

Nieinwazyjne badanie jednorodności struktury kompozytów miękkich magnetycznie

Abstract. Nieniszczące badania magnetyczne są bardzo przydatne w ocenie jakości kompozytów metal-polimer. W celu szybkiego określenia jednorodności, występowania wtrąceń, pęknięć i innych defektów zaproponowano metodę inspekcji z wykorzystaniem kamery pola magnetycznego. Do weryfikacji metody przygotowano próbki zawierające różne rodzaje wtrąceń (polimer i stal) oraz próbki referencyjne. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem magnesu neodymowego jako źródła zewnętrznego pola magnetycznego. Gęstość strumienia pola została zmapowana tuż nad powierzchnią próbki za pomocą matrycy 16k mikro czujników Halla. Uzyskane magnetogramy pozwoliły zlokalizować i zidentyfikować rodzaj wtrąceń. Potwierdziło to skuteczność opracowanej metody.

Streszczenie Magnetic non-destructive testing are very useful in assessing the quality of metal-polymer composites. In order to quickly determine homogeneity, occurrence of inclusions, cracks and other defects, the inspection method using a magnetic field camera was proposed. For the verification of the method, samples containing various types of inclusions (polymer and steel) and reference samples were prepared. The tests were carried out using a neodymium magnet as the source of an external magnetic field. The flux density of the field was mapped just above the sample surface using a 3D camera. The obtained magnetograms allowed to locate and identify the type of inclusions. This confirmed the effectiveness of the developed method. (**Non-destructive study of the homogeneity of the structure of magnetically soft composites**).

Keywords: Non-destructive testing, soft magnetic composites, micro-Hall sensors, magnetic flux density.

Słowa kluczowe: Badania nieniszczące, kompozyty miękkie magnetycznie, czujniki mikro-Halla, gęstość strumienia magnetycznego.

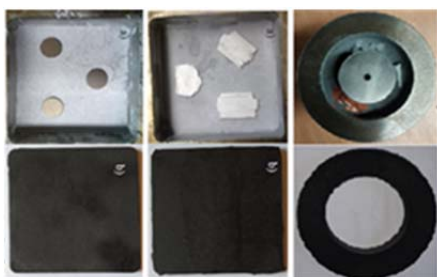
Introduction

Odpowiednia jakość i powtarzalność wyrobów jest niezwykle istotna dla producentów w branży energetycznej i elektronicznej. Jednym z warunków utrzymania założeń jakościowych jest odpowiedni nadzór i kontrola wyrobów oraz procesu produkcji. W tym celu można zastosować jedną lub kombinację wielu metod, np. termograficzną, magnetyczną, optyczną, ultradźwiękową, itd. Szeroka gama metod niedestrukcyjnych (Nondestructive testing – NDT) odgrywa ważną rolę w testowaniu materiałów kompozytowych [1]. Techniki NDT znajdują szczególnie zastosowanie w wielu procesach produkcyjnych, stanowiąc opłacalną metodę kontroli jakości [2-4]. Celem prezentowanych badań było opracowanie metody NDT opartej na analizie obrazów pola magnetycznego. Za jej pomocą możliwe jest wykrywanie wad materiałowych, takich jak wtrącenia, korozja, pustki, pęknięcia, szczeliny, brak jednorodności mieszaniny, nieprawidłowe mieszanie składników itp. w kompozytach metalowo-polimerowych. Dodatkowymi zaletami metody są duża szybkość działania i praca w trybie on-line [5].

Praca ta jest częścią szerszych badań nad możliwością wytwarzania różnego rodzaju kompozytów metalowo-polimerowych z domieszkami różnych wypełniaczy do zastosowania w SMC i EMS - Projekt *Eko-innowacyjne materiały kompozytowe wykorzystujące surowce pochodzące z recyklingu do zastosowań elektrotechnicznych* – LIDER X, NCBR

Materiał i przygotowanie próbek

Na potrzeby realizacji badań przygotowano próbki rdzeni toroidalnych oraz płaskich w oparciu o kompozycje proszków metalowo-polimerowych (rys.1).



Rys. 1. Próbkę a) PFe70 – wtrącenia Fe, b) PFe90 – wtrącenia PVC, c) FeP05 – wtrącenia różne.



