

# Analiza i porównanie wykorzystania kamery termowizyjnej oraz kamery pola magnetycznego do oceny stanu struktury materiałów kompozytowych opartych o materiały ferromagnetyczne

**Streszczenie.** W pracy przeanalizowano metodę wykorzystującą promieniowanie podczerwone rejestrowane przy pomocy kamery termowizyjnej oraz pole magnetyczne, którego rozkład jest badany przez kamerę pola magnetycznego. Dokonano bezpośredniego porównania obu metod wskazując ich mocne i słabe strony. Starano się także wskazać obszary w jakich w jakich obie metody mogą być wykorzystywane jednocześnie.

**Abstract.** The paper analyzed a method using infrared radiation recorded using a thermal imaging camera and a magnetic field whose distribution is studied by a magnetic field camera. A direct comparison was made between the two methods indicating their strengths and weaknesses. An attempt was also made to indicate the areas in which both methods can be used simultaneously. (**Analysis and comparison of the use of a thermal imaging camera and a magnetic field camera to evaluate the structural state of ferromagnetic-based composite materials.**)

**Słowa kluczowe:** kompozyty, termowizja, termografia, magnetyzm, badania nieniszczące.

**Keywords:** composites, thermography, magnetism, non-destructive testing.

## Wprowadzenie

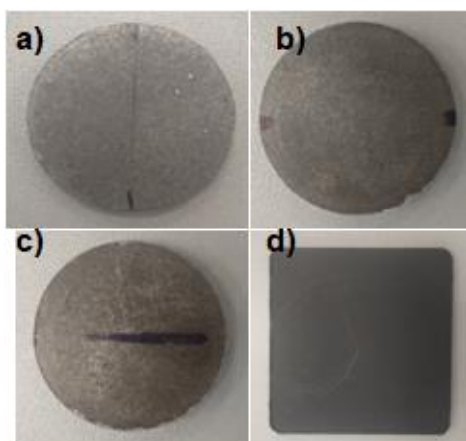
Coraz to powszechniejsze stosowanie materiałów kompozytowych[1] powoduje konieczność opracowywania i wykorzystywania różnego rodzaju badań stanu materiału, a w szczególności badań nieniszczących. Istnieje kilka różnych metod tego typu badań, gdzie każda z nich wykorzystuje inne zjawiska fizyczne występujące w przyrodzie. Istotnym jest dobór właściwej metody do badanego materiału.

## Przygotowanie próbek

Próbki kompozytowe składające się w większości z materiałów ferromagnetycznych przygotowano na potrzeby badań eksperymentalnych. Parametry próbek zostały zebrane i przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Skład procentowy próbek kompozytowych

Próbka	P <sub>Ref</sub>	P <sub>4mm</sub>	P <sub>3mm</sub>	P <sub>PVC</sub>
PVC, % (wag.)	25	25	25	75
Fe, % (wag.)	75	75	75	25



Rys. 1. Próbki a) Próbka referencyjna, b) P<sub>3mm</sub>, c) P<sub>4mm</sub>, d) P<sub>PVC</sub>

Próbki wytworzono z proszku żelaza wymieszanego z polichlorkiem winylu (PVC), a następnie przygotowana mieszanina została sprasowana przy pomocy ręcznej prasy hydraulicznej. Składniki wykorzystane do wykonania materiału kompozytowego przesiano w wytrząsarce wibracyjnej LPZE-2E firmy Multiserw na sicie 100-150  $\mu\text{m}$ . Odważono proszki w wybranych proporcjach (Tab.1). Następnie składniki mieszano przez około 4 minuty do uzyskania jednorodnej mieszaniny proszków. Proszek wysypywano do formy, dodawano wtrącenia w formie krążków blachy elektrotechnicznej M300-A35 (dla próbek P<sub>4mm</sub> oraz P<sub>3mm</sub>) oraz tworzywo PVC (do próbki P<sub>PVC</sub>). Wtrącenia z blachy miały 11 mm średnicy, a ich grubość to odpowiednio 3 i 4 mm. Grubość wtrącenia PVC jest równa 1mm. Wykonano również próbkę referencyjną bez wtrąceń. Formę wypełniono pozostałą mieszaniną aby zakryć wtrącenia i poddano procesowi formowania przy następujących warunkach: ciśnienie 500MPa oraz temperatura 170°C. Rozmiar całkowity przygotowanych próbek wynosił odpowiednio 30 mm średnicy oraz ~5 mm grubości.

