

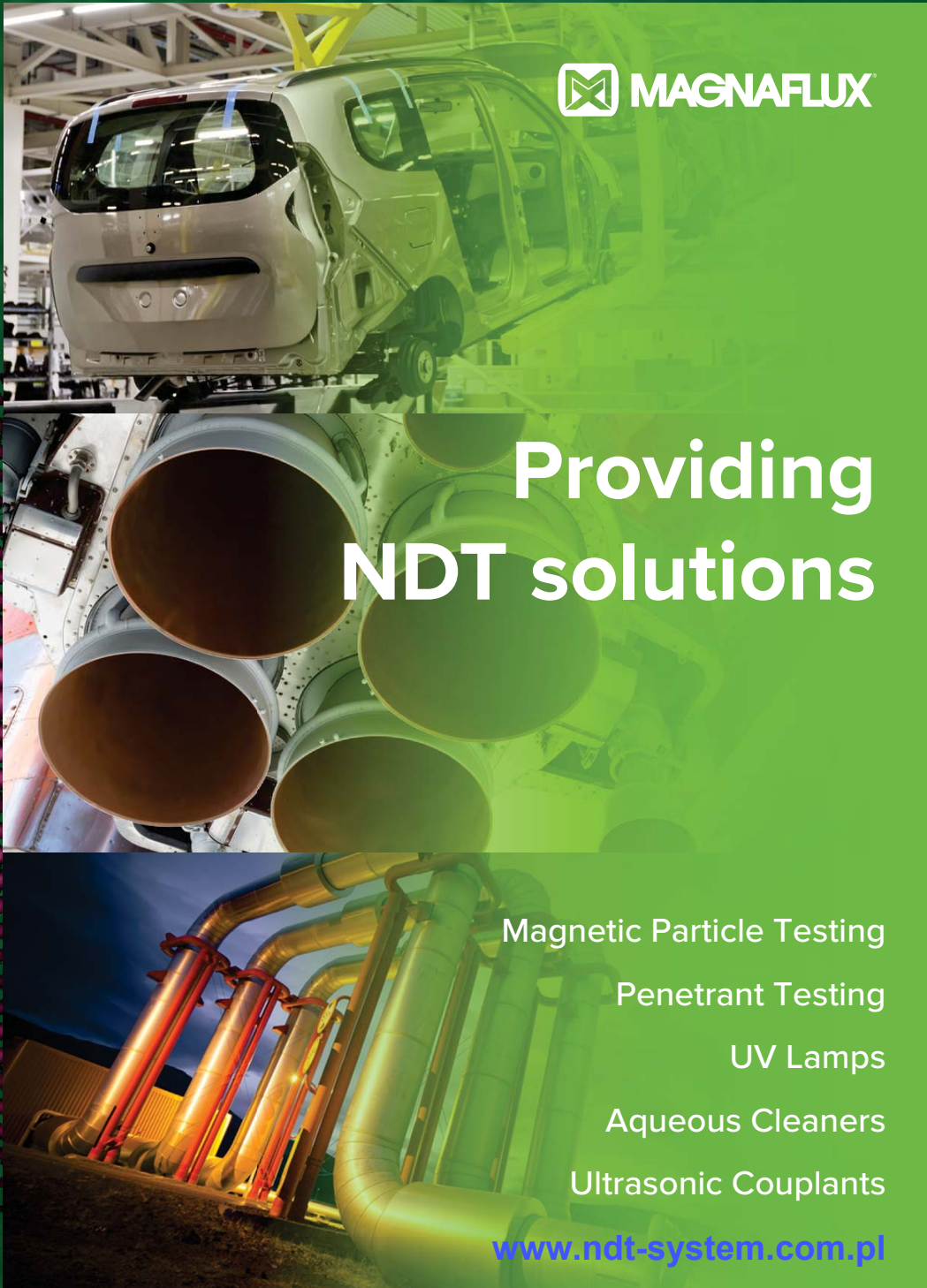
# Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka


Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

## 50. KKBN

[www.kkbn.pl](http://www.kkbn.pl)



 **MAGNAFLUX**

### Providing NDT solutions

- Magnetic Particle Testing
- Penetrant Testing
- UV Lamps
- Aqueous Cleaners
- Ultrasonic Couplants

[www.ndt-system.com.pl](http://www.ndt-system.com.pl)

## DXR75P-HR

### Mały system obrazowania o najwyższej rozdzielczości do krytycznych zastosowań

Detektor DXR75P-HR daje wysoką rozdzielczość pikseli 75  $\mu\text{m}$ , wymaganą do rozróżnienia drobnych szczegółów w krytycznych zastosowaniach. Detektor obejmuje kontrolę spoin klasy B według ISO 17636-2, dając precyzyjne obrazy spełniające najostrejsze wymagania.



Dzięki małej szerokości detektor jest idealny do tworzenia obrazów w sytuacjach o ograniczonej swobodzie ustawienia.

