego przestrzegania określonych warunków technicznych. Ma to szczególne znaczenie w odniesieniu do struktur lotniczych. Podstawowe badania materiałowe zachowują zatem również funkcję kontrolną w trakcie procesu produkcyjnego [3]. Istnieje szereg znormalizowanych metod badań określonych właściwości mechanicznych kompozytów. Jako podstawowe, można wymienić normy American Society for Testing Materials [1], najczęściej stosowane przez wytwórców, jak i polecane w literaturze. W Polskich Normach natomiast problematyka ta prezentuje się nadzwyczaj skromnie. Istnieje bowiem niewielka liczba opracowań ujmująca zagadnienia wyznaczania stałych materiałowych laminatów z włókien szklanych i węglowych. Podobnie ubogo prezentuje się katalog norm ISO. Ponadto istnieje wiele norm wewnętrznych (tzw. norm zakładowych) opracowywanych przez wytwórców. Jako przykład wymienić tutaj można normy Instytutu Lotnictwa w Warszawie, bądź nieistniejących już Szybowcowych Zakładów Doświadczalnych w Bielsku-Białej.

Większość niezbędnych do określenia wielkości można wyznaczyć podczas statycznej próby rozciągania oraz ścisłej próby rozciągania. Wykonuje się je przy użyciu znormalizowanych próbek na uniwersalnych zrywarkach.

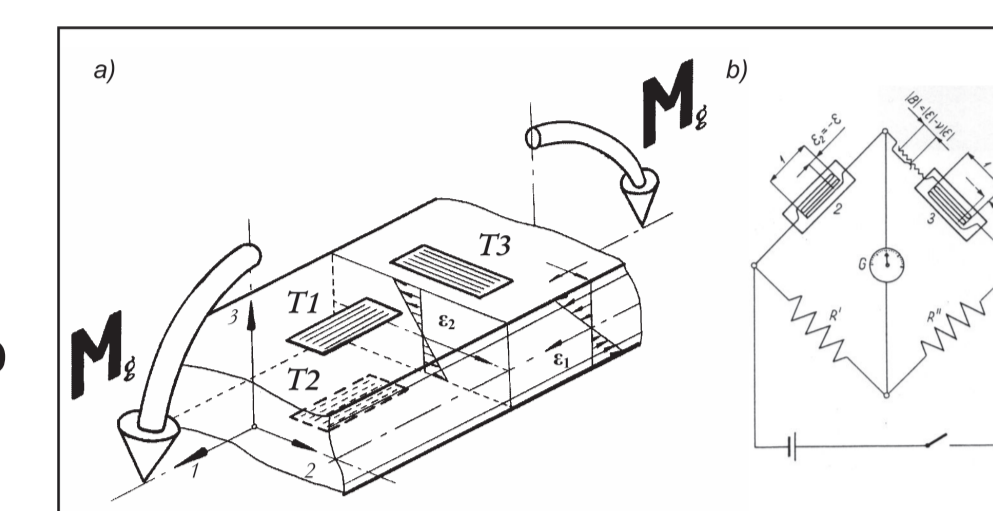


Rys. 1. Próba ASTM D638-03.

Styczna próba rozciągania wzdłuż kierunków głównych ortotropii umożliwia uzyskanie charakterystyki naprężenie - odkształcenie materiału oraz wytrzymałości na rozciąganie. W próbie ścisłej, mierząc metodami dokładnymi wydłużenie próbki w trakcie rozciągania na kierunkach pokrywających się z głównymi kierunkami ortotropii, wyznacza się moduły sprężystości liniowej Younga