## 2. Badania eksperymentalne

### 2.1. Opis stanowiska pomiarowego

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na stanowisku wyposażonym w kamerę pola magnetycznego MagCam 3D (zainstalowaną na manipulatorze trójosiowym) oraz o kamerę termowizyjną IRS336-NDT (rys.2). System MagCam jest wyposażony w matrycę 2D czujników Halla do mapowania pól magnetycznych 3D z dokładnością pomiaru 0,1 mT. Matryca ma rozdzielczość 128x128 punktów pomiarowych, a każdy czujnik Halla [2] ma aktywny obszar 40  $\mu\text{m}$  x 40  $\mu\text{m}$ , co pozwala na precyzyjny rozkład wektora gęstości strumienia magnetycznego ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ).

Badania termograficzne wykonano przy pomocy kamery termowizyjnej IRS336-NDT firmy Technology Automation o rozdzielczości 336x256 pikseli i czułości termicznej <30 mK. Zakres pomiarowy temperatury -10°C do 140°C. Kamera posiada chłodzenie mikrobolometryczne.



Rys.2. Stanowisko pomiarowe

## 2.2. Metodyka badań eksperymentalnych

Lokalizację wtrąceń (zmiany w typie struktury materiału) oraz nieciągłości materiałowych w magnetykach można wykonać metodą detekcji upływu strumienia magnetycznego[3-5]. Metoda ta wykorzystuje efekt zmiany gęstości strumienia magnetycznego. Efekt ten występuje jeśli materiał napotyka na obszary o różnych właściwościach magnetycznych. Wówczas pole magnetyczne zachowuje się inaczej w tych obszarach. Do wzbudzenia pola magnetycznego można użyć magnesy trwałej, źródła prądu przemiennego lub źródła prądu stałego.

Eksperymenty podzielono na dwa etapy. Pierwszy etap dotyczył pomiaru natężenia pola magnetycznego. Podczas drugiego etapu próbkę zbadano przy pomocy kamery termowizyjnej.

W badaniach wykorzystano magnes neodymowy o średnicy 20 mm służący za źródło pola magnetycznego wymuszającego strumień magnetyczny w próbce. Logika prowadzonych pomiarów przy pomocy kamery pola magnetycznego wyglądała na następująco: na wstępie zmierzono natężenie pola nad samym magnesem w odległości odpowiadającej pomiarom z przedmiotowymi próbkami. W drugiej kolejności na górnej powierzchni magnesu umieszczono badane próbki i wykonano pomiary natężenia pola w odległości 1 mm od powierzchni próbki. Badania przeprowadzono dla obu stron próbki (górnej i dolnej po przez jej obrócenie). Źródło pola magnetycznego było umieszczone w następujących konfiguracjach: po lewej stronie próbki, po prawej stronie próbki oraz na jej środku. Rezultatem powyższych badań było uzyskanie danych pomiarowych posiadających dane o wartości składowych pola magnetycznego  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  oraz współrzędne punktów pomiarowych. Obszar pomiarowy za każdym razem wynosił 35 x 35 mm.