DXR75P-HR jest odpowiedni do zastosowań krytycznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola spoin w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce i lotnictwie:**
  - rurociągi transportowe
  - złożone konstrukcje (odcinki rurociągu)
  - rury kotłowe
  - przewody paliwowe
  - rury ciśnieniowe
  - zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe
- **kontrola spoin w okrętownictwie**

## DXR140P-HE

### Duży system obrazowania o wysokim kontraście do radiografii o wysokiej energii

DXR140P-HE jest idealnym przenośnym detektorem przeznaczonym do zastosowań o wysokiej energii (izotopowych). Optymalne wewnętrzne ekranowanie zapobiega promieniowaniu rozproszonemu o niskiej energii, ujemnie wpływającemu na jakość obrazu i żywotność elektroniki.



Detektor DXR140P-HE może być stosowany z izotopami i promieniowaniem RTG o wysokiej energii (powyżej 450 kV), jest odpowiedni do ogólnych zastosowań radiograficznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola eksploatacyjna w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce:**
  - badanie korozji pod izolacją
  - pozycjonowanie zaworów
  - pomiar grubości ścianki
  - badanie podpór rurociągów
  - rury kotłowe
- **kontrola odlewów**
- **konserwacja, naprawa i przeglądy w lotnictwie**
- **przemysł zbrojeniowy i bezpieczeństwo**
- **kontrola konstrukcji:**
  - beton, mosty, podpory, ...
- **nauka, sztuka i archeologia**
- **kontrola linii energetycznych, kontrola GIS**





Badania Nieniszczące i Diagnostyka  
Agenda Wydawnicza SIMP  
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin  
e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl  
www.bnid.pl

## ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF  
Tomasz Chady

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF  
Adam Sajek  
Ryszard Pakos

CZŁONKOWIE REDAKCJI / MEMBERS OF THE BOARD  
Jacek Grochowalski  
Ryszard Łukaszk

## REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY  
Sławomir Mackiewicz, Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH  
Bogdan Piekarczyk

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ  
/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH  
Grzegorz Jezierski, Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ  
/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH  
Krzysztof Dragan, Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS  
Bogusław Ładecki,

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA  
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora, *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Przewodniczący/President*

Prof. Krishnan Balasubramaniam, *Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India*  
Prof. Alexander Balitskii, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Gilmar F. Batalha, *University of Sao Paulo, Brasil*

Prof. Leonard J. Bond, *Iowa State University, USA*

Dr Pierre Calmon, *CEA, France*

Prof. Ermanno Cardelli, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Zhenmao Chen, *Xi'an Jiaotong University, China*

Prof. Leszek A. Dobrzański, *World Academy of Materials and Manufacturing Eng., Polska*

Dr Hubert Drzeniek, *AMIL Werkstofftechnologie GmbH, Germany*

Prof. Antonio Faba, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Nikolaos Gouskos, *University of Athens, Grece*

Mgr Paweł Grześkowiak, *UDT, Polska*

Prof. Jerzy Hoła, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Jolanta Janczak-Rusch, *Empa, Switzerland*

Mgr Ryszard Jawor, *Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska*

Dr Grzegorz Jezierski, *Politechnika Opolska, Polska*

Inż. Sławomir Józwiak, *NDT Systems, Polska*

Mgr Pablo Katchadjian, *National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina*

Mgr Jan Kielczyk, *Energomontaż-Północ, Polska*

Mgr Jacek Kozłowski, *TEST PLB, Polska*

Prof. Marc Kreutzbruck, *University of Stuttgart, Germany*

Dr. Jochen Kurz, *DB Systemtechnik GmbH, Germany*

Mgr Marek Lipnicki, *KOLI, Polska*

Prof. Leonid M. Lobanow, *Paton Welding Institute, Ukraine*

Dr Sławomir Mackiewicz, *NDT SOFT, Polska*

Dr Wojciech Manaj, *Instytut Lotnictwa, Polska*

Dr Tadeusz Morawski, *Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska*

Prof. Zinovy T. Nazarchuk, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Dr Ryszard Nowicki, *GE Energy, Polska*

Prof. Mohachiro Oka, *Oita National College of Technology, Japan*

Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, *Instytut Kolejnictwa, Polska*

Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Joao M A Rebello, *Federal University of Rio de Janeiro, Brasil*

Prof. Artur Lopes Ribeiro, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Maria Helena Robert, *University of Campinas, Brasil*

Dr hab. Maciej Roskosz, *Politechnika Śląska, Polska*

Prof. Krzysztof Schabowicz, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Valentin R. Skalsky, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Jacek Ślania, *Łukasiewicz – Górnos Śląski Instytut Technologiczny, Polska*

Prof. Jacek Szelażek, *IPPT PAN, Polska*

Dr Marek Śliwowski, *NDTEST Warszawa, Polska*

Prof. Antonello Tamburrino, *University of Cassino and Southern Lazio, Italia*

Prof. Yuji Tsuchida, *Oita University, Japan*

Prof. Andrzej Tytko, *AGH Kraków, Polska*

Prof. Lalita Udpa, *Michigan State University, USA*

Prof. Gábor Vértesy, *Hungarian Academy of Sciences, Hungary*

Dr Grzegorz Wojas, *UDT, Polska*

Prof. Sławomir Wronka, *Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska*

Prof. Chunguang Xu, *Beijing Institute of Technology, China*

Prof. Noritaka Yusa, *Tohoku University, Japan*

# Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-4/2023

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 8

## SPIS TREŚCI

**Adam Kondej, Dominik Kukla**

Nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków w technicznych stopach żelaza metodą prądów wirowych\* ..... 12