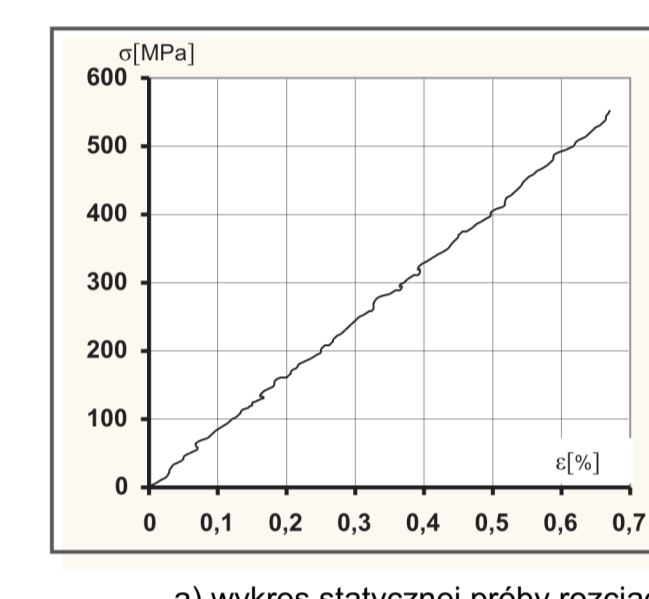
$$E_1 = \frac{\Delta P l_0}{A_p \Delta l}, \quad i=1,2, \quad E_{45} = \frac{P}{A_p \epsilon_{45}}, \quad \frac{1}{E_{45}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{E_1} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_2} \right), \quad G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}}$$

Współczynnik Poissona jest możliwy do wyznaczenia również podczas ścisłej próby rozciągania przy odpowiednim wzbogaceniu pomiaru odkształceń o pomiary na kierunku prostopadłym do kierunku rozciągania. Jednak praktyczna realizacja tego zadania jest kłopotliwa. W takich sytuacjach stosować można alternatywną metodę pomiaru współczynnika w oparciu o zginanie belki. W tym celu, badany element obciąża się tak, by wzdłuż jednego z kierunków głównych ortotropii występowało czyste zginanie. Wielkościami mierzonymi są odkształcenia wzdłuż długości belki po stronie włókien rozciąganych oraz ściskanych, a także odkształcenie na kierunku poprzecznym (na przykład po stronie włókien rozciąganych), jak przedstawia to rysunek 2a



Rys. 2. Pomiar współczynnika Poissona przy pomocy belki zginanej: a) schemat układu obciążającego; b) tensometri w półmroku.

W trakcie prób statycznych kompozyty wykazują charakterystykę liniową w całym zakresie deformacji (rys. 3a). Wynika to z liniowości zależności charakterystycznych dla materiałów-składników kompozytu. Moment zniszczenia kompozyt sygnalizuje wcześniejszymi efektami akustycznymi, świadczącymi o niszczeniu się pojedynczych włókien zbrojenia. Zniszczenie następuje gwałtownie i przyjmuje formę pęknięcia próbki w przekroju prostopadłym do kierunku działającej siły. Niekiedy ma to miejsce w strefie przejściowej, poza odcinkiem pomiarowym. W próbie ścisłej pomiary prowadzono w zakresie odkształceń nie przekraczających przedziału wartości dopuszczalnych stosowanych w tenometrach (rys. 3b), w zakresie od 0.1+0.5 siły zrywającej. W trakcie badania każdej próbki dokonywano kilku odczytów, mierząc przyrosty siły i odkształcenia.