Rys. 2. Materiały składowe kompozytu a) PVC-S, b) proszek żelaza



Rys. 3. Stanowisko do wyprasowywania próbek

Tabela 1. Skład procentowy (wagowo) kompozytów.

Próbka	PFe90	PFe70	FeP05
PVC, % (wag.)	10	30	0,5
Fe, % (wag.)	90	70	99,5

Próbki wykonano z proszku żelaza spojonego polichlorkiem winylu (PVC) – rysunek 2. Oba materiały przesiano w wytrząsarce wibracyjnej. Dzięki tej obróbce otrzymano materiały o dość jednorodnej wielkości ziarna. Do wykonania mieszanki kompozytowej użyto składników o granulacji 100-150 μm . Po dokładnym odważeniu proszków w wybranych proporcjach (tab. 1) oba składniki poddano mieszanemu przez około 5 minut. Tak przygotowaną mieszkankę umieszczono w stalowej formie w dwóch porcjach. Pierwszą porcję kompozycji wstępnie zagęszczono, a następnie dodano wtrącenia w postaci płytek PVC (dla próbki PFe90), krążków blachy prądnicowej (dla PFe70) oraz różnych wtrąceń niemagnetycznych (dla FeP05). Następnie formę wypełniono pozostałą mieszkanką i poddano procesowi formowania przy zróżnicowanym ciśnieniu: od 50 MPa do ok. 500 MPa oraz w temperaturze 160-170 $^{\circ}\text{C}$ – rys. 3.

Metoda pomiarowa

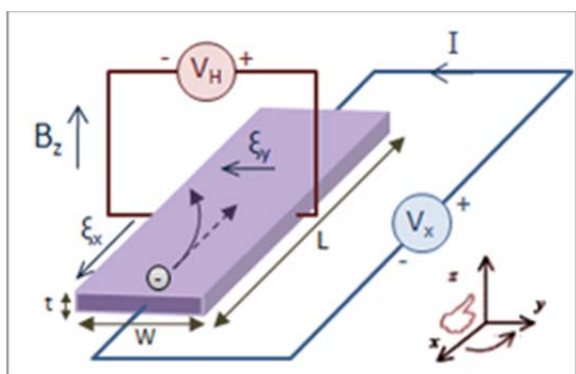
Lokalizację defektów w materiałach magnetycznych, takich jak pęknięcia czy szczeliny, można wykonać metodą detekcji upływu strumienia magnetycznego [6-8]. Główną zaletą tej metody jest wysoka skuteczność wykrywania defektów materiałowych, w tym małych pęknięć powierzchniowych oraz możliwość zastosowania nawet na nieregularnych powierzchniach. Metoda wykorzystuje efekt zmiany gęstości strumienia magnetycznego, który występuje gdy pole magnetyczne napotyka obszary nieciągłości materiału, których przenikalność znacznie różni się od otaczającego regionu. Aby wzbudzić pole magnetyczne, można zastosować magnesy trwałe lub źródła prądu przemiennego lub stałego. Chociaż źródła prądu przemiennego są często wygodniejsze i tańsze niż metody oparte o prąd stały, nie można ich łatwo stosować w metalach ze względu na efekt naskórkowy, który wypycha pole magnetyczne z badanej próbki [9]. Metody DC zapewniają większą czułość w wykrywaniu podpowierzchniowych defektów, ale mają też swoje wady, np. rozkład pola na powierzchni magnesu trwałego jest niejednorodny.

Jednym z narzędzi do pomiaru upływu strumienia magnetycznego są czujniki Halla. Zasadniczo jest to prostokątna płyta z materiału przewodzącego, w której pojawia się napięcie proporcjonalne do gęstości strumienia magnetycznego. Na rysunku 3 przedstawiono zasadę efektu Halla w prostokątnej płytce o wymiarach $L \times w \times t$, przez którą przepływa prąd I . Przyłożenie strumienia magnetycznego do płytki powoduje powstanie potencjału różnicowego V_H między przeciwległymi stronami płytki w następujący sposób:

$$(1) \quad V_H = R_H J B_z w$$

gdzie J jest gęstością prądu równą I/wt , jest składową gęstości strumienia magnetycznego normalnego do płytki, a R_H [$m^3 C^{-1}$] jest stałą dla danego materiału, z którego zbudowany jest czujnik, przy ustalonej temperaturze. A zatem:

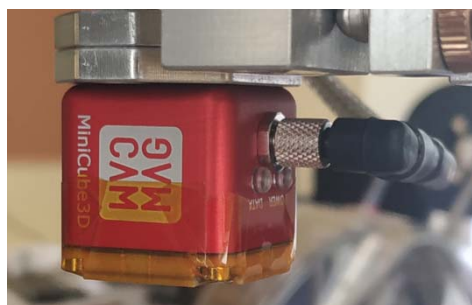
$$(2) \quad V_H = \frac{R_H I B_z}{t}$$



Rys. 1. Konfiguracja pomiaru efektu Halla. B – pole magnetyczne, V – różnica potencjałów, I – prąd, w , t , L – wymiary [licencja: Creative Commons' Public Domain Mark]

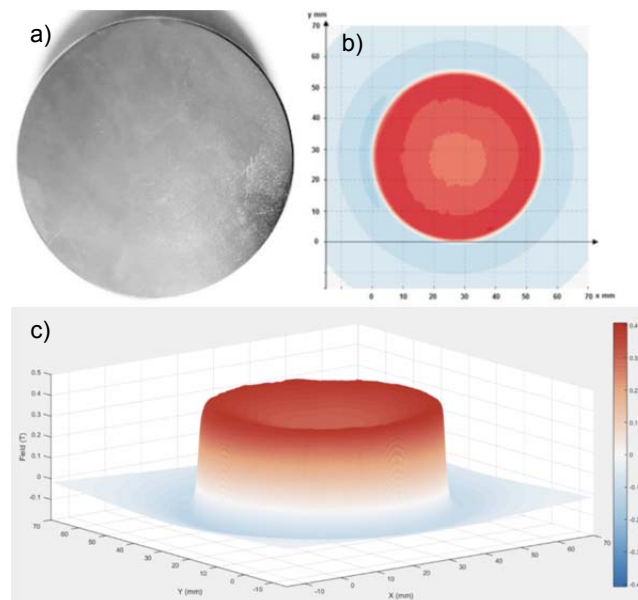
Przy ustalonym prądzie i temperaturze potencjał V_H jest proporcjonalna do B_z . Zjawisko to występuje zarówno w przypadku pól AC i DC [10]. Czujniki Halla wykonane z odpowiednich materiałów i technologii są w stanie pracować w szerokim zakresie temperatur z dużą czułością i małymi obszarami wykrywania. Nie są jednak tak trwałe jak inne czujniki magnetyczne (tj. czujniki cewkowe) i wymagają hermetycznej obudowy. Zwiększa to rzeczywistą odległość czujnika od badanej powierzchni.

Pomiary natężenia pola magnetycznego przeprowadzono za pomocą matrycy czujników Halla wbudowanej w komercyjny produkt, a mianowicie kamerę MagCam 3D. Bardziej szczegółowy opis koncepcji pomiaru dostarczają Vervacke [11] i Nishio [12]. Pierwotnie urządzenie było przeznaczone do badania właściwości materiałowych twardych magnetycznie. Kamera wyznacza przestrzenny rozkład wektora gęstości strumienia magnetycznego (B_x, B_y, B_z). Z elementów kartezjańskich łatwo jest wyprowadzić szereg wielkości, takich jak wielkość pełnego pola B , jego rzut na płaszczyznę B_{xy} lub jego właściwości kierunkowe, takie jak kąt azymutu (w płaszczyźnie XY) i kąt biegunowy (poza płaszczyznę XY). Trójosiowy system kamery pola magnetycznego (rys. 4) wykorzystuje matrycę mikroskopowych czujników Halla, dzięki czemu trzy składowe wektora natężenia pola magnetycznego są dostępne w obszarze 2D o wymiarach $12,7 \text{ mm} \times 12,7 \text{ mm}$, z pikselem $0,1 \text{ mm}$ i rozdzielczość $128 \times 128 = 16384$ punktów pomiarowych.



Rys. 4. Kamera pola magnetycznego go Magcam 3D

Każdy z czujników Halla ma aktywny obszar $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$. Mierzy lokalną wartość składowej prostopadłej (B_z) pola magnetycznego. Mapę pola magnetycznego MagCam w pełnej rozdzielczości można zarejestrować w 0,8 sekundy.