**Tomasz Katz**

Modelowanie wykrywania wad kontaktowozmęczenia w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową\* ..... 17

**Piotr Bielawski**

Diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn\* ..... 25

**Tomasz Gorzelańczyk, Krzysztof Schabowicz**

Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych\* ..... 30

**Alireza Akhlaghi**

Porosity measurement in CFRP\* ..... 37

**Jerzy Kaszyński**

Problematyka badań nieniszczących w budownictwie na krajowych konferencjach KKBN - przeżyjmy to jeszcze raz ..... 40

**Maciej Martyna, Roman Martyna**

Możliwości i ograniczenia magnetycznej metody MRT badania stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na urządzeniach dźwignicowych\* ..... 48

**Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obląkowski**

Badania ultradźwiękowe Phased Array złączów choinkowych stopki łopaty stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji\* ..... 56

**Bartosz Hyla, Michał Sobczak, Jakub Roemer**

Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej\* ..... 62

**Mateusz Napiórkowski, Mariusz Szóstak, Krzysztof Schabowicz**

Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy\* ..... 67

**Mateusz Wróbel, Maciej Szwed**

Fitness for service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT\* ..... 72

**Maciej Szwed, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński**

Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array\* ..... 80

**Karol Kaczmarek**

Wymagania normy PN-EN ISO 9712 dla egzaminu praktycznego w sektorach przemysłowych\* ..... 88

**Marcin Lewandowski, Jakub Rozbicki, Hanna Smach, Piotr Karwat,**

**Arkadiusz Szczurek, Jolanta Sala, Alicja Bera**  
Modelowe rozwiązania skanerów UTPA do badań spawów dla wież wiatrowych, sekcji płaskich oraz konstrukcji wielkogabarytowych on-shore/off-shore\* ..... 97

**Jakub Spytek, Kajetan Dziedzic, Łukasz Ambroziński, Łukasz Pieczonka**

Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal przewodzonych\* ..... 101

**Streszczenia artykułów zgłoszonych na 50. KKBN**

..... 105

**Bogusław Ładecki, Joanna Augustyn-Nadzieja**

Problemy pęknięcia zmęczeniowego wału wirnika wentylatora ze stali C45\* ..... 120

**Informacje BNID - Wspomnienie o plk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM**

..... 124

Informacje dla Autorów i Czytelników ..... 125

\* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA  
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiDT

Bartosz Hyla\*, Michał Sobczak, Jakub Roemer  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

# Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej

## Non-destructive testing of the composite materials with use of Laser Thermography

### STRESZCZENIE

Termografia jest jedną z metod badań nieniszczących, która wykorzystuje termowizję do wnioskowania o stanie technicznym materiału. Termografia laserowa jest rodzajem termografii aktywnej w której źródłem wymuszenia jest promieniowanie laserowe. Metoda ta pozwala na bardzo precyzyjne kontrolowanie ilości energii dostarczanej do próbki. Istotną zaletą w badaniach laserowych jest możliwość wykrywania zarówno delaminacji jak i pęknięć będącymi głównymi rodzajami uszkodzeń strukturach kompozytowych. W pracy przedstawione zostanie stanowisko do badań, którego prototyp jest opracowywany na AGH oraz wyniki skanowania na przykładzie próbki z włókna węglowego w osnowie polimerowej.

**Słowa kluczowe:** Bbadania nieniszczące, termografia laserowa, kompozyty,

### 1. Wstęp

W obliczu stale rosnących wymagań dotyczących bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji oraz optymalizacji parametrów strukturalnych, które nie pozwalają już tak jak dawniej stosować wysokich współczynników bezpieczeństwa, konieczne staje się prowadzenie regularnych badań nieniszczących lub stosowanie systemów monitorowania stanu technicznego konstrukcji. Badania nieniszczące dostarczają informacji o obecności wad nie wpływając negatywnie na stan techniczny konstrukcji i jej dalsze użytkowanie. Większość metod stosowanych w dzisiejszych czasach posiada już opracowane procedury inspekcji dla konkretnych typów materiałów i konstrukcji. Rozwój nowych materiałów i konstrukcji wymaga jednak rozwoju nowych metod badań nieniszczących pozwalających utrzymać wysoki poziom bezpieczeństwa ich użytkowania.

Jedną z metod badań nieniszczących jest termografia w podczerwieni umożliwiająca badanie znacznych powierzchni konstrukcji, zwłaszcza w przypadku struktur cienkościennych. Metoda bazuje na pozyskiwaniu i analizie informacji termicznej, uzyskanej z bezkontaktowych urządzeń do obrazowania termicznego. Jej dużą zaletą jest fakt, że jest to metoda bezkontaktowa, a uzyskiwane są dane