Rys. 3. Próba statyczna i ścisła



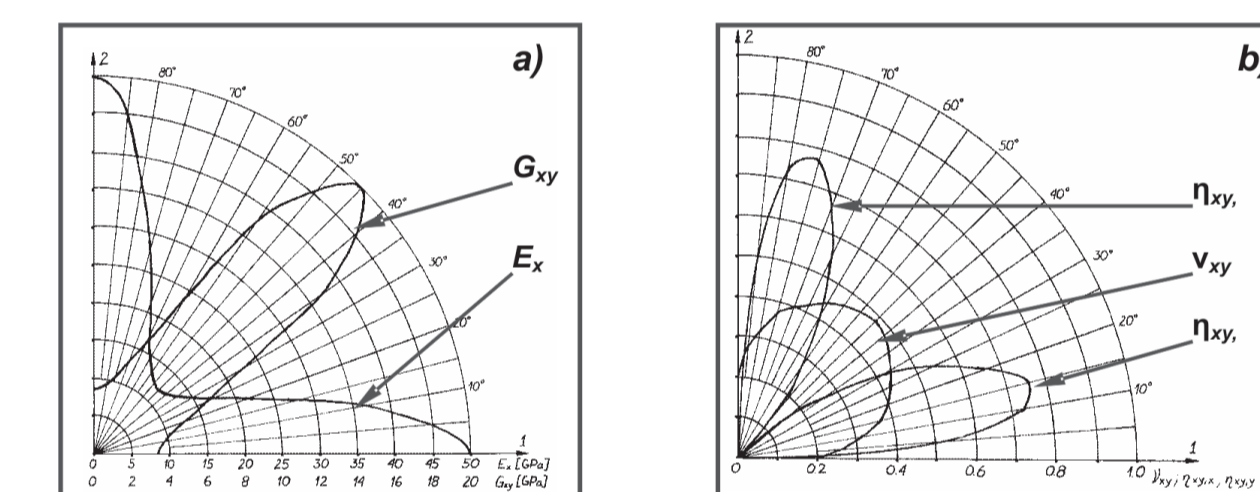
Rys. 4. Pomiar współczynnika Poissona.

TABLICA 1.

Właściwości mechaniczne kompozytu polimerowego zbrojonego włóknem

Właściwość	Jednostka	Wartość	Właściwość	Jednostka	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	560	Moduł Kirchhoffa	GPa	3.38
Moduł Younga 1=2	GPa	50	Liczba Poissona 12	1	0.20
Wydłuzenie	%	0.6	Wydatek siły niszczącej na jedną warstwę	N/mm	185

Na podstawie równań konstytutywnych dla badanej warstwy kompozytu określono zależności stałych materiałowych w funkcji kąta odchylenia kierunków głównych ortotropii. Przebiegi te, dla kompozytu o właściwościach opisanych w tabelicy 1, przedstawia rysunek 5



RYSUNEK 5. Zmiana wartości zastępczych stałych materiałowych w funkcji kąta odchylenia kierunków głównych ortotropii: a) moduły sprężystości; b) współczynniki Poissona i Lechnickiego