Następnie przy pomocy kamery termowizyjnej IRS336-NDT zarejestrowano wartości temperatur na powierzchni badanej próbki w postaci termogramów dla różnych faz procesu wymiany ciepła [6]. Wyznaczono fazy nagrzewania i stygnięcia badanej próbki. W badaniach przyjęto metodę długiego impulsu cieplnego[7]. W trakcie badań próbkę nagrzewano impulsem cieplnym o mocy 700 W. W czasie trwania impulsu wymuszenia cieplnego wynoszącego 2 s podczas fazy nagrzewania oraz 3 s fazy stygnięcia zarejestrowano sekwencje termogramów powierzchni próbki. Częstotliwość próbkowania ustawiono na 3 Hz. Parametry rejestracji sekwencji termogramów oraz źródła ciepła wyznaczono w sposób eksperymentalny metodą prób i błędów. Powyższe czynności były powtarzane dla kolejnych próbek.

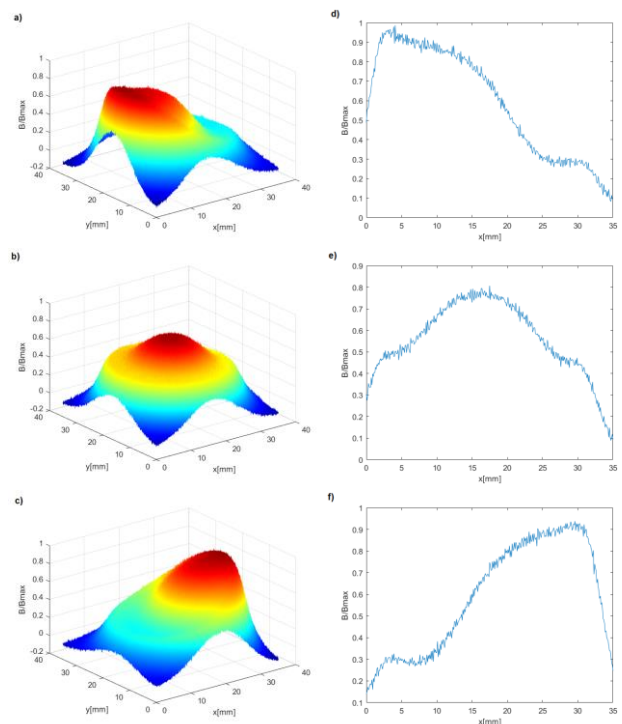
Ułożenie próbek zarówno w przypadku metody magnetycznej jak i termowizyjnej było dobierane w ten sposób by wprowadzone zakłócenie struktury znajdowało

się wzdłuż osi próbki równoległej do osi X układów pomiarowych.

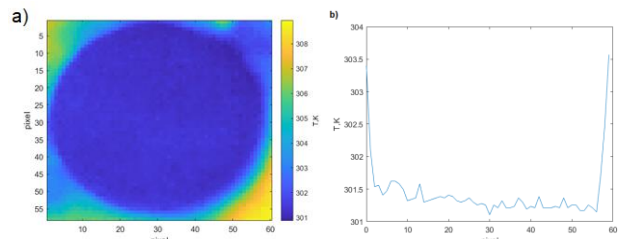
W artykule skupiono się na wynikach badaniach próbek, które posiadały znane wtrącenie w dolnej swojej części z punktu widzenia aparatury pomiarowej/obrazującej. Dalszym etapem prowadzonych badań było przeprowadzenie analizy uzyskanych danych pomiarowych.

## 2.3 Wyniki badań eksperymentalnych

Pierwsza rozpatrywana była próbka referencyjna, bez wtrąceń –  $P_{Ref}$ . Na rys. 3 przedstawiono obraz pola magnetycznego oraz jego rozkład równoległy do osi X (dla  $Y = 17,5$  mm) próbki przy wymuszeniu pola magnetycznego umiejscowionego po lewej stronie, środku i po prawej stronie. W celu efektywniejszego porównywania otrzymywanych wyników wszelkie wartości indukcji zostały przedstawione w wartościach względnych w zakresie od -0,2 do 1. Maksymalna zmierzona indukcja składowej Z wynosiła 0,0654 T i taka też wartość została przyjęta do określenia względnej indukcji dla pozostałych pomiarów.