### ABSTRACT

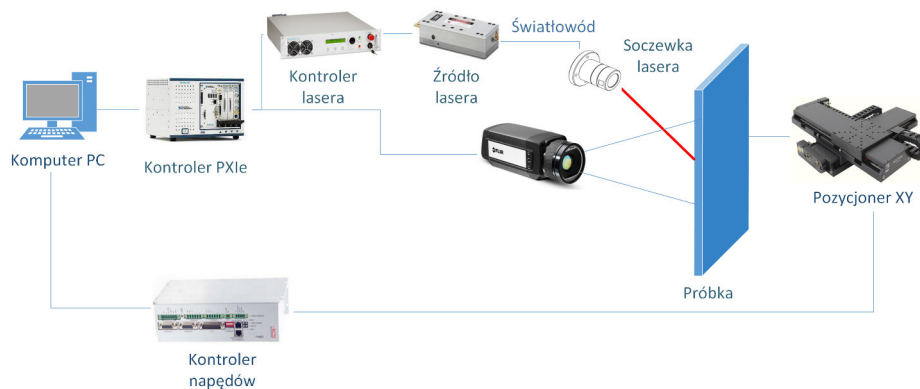
Thermography is a non-destructive testing method that utilizes infrared camera to infer the technical condition of a material. Laser thermography is a type of active thermography in which laser radiation serves as the excitation source. This method allows for highly precise control of the amount of energy delivered to the sample. An important advantage of laser testing is the capability to detect both delamination and cracks, which are the main types of damage in composite structures. This paper presents a test setup developed at AGH University of Krakow and the results of scanning a sample made of carbon fiber reinforced polymer.

**Keywords:** NDT; laser thermography; CFRP; delamination; crack.

w postaci obrazów lub sekwencji obrazów co ułatwia ich interpretację przez operatora. Podstawowym podziałem metod termograficznych jest podział na termografię aktywną (TA) oraz na termografię pasywną (TP). W przypadku termografii pasywnej, nie jest używane żadne dodatkowe źródło ciepła, analizowany jest jedynie obraz badanej konstrukcji rejestrowany przez kamerę termowizyjną. Termografia aktywna wykorzystuje natomiast zewnętrzne wymuszenie i analizuje zmiany temperatury na powierzchni badanej konstrukcji w odpowiedzi na nie. Najczęściej stosowane wymuszenie optyczne, może być w wytworzone przy użyciu lamp halogenowych [1], lamp wyładowczych [2] lub przy użyciu lasera [3]. Ze względu na niską cenę źródła światła i stosunkowo prosty system do badań najczęściej używane są lampy halogenowe. Wśród wad tej metody można wyróżnić nierównomierne rozłożenie ciepła na powierzchni badanej próbki oraz dużą bezwładność cieplną źródła. Ograniczenia te pozwala przezwyciężyć zastosowanie wymuszenia laserowego, którego zaletą jest możliwość precyzyjnej kontroli parametrów źródła, w tym kształtu i rozmiaru plamki lasera, czasu trwania impulsu oraz ilości dostarczonej energii. W przypadku punktowej plamki lasera, fala cieplna przybiera sferyczny kształt, co daje możliwość wykrycia pęknięć prostopadłych do powierzchni próbki [4]. Termografia laserowa wydaje się być wyborem szczególnie dobrym dla testowania mniejszych obszarów, gdzie dzięki małej plamce lasera i mniejszemu

\*Autor korespondencyjny.  
E-mail: bhyla@agh.edu.pl





Rys. 1 Schemat stanowiska badawczego.

Fig. 1 Test stand scheme.

polu widzenia kamery (przy tej samej rozdzielczości kamery) jesteśmy w stanie analizować okolice plamki lasera w lepszej rozdzielczości przestrzennej. Możliwe jest połączenie obrazów (mozaikowanie) z poszczególnych punktów pomiarowych w taki sposób, że obraz wynikowy przypomina wynik klasycznego badania metodą impulsową [5]. Wadą termografii laserowej jest dłuższy czas potrzebny do przeprowadzenia badania, ze względu na mniejszy obszar obserwacji wokół punktu wymuszenia oraz dużą liczbę punktów w siatce pomiarowej. Dodatkowo termografia laserowa wymaga bardziej skomplikowanego systemu pomiarowego, w którym kamera, laser oraz pozycjonery próbki będą odpowiednio zsynchronizowane. Dane z kolejnych zebranych punktów, muszą zostać odpowiednio złączone w całość, aby uzyskać pełen obraz badanej próbki.

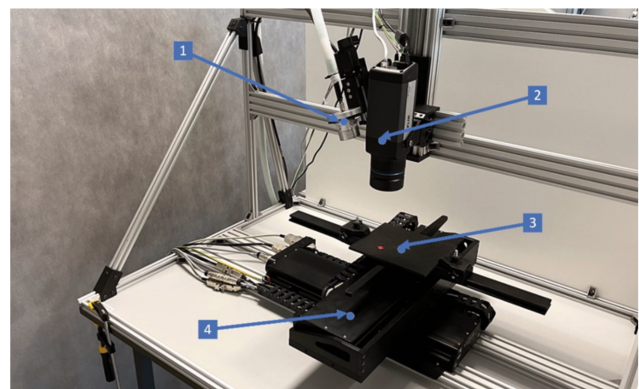
W niniejszej pracy zaprezentowane zostało stanowisko badawcze do badań metodą termografii laserowej będące w stanie dostarczać powtarzalne wyniki wraz z algorytmem przetwarzania danych. Stanowisko rozwijane w ramach prac prowadzonych na AGH w Krakowie [6], [7]. W proponowanym podejściu tworzony jest spójny obraz całej próbki pozwalający na wykrycie obszarów uszkodzonych. Zmozaikowany obraz przedstawia temperaturę próbki w danej chwili czasowej z nałożonymi wektorami reprezentującymi zaburzenia temperatury dla przekrojów plamki lasera.