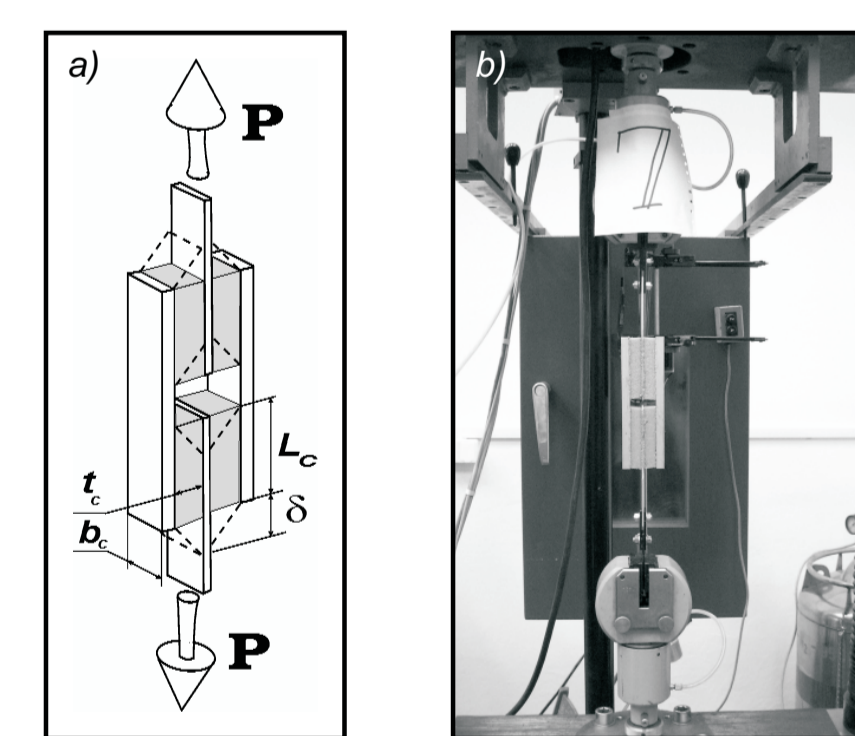
Rdzenie z tworzyw sponionych

W strukturach przekładkowych stosowanych w budowie płatowców najczęstszym rozwiązaniem są, obok rdzeni komórkowych, rdzenie z izotropowych sponionych tworzyw sztucznych na bazie poliuretanu. W warunkach rozciągania, zginania i ścinania ich charakterystyki wykazują duży zakres liniowości. W spektrum obciążeń eksploatacyjnych można je traktować jako ciała izotropowe, liniowo-sprężyste. Takie podejście jest powszechne w mechanice struktur przekładkowych [5]. Do przeprowadzania obliczeń wytrzymałościowych niezbędna jest zatem znajomość trzech stałych materiałowych: modułu Younga, Kirchhoffa oraz współczynnika Poissona.

TABLICA 2

Właściwości mechaniczne tworzywa sponionego Divinycell® H80

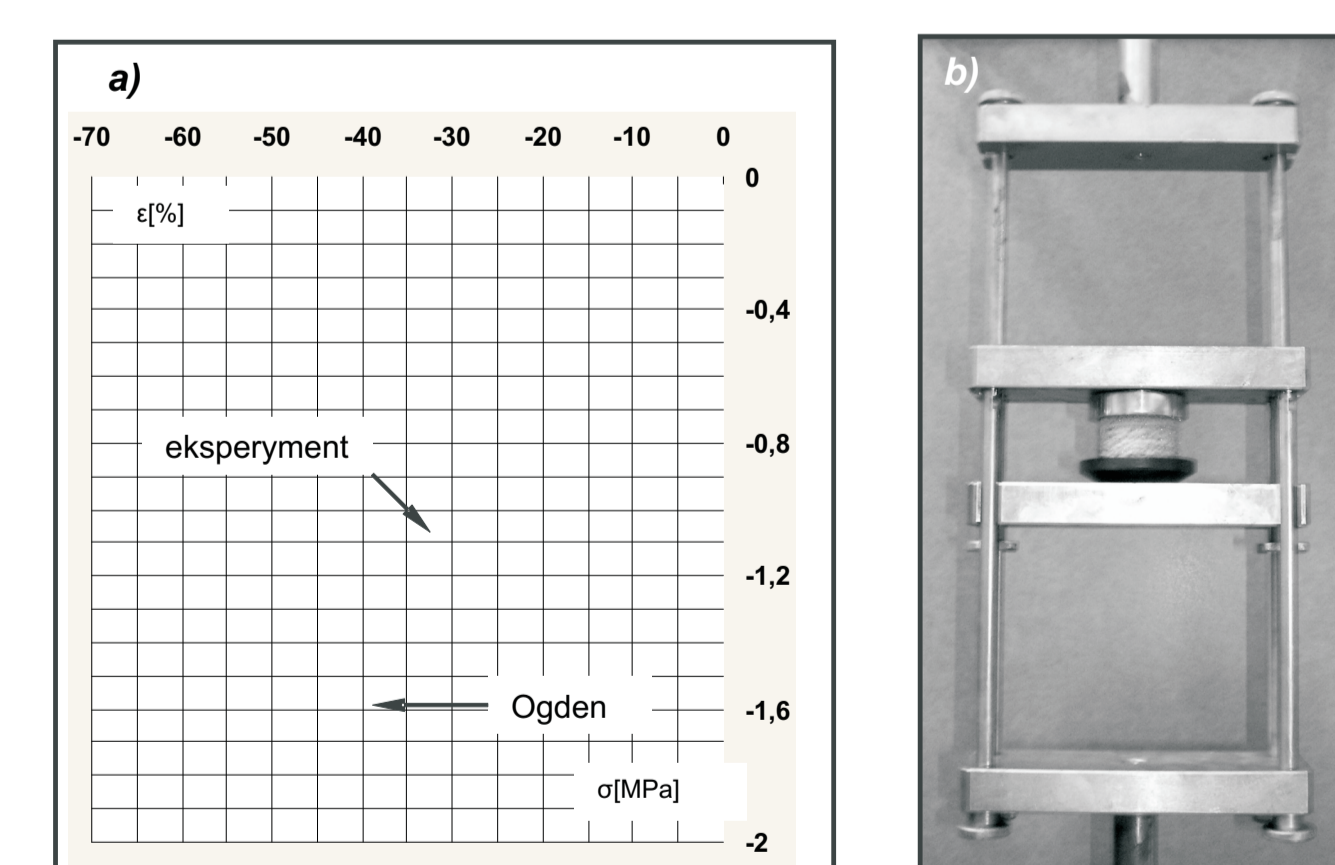
Właściwość	Jednostka	Wartość	Właściwość	Jednostka	Wartość
Gęstość ISO 845	kg/m³	80	Wytrzymałość na ścinanie ASTM C723	MPa	1.15
Wytrzymałość na rozciąganie ASTM D1623	MPa	2.5	Moduł Kirchhoffa ASTM C723	MPa	27
Moduł Younga ASTM D1623	MPa	95	Odształcenie postaciowe ASTM C723	%	30