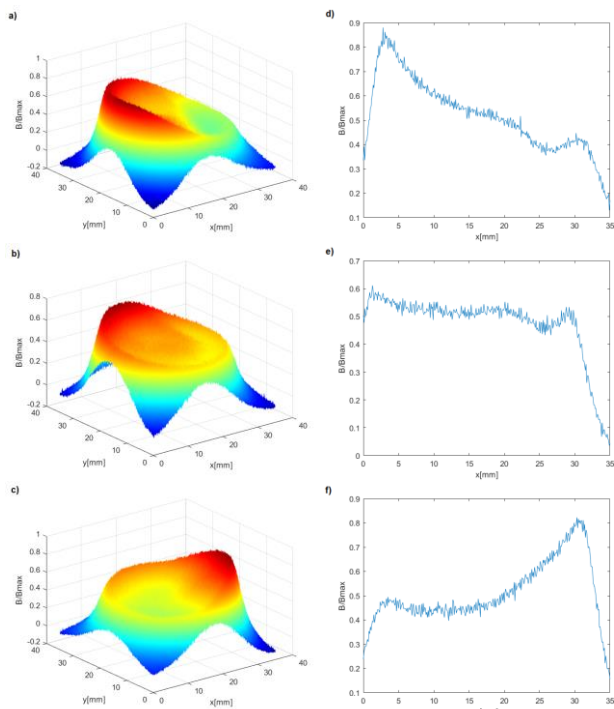
Rys. 3. Obraz pola magnetycznego nad powierzchnią badanej próbki  $P_{Ref}$ , a) wymuszenie magnetyczne po lewej stronie, b) wymuszenie magnetyczne na środku, c) wymuszenie magnetyczne po prawej stronie. Rozkład indukcji magnetycznej nad powierzchnią badanej próbki  $P_{Ref}$  równoległy do osi X, dla  $Y = 17,5$  mm, d) wymuszenie magnetyczne po lewej stronie, e) wymuszenie magnetyczne na środku, f) wymuszenie magnetyczne po prawej stronie



Rys. 4. Rozkład temperatury a) na powierzchni próbki referencyjnej, b) równoległy do osi X ( $Y = 30$  px)

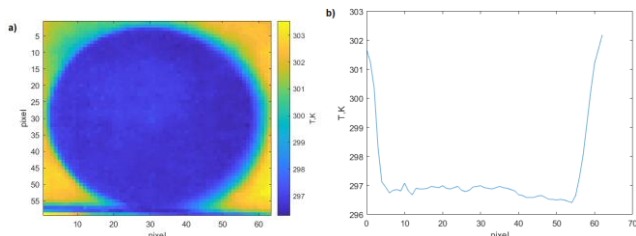
Ostatnim etapem badań próbki referencyjnej było wykonanie sekwencji termogramów. Na rysunku 4 przedstawiono termogram próbki referencyjnej w 2 sekundzie nagrzewania oraz rozkład temperatury powierzchni badanej próbki wzdłuż osi X (na poziomie 30 piksela osi Y).

Próbka P<sub>4mm</sub> została przebadana w analogiczny sposób. Na rys.5 przedstawiono obraz pola magnetycznego oraz jego rozkład równoległe do osi X (dla Y = 17,5 mm) próbki przy wymuszeniu pola magnetycznego umiejscowionego po lewej stronie, środku i po prawej stronie.