## 2. Metodologia

### 2.1 Opis stanowiska

W celu przeprowadzania badań eksperymentalnych stworzone zostało stanowisko do badań metodą termografii laserowej. Całość systemu oparta jest na sprzęcie firmy National Instruments wraz z oprogramowaniem LABVIEW 2021 uruchomionym na komputerze PXIe-8821 z systemem czasu rzeczywistego oraz na komputerze klasy PC, na którym dostępny jest panel sterowania dla użytkownika. Zastosowanie systemu czasu rzeczywistego pozwala na precyzyjną synchronizację procesów oraz sygnałów sterujących, takich jak sygnał kontrolujący pracę lasera czy rozpoczęcie nagrywania przez kamerę. Dzięki odpowiedniej

synchronizacji otrzymane wyniki są powtarzalne oraz posiadają podobną formę, dzięki czemu algorytmy ich przetwarzania są skuteczniejsze i bardziej dokładne. Część systemu odpowiedzialna za wytworzenie wiązki lasera składa się z kontrolera lasera CS412 Amtron oraz źródła lasera Limo 120-F400-DL808-AV5-A o mocy 120W. Laser generuje wiązkę światła o długości fali 808 nm. Wiązka lasera prowadzona jest światłowodem zakończonym soczewką kolimującą, która tworzy na powierzchni badanej próbki plamkę o średnicy 10 mm. Pomiar pola temperatury następuje przy użyciu kamery FLIR A655SC, która operuje w zakresie fali 7.5–15  $\mu\text{m}$ . Kamera jest w stanie nagrywać z rozdzielczością 640x480 pikseli oraz częstotliwością 50 klatek na sekundę. Pole widzenia kamery na próbce to około 64x48 mm. Komputer PC połączony jest z pozycjonerami, które odpowiedzialne są za odpowiednie ustawienie badanej próbki względem wiązki lasera i kamery. W stanowisku wykorzystane zostały bezpośrednie napędy liniowe Standa 8MTL1401-30 o zakresie roboczym 300mm w kierunku X oraz Y. Schemat systemu przedstawiony jest na Rys. 1. Zdjęcia stanowiska przedstawione są na Rys. 2.



Rys. 1 Stanowisko badawcze termografii laserowej.

1 – soczewka lasera, 2 – kamera termowizyjna, 3 – próbka do badań, 4 – pozycjoner XY.

Fig. 2 Laser thermography test stand.

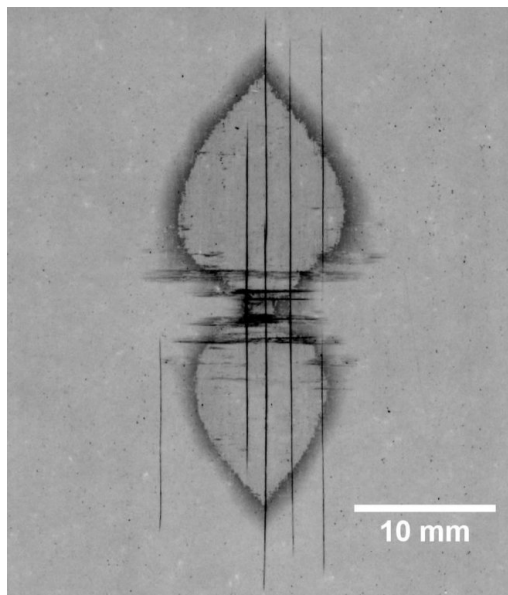
1 – laser optics, 2 – thermal camera, 3 – sample, 4 – XY positioner.

### 2.2 Próbką

Eksperyment został przeprowadzony na płycie kompozytowej zbrojonej włóknem węglowym i polimerową osłoną o wymiarach 300x150x2mm. Próbką do badań została osłona w układzie [03/903]s. Wolna od wad produkcyjnych próbka uległa zniszczeniu w badaniu udarowym z małą prędkością. Uszkodzenie znajduje się w centralnej części próbki. Od spodniej strony widoczne są 2 pęknięcia o długości 27 i 30 mm. Ponadto badania metodą radiografii ukazały delaminacje je oraz kolejne 3 pęknięcia.



Rys. 3. Widok próbki z góry.  
Fig. 3. Sample top view



Rys. 4. Wyniki badania radiograficznego próbki.  
Fig. 4. Results of radiography investigation