Jedyną wielkością, którą poddano sprawdzeniu był moduł sprężystości postaciowej, najbardziej istotny z punktu widzenia przeprowadzanych badań.

Rys. 6. Pomiar modułu Kirchhoffa rdzeni sponionych

a) schemat próbki
b) próbka pod obciążeniem.



Rys. 7. Statyczna próba ścisłania tworzywa sponionego. a) porównanie eksperymentu z krzywą analityczną o współczynnikach: N=1, \mu_1=27[MPa], \alpha=57; b) stanowisko.

W celu wyznaczenia stałych modelujących materiał jako ciało Ogdena przeprowadzono statyczną próbę ścisłania próbek walcowych o wysokości 25 i średnicy 50 [mm].

Wnioski

Badane tworzywo sponione w trakcie próby wykazywało zachowanie wzorcowe dla tego typu materiałów. Naprężenie krytyczne utraty stateczności ścian komórek wynosi około 1[MPa]. Dobierając współczynniki równania konstytutywnego Ogdena utrzymano w mocy założenie o $\nu_c=0$, co potwierdzono eksperymentalnie – próbka w trakcie ścisłania nie zmieniła swojej średnicy. Testując wiele zestawów współczynników kierowano się najlepszym doborem gradientu charakterystyki w początkowej fazie ścisłania oraz zlokalizowaniem punktu załamania krzywej (początek wyboczenia). Przyjęty model nie pozwolił na uzyskanie plateau fazy utraty stateczności. Najlepsze rezultaty uzyskano, przyjmując $N=1$, co sprowadzało równanie do postaci:

$$\sigma_1 = \frac{2}{\lambda_1} \frac{G_c}{\alpha} (\lambda_1^\alpha - 1)$$

Badane tworzywo charakteryzuje się wysoką sztywnością oraz kruchością, co niesie za sobą gwałtowne zmiany gradientu charakterystyki. Próbę oraz jej wynik wraz z krzywą analityczną prezentuje rysunek 7.