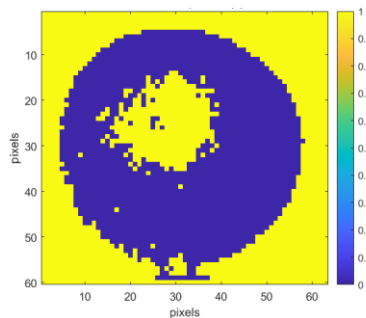
Rys. 5. Obraz pola magnetycznego nad powierzchnią próbki P<sub>4mm</sub>, a) wymuszenie magnetyczne po lewej stronie, b) wymuszenie magnetyczne na środku, c) wymuszenie magnetyczne po prawej stronie. Rozkład indukcji magnetycznej nad powierzchnią próbki P<sub>4mm</sub> równoległe do osi X, dla Y = 17,5 mm, d) wymuszenie magnetyczne po lewej stronie, e) wymuszenie magnetyczne na środku, f) wymuszenie magnetyczne po prawej stronie

Finalnym etapem badań próbki P<sub>4mm</sub> było wykonanie sekwencji termogramów. Na rys.6 przedstawiono termogram próbki P<sub>4mm</sub> w 2s nagrzewania oraz rozkład temperatury powierzchni badanej próbki wzdłuż osi X (Y=30 px). Rys.7 przedstawia wynik binaryzacji termogramu [8] próbki P<sub>4mm</sub> przy wykorzystaniu metody progowania lokalnego (Tau = 2 s, metoda median, s = 0,5, nbsize = 51x51 pikseli).

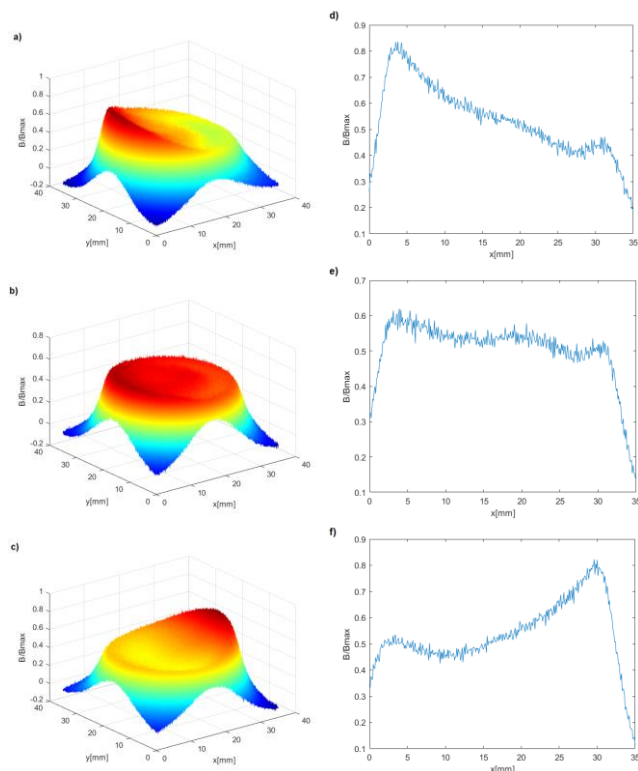


Rys. 6. Próbka P<sub>4mm</sub> - rozkład temperatury, a) na powierzchni próbki, b) równoległe do osi X (Y = 30 px)

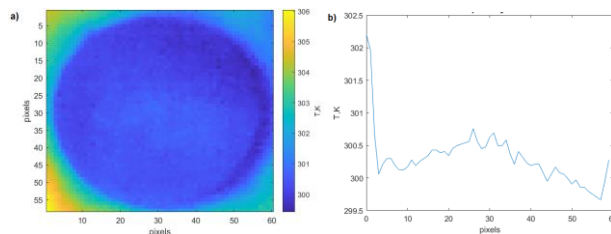
Analogiczne operacje zostały przeprowadzone dla próbki P<sub>3mm</sub>. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rys.8-10.