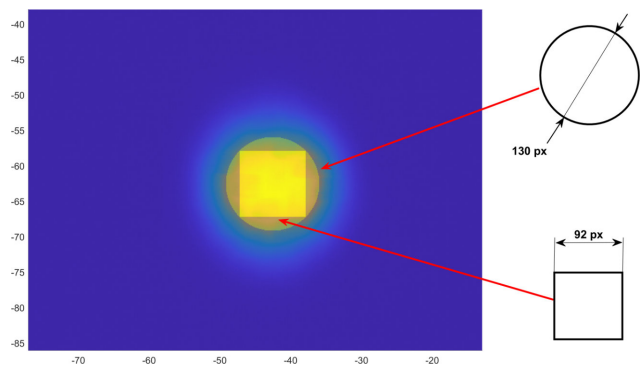
### 2.3 Procedura badawcza

Punkty pomiarowe rozmieszczono co 5 mm, co dało siatkę składającą się z 20 x 25 punktów. Łącznie zebrano dane z 501 punktów. Aby uniknąć wpływu termicznego sąsiadujących punktów, ścieżka inspekcji nie została ułożona w linii prostej. Pomiar wykonywano co 4 punkty w kierunku X i co 2 punkty w kierunku Y. Zmieniona ścieżka umożliwiła odprowadzenie ciepła z sąsiedztwa poprzedniego punktu pomiaru. Do każdego punktu pomiarowego dostarczona energia [97], długość impulsu lasera ustawiono na 800ms, a moc na 100W. Kamera rejestrowała sekwencje termograficzne z prędkością 50kl./s. Dla każdego punktu zarejestrowano

460 klatek, co dało 9.2 sekundy uzyskanej sekwencji termograficznej.

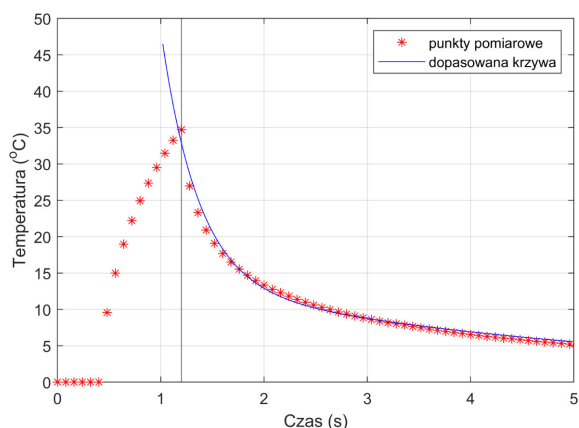
### 2.4 Przetwarzanie danych

W wyniku uzyskanym w ramach procedury badawczej uzyskano zestaw plików zawierających pojedyncze pomiary. Przetwarzanie tych danych może być podzielone na dwa etapy. Pierwszy etap polega na analizie indywidualnych sekwencji, co umożliwia wydobycie lokalnych informacji z poszczególnych pomiarów. W drugim etapie informacje pozyskane z pojedynczych plików są agregowane, co umożliwia wnioskowanie na temat całego badanego obszaru. Pierwszy etap rozpoczyna się poprzez wczytanie jedynie pojedynczej sekwencji ze względu na duży rozmiar pojedynczej, nieskompresowanej sekwencji termograficznej. Następnie przeprowadzana jest operacja odejmowania tła, co skutkuje analizą tylko zmiany temperatury w trakcie eksperymentu. Kolejnym etapem jest uzyskanie informacji dotyczącej wymuszenia cieplnego. Poszukiwana jest plamka lasera. W tym celu wykorzystuje się fragment nagranej sekwencji, w którym laser nagrzewa próbkę. W tym okresie kontrast jest największy, a krótki czas wymuszenia powoduje minimalne zniekształcenia kształtu plamki, nawet w przypadku materiałów o wysokiej przewodności cieplnej, takich jak kompozyty. Na podstawie tych informacji można wyznaczyć kilka parametrów: rzeczywiste położenie środka plamki, jej rozmiar oraz stworzyć binarne maski. Rzeczywiste położenie plamki jest obliczane przy każdym pomiarze, aby zapewnić większą dokładność. Położenie plamki może się nieznacznie zmieniać, na przykład wskutek zmian w odległości między układem pomiarowym a powierzchnią próbki, wynikających z niejednorodnej grubości badanego materiału. W trakcie eksperymentu różnica w położeniu środka plamki wynosiła maksymalnie 6 pikseli, co odpowiada 600 μm. Rozmiar plamki jest wyznaczany na podstawie obrazu zbinaryzowanego. Ponadto tworzone są maski, które są obrazami binarnymi mającymi ułatwić identyfikację plamek lasera. Przykład obrazu plamki lasera z nałożonymi półprzezroczystymi maskami przedstawiono na Rys.5.



Rys. 5. Plamka lasera z nałożonymi maskami: okrągłą i kwadratową.

