

Wykorzystanie analizy rozkładu stałego pola magnetycznego do oceny stanu zbrojenia stalowego w materiałach kompozytowych

Streszczenie. W pracy skupiono się na metodzie diagnostyki stanu zbrojenia w materiałach kompozytowych wykorzystujących stal jako zbrojenie. Dokonano analizy możliwości wykorzystania kamery pola magnetycznego współpracującej z materiałami magnetycznie twardymi oraz elektromagnesami o stałej polaryzacji. Przedstawiono i przeanalizowano ograniczenia oraz warunki umożliwiające wykorzystania takiego rozwiązania.

Abstract. The paper focuses on a method for diagnosing the state of reinforcement in composite materials using steel as reinforcement. The possibility of using a magnetic field camera working with magnetically hard materials and electromagnets of constant polarity was analysed. The limitations and enabling conditions of such a solution are presented and analysed. **(Use of constant magnetic field distribution analysis to assess the condition of steel reinforcement in composite materials)**

Słowa kluczowe: kompozyty, rozkład pola magnetycznego, analiza, badania nieniszczące.

Keywords: composites, magnetic field distribution, analysis, non-destructive testing.

Wstęp

Rozwój inżynierii materiałowej determinuje powstawanie różnego rodzaju materiałów kompozytowych, które cechują się różnorodnością właściwości oraz zastosowań. Podstawową cechą materiałów kompozytowych, przy odpowiednim ich skonstruowaniu, jest czerpanie korzyści z właściwości materiałów składowych. Kompozyty jak każdy inny materiał jest narażony na uszkodzenia oraz wady powstałe na etapie wytwarzania komponentów materiału jak i samego kompozytu. Do najbardziej popularnych i rozpoznawalnych materiałów kompozytowych stosowanych na co dzień należą m.in. tworzywa szklano-ceramiczne, konstrukcje żelbetowe czy też innego rodzaju materiały wieloskładnikowe. W przypadku tych drugich głównymi komponentami są beton oraz stal. Sama stal może być wykorzystywana w różnego rodzaju materiałach kompozytowych niekoniecznie w połączeniu z betonem, który może zostać zastąpiony przez np. tworzywo sztuczne. Będzie się to wiązało oczywiście z całkowicie innymi obszarami jego zastosowania.

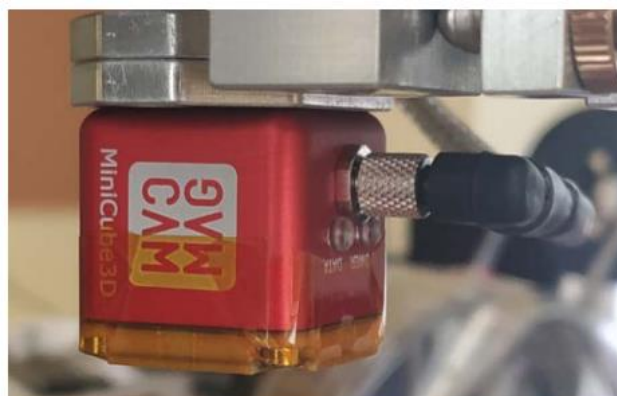
Niezwykle istotnym jest osiągnięcie odpowiedniej jakości wyrobów i możliwość kontrolowania stanu struktury poprodukcyjnej, a do tego celu można wykorzystywać różne metody z dostępnej gamy badań nieniszczących (ang. *Nondestructive testing* – *NDT*) [1]. Metody NDT znajdują szczególne zastosowanie w wielu procesach produkcyjnych, stanowiąc opłacalną metodę kontroli jakości [2-4].

Opis stanowiska pomiarowego oraz przygotowanych próbek.

Do wykonania przedmiotowych badań wykorzystano stanowisko pomiarowe wyposażone w układ kamery pola magnetycznego (zainstalowanej na manipulatorze kartezyjskim) umożliwiającą pomiar składowych pola nad powierzchnią badanych obiektów. Do tego celu kamera wykorzystuje matrycę mikroskopowych czujników Halla, dzięki czemu trzy składowe wektora natężenia pola magnetycznego są dostępne w obszarze 2D o wymiarach 12,7 mm x 12,7 mm, z pikselem 0,1 mm i rozdzielczość 128x128 = 16384 punktów pomiarowych.

Lokalizację defektów w materiałach magnetycznych, takich jak pęknięcia czy szczeliny, można wykonać metodą detekcji upływu strumienia magnetycznego [4-6]. Główną zaletą tej metody jest wysoka skuteczność wykrywania

defektów materiałowych, w tym małych pęknięć powierzchniowych oraz możliwość zastosowania nawet na nieregularnych powierzchniach.