Rys. 7. Wynik binaryzacji termogramu próbki P<sub>4mm</sub> przy wykorzystaniu metody progowania lokalnego (Tau = 2 s, metoda median, s = 0,5, nbsize = 51x51 pikseli)

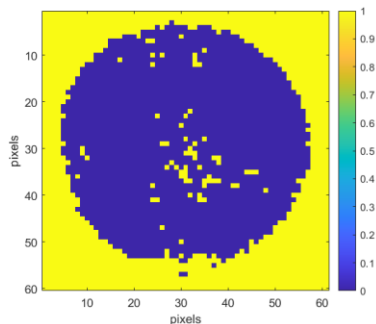


Rys. 8. Obraz pola magnetycznego nad powierzchnią próbki P<sub>3mm</sub>, a) wymuszenie magnetyczne po lewej stronie, b) wymuszenie magnetyczne na środku, c) wymuszenie magnetyczne po prawej stronie. Rozkład indukcji magnetycznej nad powierzchnią próbki P<sub>3mm</sub> równoległe do osi X, dla Y = 17,5 mm, d) wymuszenie magnetyczne po lewej stronie, e) wymuszenie magnetyczne na środku, f) wymuszenie magnetyczne po prawej stronie

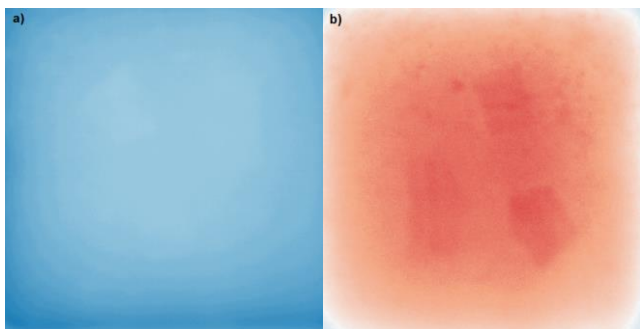


Rys. 9. Próbka P<sub>3mm</sub> - rozkład temperatury, a) na powierzchni próbki, b) równoległe do osi X (Y = 30 px)

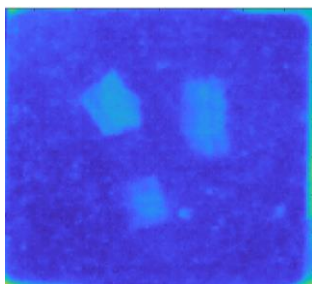
Ostatnią badaną próbką była próbka kompozytowa PPVC. Na rys.11 przedstawiono magnetogram próbki z wtrąceniem umiejscowionym od dołu i od góry. Rozkład temperatury na powierzchni badanej próbki zaprezentowano na rys.12.



Rys. 10. Wynik binaryzacji termogramu próbki  $P_{3mm}$  przy wykorzystaniu metody progowania lokalnego (Tau = 2 s, metoda median,  $s = 0,5$ ,  $nbsize = 51 \times 51$  pikseli)



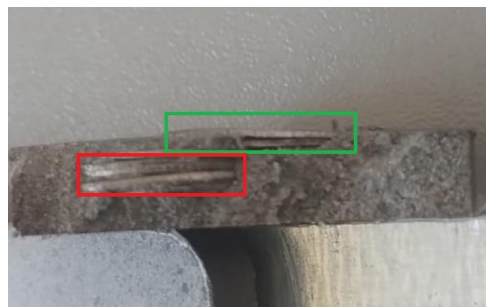
Rys. 11. Porównanie obrazu uzyskanego przy pomocy kamery pola magnetycznego a) wtrącenie dołem, b) wtrącenie górą