Fig. 5. Laser spot overlaid with circle and square semi-transparent masks



**Rys. 6.** Dopasowana funkcja eksponentialna do przebiegu temperatury, metodą minimalizacji błędów średniokwadratowego.

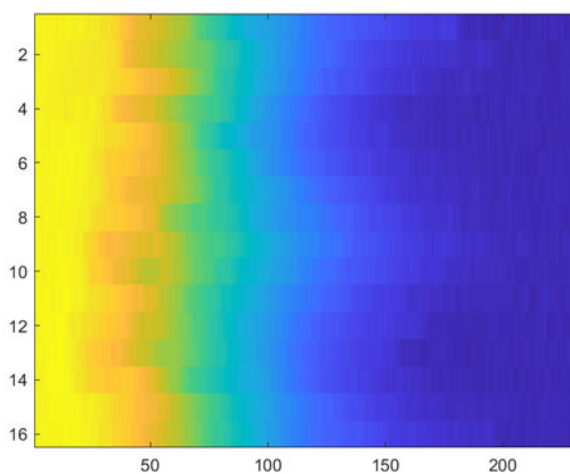
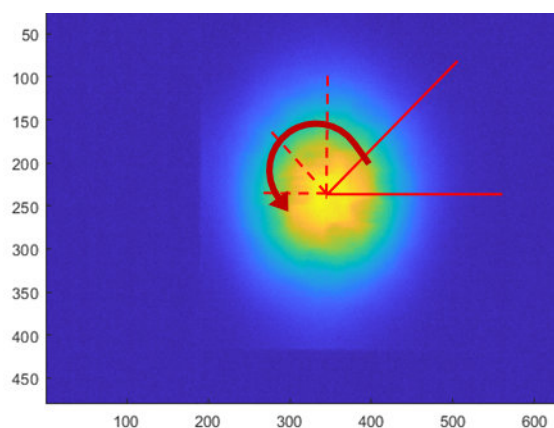
**Fig. 6.** Exponential function fitted to temperature course with use of least-square method

W następnym etapie analizy danych zastosowano zmodyfikowaną metodę Rekonstrukcji Sygnału Termicznego. W oryginalnej metodzie dla każdego pikselu dopasowywane są parametry funkcji, której celem jest oddanie przebiegu temperatury w czasie schładzania po ustaniu wymuszenia cieplnego. W niniejszym przypadku, z zastosowaniem kwadratowej maski, w celu zwiększenia precyzji dopasowania, operacja ta została wykonana poprzez uśrednienie pól o rozmiarze 5x5 pikseli w obrębie prostokątnej maski. Proces dopasowania przeprowadzono względem funkcji o następującej postaci (1):

$$T(t) = A * e^{B*t} + C * e^{D*t} \quad (1)$$

Zastosowanie takiej funkcji jest rozwinięciem rozwiązania równania opisującego temperaturę przejściową dla ciał o skupionej pojemności cieplnej do postaci drugorzędowej. Pozwala na zwiększenie dokładności odwzorowania przebiegu temperatury w czasie chłodzenia. Przykładowe dopasowanie przedstawiono na rysunku 6. Różnice w parametrach dopasowanych krzywych są wystarczające do wskazania punktów o innej pojemności cieplnej, wywołanej np. delaminacją.

W kolejnym etapie wykonywane zostały przekroje temperatury rozchodzące się promieniście ze środka plamki, a następnie zostały przekonwertowane do obrazu we współrzędnych polarnych. Proces ten został schematycznie przedstawiony na rysunku 7. W dalszej kolejności przebiegi zostały wygładzone średnią krocząca, a ostatecznie policzone zostało odchylenie standardowe dla każdego przebiegu. Wartość tego wskaźnika została potraktowana jako długość wektora. Orientacja wektorów pozostała zgodna z kierunkiem wykonywania przekrojów. Powstały w ten sposób zestaw wektorów został zsumowany geometrycznie, w wyniku czego otrzymano wektor wypadkowy. Powstały w ten sposób wektor wskazuje w kierunku charakteryzującym się największą zmiennością przebiegu sygnału. Po wykonaniu powyższych operacji na wszystkich punktach pomiarowych wykonywana



**Rys. 7.** Konwersja obrazu do współrzędnych polarnych.

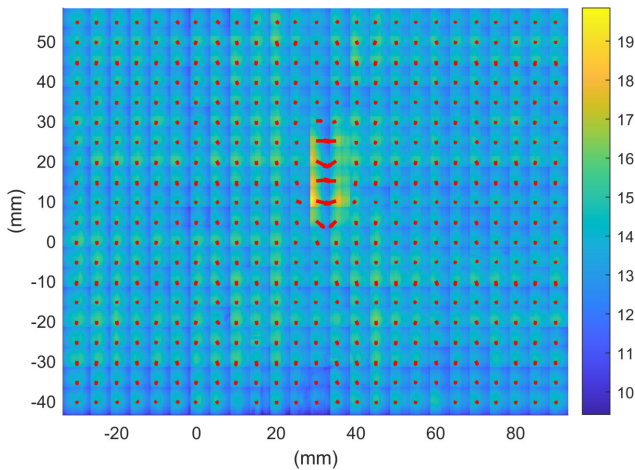
**Fig. 7.** Image conversion to polar coordinates scheme.

jest mozaika danych TSR. W kolejnym kroku wykonywana jest rekonstrukcja przebiegu temperatury w każdym z punktów mozaiki danych.

### 3. Wyniki

Surowe dane termograficzne dla serii pomiarowej zajmują 140 GB przestrzeni dyskowej. W ramach zastosowanych metod obróbki objętość ta jest zmniejszana do 4 GB w przypadku zachowywania części surowych danych z przekrojów, lub nawet 20 MB, jeśli zachowywane są jedynie wyniki. Czas potrzebny do wykonania pomiarów, na obszarze 12 500 mm<sup>2</sup>, na obecnym etapie rozwoju metody wynosi 5 godzin. Natomiast obróbka uzyskanych danych kolejne 4 godziny, co sumarycznie zajmuje 9 godzin. W wyniku przeprowadzonych operacji otrzymywana jest sekwencja temperatur obejmująca pełen obszar badanej próbki oraz zestaw wektorów, który można umieścić w miejscach odpowiadających środkom punktów pomiarowych. Wyniki otrzymane obiema metodami można na siebie nałożyć jak na rysunku 8. Zostały one przedstawione w rzeczywistym układzie współrzędnych pozycjonera.