Rys. 1. Głowica pomiarowa kamery pola magnetycznego MagCam 3D

Metoda wykorzystuje efekt zmiany gęstości strumienia magnetycznego, który występuje gdy pole magnetyczne napotyka obszary nieciągłości materiału, których przenikalność znacznie różni się od otaczającego regionu.



Rys. 2. Zdjęcie przykładowej próbki kompozytowej

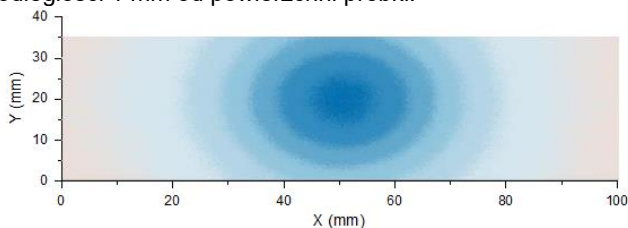
W celu realizacji założonych badań przygotowano próbki materiałów kompozytowych wykonanych z materiału ABS w postaci sześciianu z umieszczonym w środku prętem gwintowanym (z materiału ferromagnetycznego) pełniącego rolę zbrojenia kompozytu. Przykładowy obiekt pomiarowy został przedstawiony na rysunku 3. Zbrojenie kompozytu było umieszczone w samym centrum próbki, a także asymetrycznie w celu określenia wpływu pozycji przestrzennej zbrojenia na ocenę jego obecności w dolnej lub górnej części próbki kompozytowej. Do realizacji zbrojenia wykorzystano pręt gwintowany o średnicy zewnętrznej 6 mm. Wykonane próbki to kompozyty posiadające zbrojenie ciągłe lub uszkodzone na różne sposoby (opisane w dalszej części artykułu).

Metodologia przeprowadzania badań

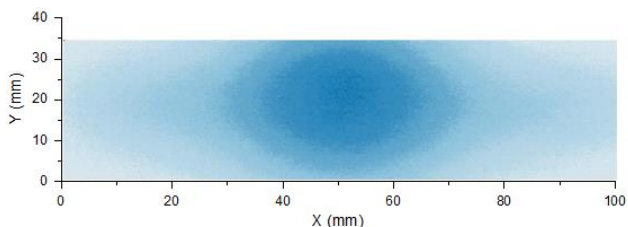
Realizacja opisywanych badań opiera się na założeniu, że badane obiekty kompozytowe poddawane kontroli zbudowane są z ferromagnetycznego zbrojenia i magnetycznie obojętnej otuliny. Do badań jako źródło pola magnetycznego wykorzystano materiał magnetycznie twardy w postaci magnesu neodymowego o średnicy 30 mm i wysokości 5 mm umieszczonego bezpośrednio pod badanym obiektem. Rozważono dwa przypadki, pierwszy gdy wymuszenie pola magnetycznego znajdowało się bezpośrednio pod centralną częścią obiektu w którą stopniowo wprowadzano zbrojenia uszkodzone. W drugim przypadku źródło pola magnetycznego odsunięto możliwie daleko od miejsca w którym znajdowało się uszkodzenie zbrojenia. Samo zbrojenie było rozpatrywane w kilku wariantach. Wariant pierwszy to zbrojenie ciągłe (nie uszkodzone), kolejne warianty to wprowadzenie uszkodzenia. Uszkodzenie pierwsze to pęknięcie całkowite zbrojenia ale bez rozszczepu tj. wprowadzone zbrojenie składało się z dwóch mniejszych bezpośrednio ze sobą ściśniętych. Kolejne etapy to wprowadzanie różnych odległości rozszczepu pomiędzy prętami zbrojeniowymi.

Rezultaty przeprowadzonych badań

Poniżej przedstawiono uzyskane wyniki badań dla dwóch opisywanych powyżej przypadków. Rysunek 3 przedstawia obraz składowej Z pola magnetycznego w odległości 1 mm od powierzchni próbki.