Rys. 12. Termogram próbki  $P_{PVC}$  – wtrącenie dołem

### Analiza i wnioski

Analizując otrzymane dane można zauważyć jednoznaczny wpływ wprowadzonego do próbek wtrącenia / niejednorodności struktury na zaburzenia pola magnetycznego. Należy zaznaczyć, że zarówno materiał bazowy próbki jak i wprowadzone niejednorodności z punktu widzenia urządzenia pomiarowego jakim jest kamera pola magnetycznego jest materiałem ferromagnetycznym, co w sposób znaczny utrudnia analizę pola magnetycznego i obrazowanie obecności tego typu wtrąceń. Mimo tego analizując rozkłady indukcji magnetycznej w odległości 1 mm od badanej próbki można stwierdzić obecność wtrącenia ferromagnetycznego w próbce ferromagnetycznej jednakże bez większej dokładności co do jej lokalizacji. Dotyczy się to jednak przypadków gdy wtrącenie znajdowało się w dolnych częściach badanych obiektów. W przypadku wykorzystania kamery termowizyjnej i wykorzystaniu technik przetwarzania obrazów można było jednoznacznie określić obecność, a także lokalizację wtrącenia w próbce  $P_{4mm}$ . Warto zauważyć, że w przygotowanej próbce wtrącenie miało znaleźć się w innym miejscu aniżeli wskazywałaby na to analiza termogramu. Jednakże, po rozbiciu próbki i weryfikacji stanu faktycznego okazało się, że wprowadzona niejednorodność podczas procesu przygotowania przemieściła się zajmując różne obszary próbki, co zostało zaprezentowane na rysunku 13.



Rys. 13. Wnętrze próbki  $P_{4mm}$  po jej rozbiciu

Należy zauważyć, że podobnego rezultatu w przypadku metody wykorzystującej kamerę termowizyjną nie uzyskano w przypadku próbki  $P_{3mm}$ , gdzie zbliżona pojemność cieplna i jej stosunkowo głębokie posadowienie uniemożliwiły uzyskanie wyników pozwalających na stwierdzenie obecności oraz lokalizacji umiejscowionego wtrącenia. W przypadku próbki  $P_{PVC}$  okazała się niemożliwa detekcja wtrąceń w postaci PVC znajdujących się w dolnej części badanej próbki. Natomiast gdy próbka była obrócona wtrąceniem do góry, możliwe było nie tylko określenie obecności wtrącenia ale także wskazanie jego dokładnego położenia. Wykorzystanie kamery termowizyjnej pozwoliło na dokładne określenie wtrąceń w próbce  $P_{PVC}$  znajdujących się w dolnej części próbki.

*Praca powstała w ramach projektu PM-II/SP/0003/2024/02 pt. Standaryzacja procedury wymiarowania defektów metodą aktywnej termografii w podczerwieni i współfinansowanego przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach programu „Polska Metrologia II” – kwota dofinansowania: 910 690,00 zł, a całkowita wartość projektu: 910 690,00 zł.*

**Autorzy:** mgr inż. Olga Kolečka, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, al. Armii Krajowej 17, 42-202 Częstochowa, E-mail: olga.kolecka@pcz.pl; dr inż. Radosław Jastrzębski, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, al. Armii Krajowej 17, 42-202 Częstochowa, E-mail: radostaw.jastrzebski@pcz.pl; dr hab. Inż. Adam Jakubas, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-202 Częstochowa, E-mail adam.jakubas@pcz.pl.

### LITERATURA

- [1] Gholizadeh S., A review of non-destructive testing methods of composite materials, *Procedia Structural Integrity*, 1 (2016), 50-57
- [2] Jakubas A., Nieinwazyjne badanie jednorodności struktury kompozytów miękkich magnetycznie, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), nr1, 136-139
- [3] Wu D., Liu Z., Wang X., Su L., Composite magnetic flux leakage detection method for pipelines using alternating magnetic field excitation, *NDT & E International*, 91 (2017), 148-155
- [4] Ege Y, Coramik M, A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline inspection, *Measurement*, 123 (2018), 163-174
- [5] Suresh V., Abudhahir A., Daniel J., Development of magnetic flux leakage measuring system for detection of defect in small diameter steam generator tube, *Measurement*, 95 (2017), 273-279
- [6] Madura H., Pomiary termowizyjne w praktyce, wyd. PAK, (2004)
- [7] Maldague X. P., Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, *John Wiley&Sons*, (2001)
- [8] Dudzik S., Sochacka O., Zastosowanie metod progowania lokalnego do wykrywania defektów z użyciem termografii aktywnej, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 59 (2018), 43-46