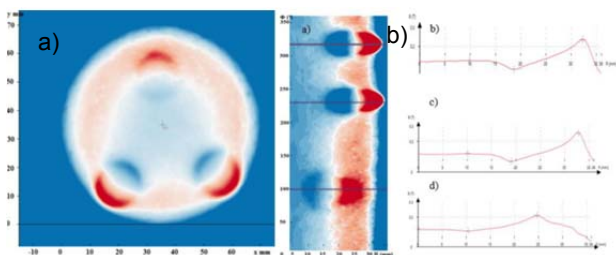
Rys. 4. a) Magnes trwały VMM4-N35, b) rozkład pola magnetycznego na jego powierzchni, c) model rozkładu pola magnetycznego 3D

Materiał i przygotowanie próbek

W badaniach jako źródło pola magnetycznego wymuszającego strumień magnetyczny w próbce wykorzystano magnes neodymowy o wymiarach

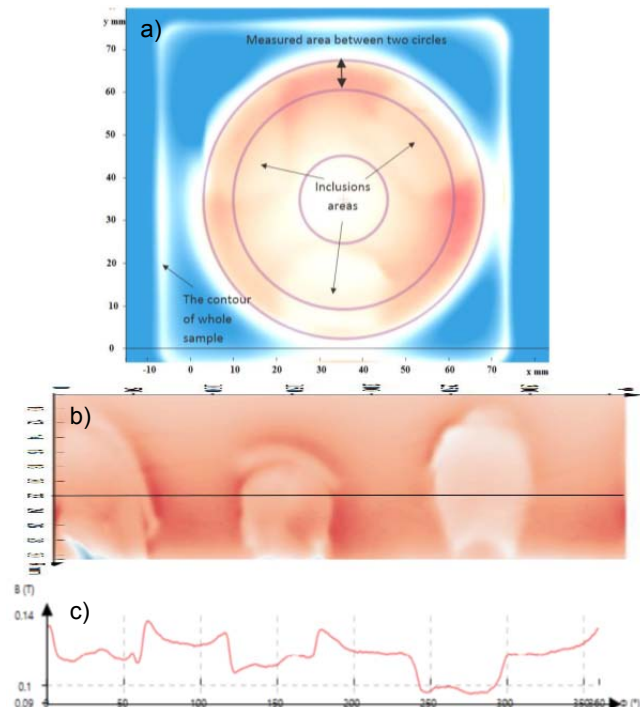
pokrywających się z badaną próbką (rys. 4). W pierwszej kolejności zebrano informacji o natężeniu pola tuż nad magnesem (wzorcowanie). Następnie wykonano mapowanie natężenia pola tuż nad powierzchnią próbek. Procedurę przeprowadzono dla obu stron próbek. Badania zostały przeprowadzone przy użyciu trzy-osiowej kamery pola magnetycznego wyposażonej w detektor MiniCub3D firmy MagCam. W efekcie przeprowadzonych badań uzyskano bazę danych pomiarowych w postaci plików .csv zawierających informacje o wartości składowych pola magnetycznego B_x , B_y , B_z i współrzędne punktów pomiarowych (na próbkę przypada ponad 50000 pkt.).

W pierwszym rozpatrywanym przypadku w strukturze próbki PFe70 umieszczono wtrącenia z nieorientowanej blachy elektrotechnicznej M300-A35. Wtrącenia mają średnice 11 mm, a ich grubość to odpowiednio 0,35, 0,7, 1,05 mm.



Rys. 5. Magnetogram próbki PFe70 a) w układzie kartezjańskim, b) w układzie cylindrycznym, c) rozkład gęstości strumienia magnetycznego wzdłuż linii pomiarowej

W drugim przypadku kamera pola magnetycznego ujawniła położenie i kształt wtrąceń w obszarze wymuszenia (rys. 6.) wykonanych z PVC. Obszar, na który oddziaływał magnes (czerwone kółko), kształt całej próbki (jasny kontur) oraz trzy jaśniejsze obszary wewnątrz okręgu odpowiadające wtrąceniom są wyraźnie widoczne. W rozpatrywanym przypadku wtrącenia miały odpowiednio 1, 1,5 i 2 mm grubości. Wpływ grubości można zaobserwować na wykresie rys. 6c.



Rys. 6. Magnetogram próbki PFe90 a) w układzie kartezjańskim, b) w układzie cylindrycznym, c) rozkład gęstości strumienia magnetycznego wzdłuż linii.