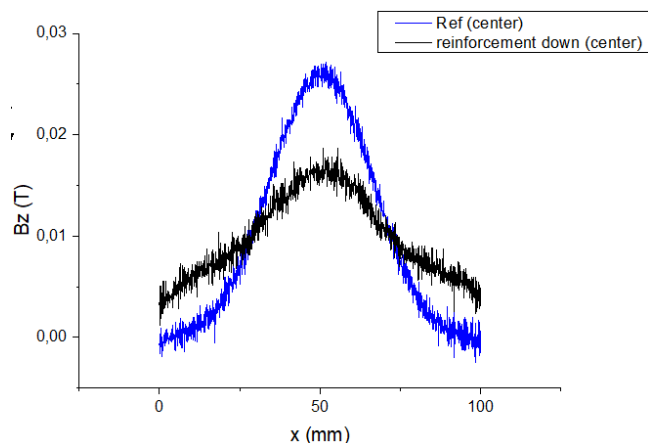
Rys. 3. Obraz składowej Z pola magnetycznego nad badaną próbką referencyjną (bez obecności materiału zbrojącego)



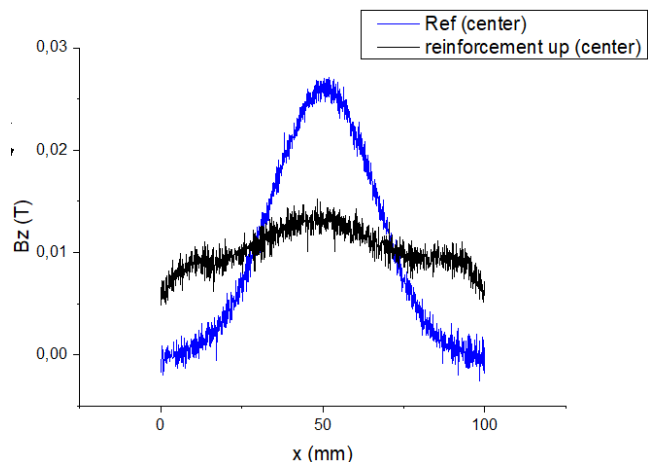
Rys. 4. Obraz składowej Z pola magnetycznego nad badaną próbką z umieszczonym zbrojeniem ciągłym

Obraz pola magnetycznego próbki, która została potraktowana jako referencyjna przedstawiono na rysunku 5 oraz wartości pola równoległe do osi X dla $Y = 17.5$ mm (wartość ta wynika z obecności pręta zbrojącego w połowie

wartości maksymalnej osi Y obszaru badanego). Na rysunku 6 uwidoczniony został wyraźny spadek wartości indukcji maksymalnej w stosunku do próbki w której nie umieszczono materiału zbrojącego.



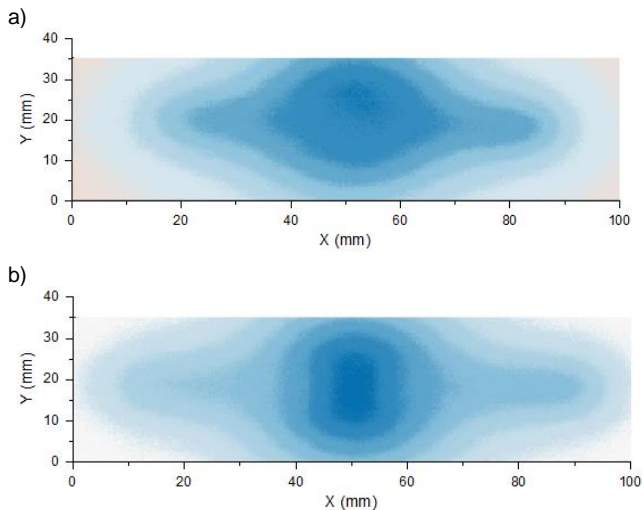
Rys. 5. Rozkład wartości składowej Z pola magnetycznego nad badaną próbką z umieszczonym zbrojeniem ciągłym w jej górnej części - na tle próbki bez zbrojenia