**Rys. 8.** Wynik nałożenia na siebie temperatury i wektorów wypadkowych w chwili czasowej  $t = 1.2$  s od wyłączenia wymuszenia laserem.

**Fig. 8.** Resulting image from reconstructed temperature from TSR method and resultant vector from each measurement point at 1.2 s after switching off the irradiance source.

#### 4. Omówienie wyników

Otrzymane wyniki pozwalają na jednoznaczne określenia miejsca występowania wad. Rozdzielczość pomiaru dla zmodyfikowanej metody TSR zapewniająca zadowalającą ostrość obrazu wynosi  $500 \mu\text{m}$ , jednak może zostać zwiększona do poziomu rozdzielczości systemu wizyjnego równego  $100 \mu\text{m}$  bez konieczności ponownego przeprowadzania pomiarów. Dzięki analizie rozkładu temperatury można zlokalizować delaminację, natomiast analiza wypadkowych wektorów dostarcza informacji o pęknięciach. W testowanej próbce obszar delaminacji pokrywa się z obszarem, na którym występują pęknięcia, stąd widoczne są wektory o większej wartości w okolicy obszarów o wyższej temperaturze. Z użyciem tej metody wykryta została delaminacja o rozmiarach około  $10 \times 30$  mm co odpowiada wynikom otrzymanym w radiografii, które zostały przedstawione na rysunku 5. W przypadku metody wektorowej rozdzielczość jest równa odległości między punktami pomiarowymi w tym przypadku równej  $5\text{mm}$ .

#### 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono system umożliwiający wykrycie defektów za pomocą termografii laserowej wraz z procedurą przetwarzania. Stanowisko badawcze składa się z komputera PC, komputera PXIe, kontrolera lasera, kamery na podczerwień i dwóch pozycjonerów liniowych. Zastosowanie systemu czasu rzeczywistego pozwala na precyzyjną synchronizację generowanych sygnałów sterujących. Dzięki zastosowaniu zmodyfikowanej metody Rekonstrukcji Sygnału Termograficznego uzyskano znaczną kompresję

danych. Z danych zebranych dla kolejnych punktów badania tworzona jest mozaika przedstawiająca temperaturę w kolejnych chwilach czasowych. Dzięki analizie wartości temperatury możliwe jest wskazanie obszarów z delaminacją. Na uzyskany obraz temperatury nałożone zostały wektory wypadkowe odpowiadające sumie odchylenia standardowego dla przekrojów temperatury przez plamkę lasera, co pozwala na wykrycie uszkodzeń typu pęknięcie. Doświadczenie przeprowadzone na próbce CFRP dało zadowalające wyniki pozwalające na wskazanie obszarów uszkodzonych. Metoda charakteryzuje się długim czasem akwizycji oraz przetwarzania, pozostawiając szerokie pole do ulepszeń w tym zakresie np. w postaci zastosowania metod przetwarzania równoległego ze względu na niezależność od siebie niektórych etapów obliczeń.

#### Podziękowania

Badanie sfinansowano przez NCBiR w ramach projektu nr 0001/L-11/2019 „Laser thermography testing for damage detection in composite structures”, a także częściowo z funduszy własnych AGH nr grantu 16.16.130.942/G.D./28.

#### 6. Literatura

- [1] Q. Luo, B. Gao, W. L. Woo, and Y. Yang, “Temporal and spatial deep learning network for infrared thermal defect detection” *NDT and E International*, vol. 108, no. August, p. 102164, Dec. 2019
- [2] J. Zhou, W. Du, L. Yang, K. Deng, S. Addepalli, and Y. Zhao, “Pattern Recognition of Barely Visible Impact Damage in Carbon Composites using Pulsed Thermography” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. PP, pp. 1–1, 2021
- [3] N. Montinaro, D. Cerniglia, and G. Pitarresi, “Flying Laser Spot Thermography technique for the NDE of Fibre Metal Laminates disbonds” *Compos Struct*, vol. 171, pp. 63–76, Jul. 2017
- [4] J. Rodríguez-Aseguinolaza, M. Colom, J. González, A. Mendioroz, and A. Salazar, “Quantifying the width and angle of inclined cracks using laser-spot lock-in thermography” *NDT and E International*, vol. 122, Sep. 2021
- [5] Z. He et al., “Joint Scanning Laser Thermography Defect Detection Method for Carbon Fiber Reinforced Polymer” *IEEE Sens J*, vol. 20, no. 1, pp. 328–336, Jan. 2020
- [6] B. Hyla, M. Sobczak, P. Synaszko, and J. Roemer, “Laser spot thermography and Pulse thermography – comparison of performance for non-destructive testing of composite structures” *Int J Multiphys*, vol. 17, no. 1, pp. 91–104, Mar. 2023
- [7] M. Sobczak, A. Machynia, Z. Dworakowski, and J. Roemer, “Experimental Setup for Nondestructive Testing of Composite Structures Using Laser Spot Thermography” *Applied Condition Monitoring*, vol. 21, pp. 75–84, 2023