Wyniki, dyskusja i wnioski

Zmiana charakteru inkluzji w strukturze kompozytu daje różne wyniki widoczne na magnetogramach. W pierwszym przypadku można zaobserwować dodatkowe dipole magnetyczne. Jednak w drugim z rozważanych przypadków pojawia się osłabienie gęstości strumienia magnetycznego w obszarze wtrąceń. Zróżnicowanie tych zjawisk pozwala dodatkowo (poza lokalizacją wady) określić jej charakter - magnetyczny lub niemagnetyczny.

Aby uzyskać dobrze wykrywalną zmianę strumienia magnetycznego, konieczne jest, aby wadliwe miejsce znajdowało się na powierzchni lub tuż pod nią. Możliwe jest także wykrycie defektów zlokalizowanych wewnątrz materiału, jednak z uwagi na załamywanie się (opływanie) strumienia magnetycznego odczyty są znacznie słabsze i przez to trudniejsze do wykrycia na powierzchni. Natężenie pola zależy zarówno od indukcji magnetycznej B , jak i od właściwości magnetycznych materiału. Najlepsze wyniki uzyskuje się dla wtrąceń/defektów o odmiennych właściwościach niż otaczający materiał.

Blizsza obserwacja pola magnetycznego w podmagnesowanych kompozytach, które zawierały niejednorodności lub nieciągłości magnetyczne w wyniku istnienia wtrąceń materiałów niemagnetycznych lub magnetycznych, pokazuje, że: część pola omija miejsca nieciągłości, które są dla nich trudne do pokonania i toruje drogę przez pozostały przekrój poprzeczny kompozytu; część linii pola biegnie drogą początkową również przez uszkodzone miejsce; proponowana metoda pozwala wykryć wtrącenia pod powierzchnią; możliwe jest również określenie charakteru (magnetyczny, niemagnetyczny) defektów; metoda pozwala na szybkie określenie jakościowych i ilościowych cech wad;

Uzyskane wyniki pomiarów są cennym źródłem informacji o jakości opracowanych przez autora kompozytów. Następnym krokiem będzie próba zlokalizowania i zidentyfikowania innego typu uszkodzeń.

Acknowledgments

• Badania wstępne zostały zrealizowane w ramach projektu NCN MINIOATURA 2, nr 2018/02/X/ST7/00410.

• Badania zostały wsparte z grantu NCBR LIDER X, pt. *Eko-innowacyjne materiały kompozytowe wykorzystujące surowce pochodzące z recyklingu do zastosowań elektrotechnicznych*. Nr LIDER/11/0049/L-10/18/NCBR/2019

Autor: dr. inż. Adam Jakubas, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 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] Jandajsek I., Jakubek J., Jakubek M., Prucha P., Krejci F., Soukup P., Zemlicka J., X-ray inspection of composite materials for aircraft structures using detectors of Medipix type, *Journal of Instrumentation*, 9 (2014), No. 5, C05062,
- [3] Fotsing E. R., Ross A., Ruiz E., Characterization of surface defects on composite sandwich materials based on deflectometry, *NDT & E International*, 62 (2014), 29-39,
- [4] Dudzik, S., Jakubas, A., Diagnostics of the Fe-based soft magnetics composites using active thermography. In *2018 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering* (Diagnostics), IEEE (2018), 1-4.
- [5] Jakubas, A., Diagnostics of the Fe-based composites using a magnetic field camera. In *2019 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, IEEE (2019), 1-4.
- [6] 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,
- [7] Ege Y, Coramik M, A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline inspection, *Measurement*, 123 (2018), 163-174,.
- [8] 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,
- [9] Blitz J., Electrical and magnetic methods of non-destructive testing , *Springer Science & Business Media*, Vol. 3 (2012).
- [10]Hurd C., The Hall effect in metals and alloys, *Springer Science & Business Media*, 2012.
- [11]Vervaeke K., 6D magnetic field distribution measurements of permanent magnets with magnetic field camera scanner, *In 2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 1-4. IEEE Access (2015).
- [12]Nishio T., Chen Q., Gillijns W., De Keyser K., Vervaeke K., Moshchalkov V., Scanning Hall probe microscopy of vortex patterns in a superconducting microsquare, *Physical Review B*, 77 (2008), No. 1, 012502,