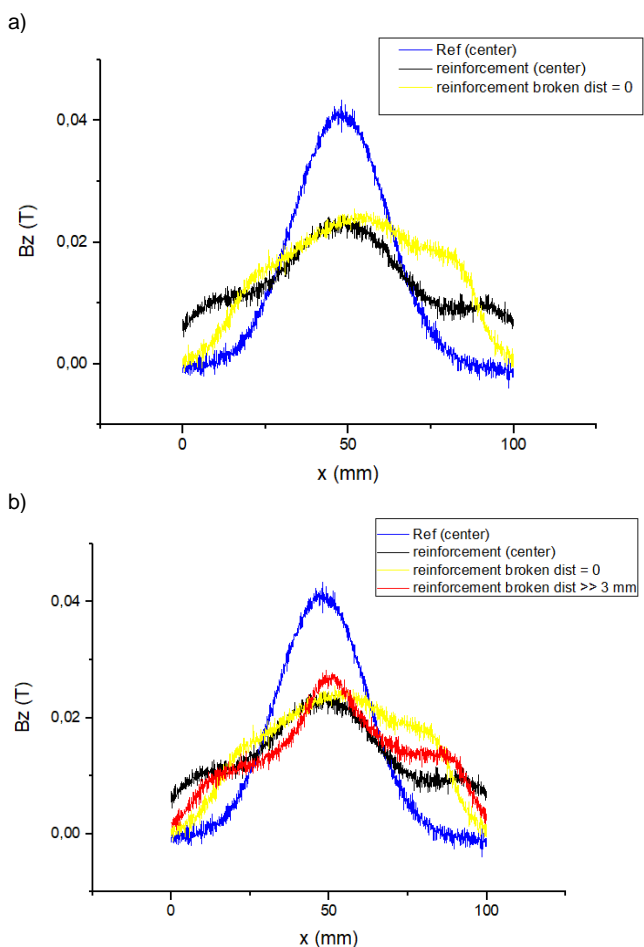
Rys. 6. Rozkład wartości składowej Z pola magnetycznego nad badaną próbką z umieszczonym zbrojeniem ciągłym w jej dolnej części - na tle próbki bez zbrojenia

Takie zachowanie pozwala jednoznacznie stwierdzić czy w danych próbkach obecne jest zbrojenie ferromagnetyczne. Co więcej analizując rozkład wartości pola na rysunku 5 i 6 zauważymy, że wartość maksymalna indukcji jest zależna od umiejscowienia zbrojenia względem osi Z. Z uzyskanych danych wynika, że wartość maksymalna pola w punkcie pomiarowym spada wraz z przybliżaniem zbrojenia w kierunku źródła pola magnetycznego, co może być wykorzystane do oceny prawidłowości wykonanych materiałów kompozytowych.

W dalszej części badań zweryfikowano jaki wpływ na obraz pola magnetycznego będzie miało pojawienie się uszkodzenia w postaci pęknięcia zbrojenia bez jego rozszczepu oraz z rozszczepem. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rysunkach 7-8. Jednoznacznie widać wpływ pojawiania się uszkodzenia i stopniowej intensyfikacji wartości składowej Z pola magnetycznego w środku przerwy pomiędzy powstałymi dwoma elementami zbrojenia co widać na obrazie rozkładu pola rysunek 7, a także na rozkładzie wartości indukcji wzdłuż zbrojenia – rysunek 8.



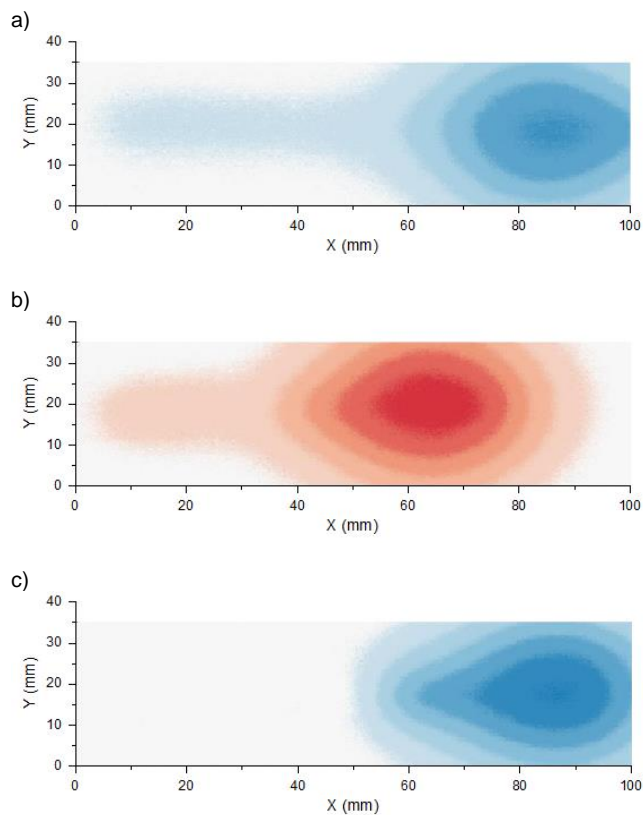
Rys. 7. Obrazy składowej Z pola magnetycznego nad badaną próbką. a) uszkodzenie zbrojenia bez jego rozczepienia (pęknięcie pełne), b) Uszkodzenie zbrojenia z przerwą znacząco przekraczającą 3 mm



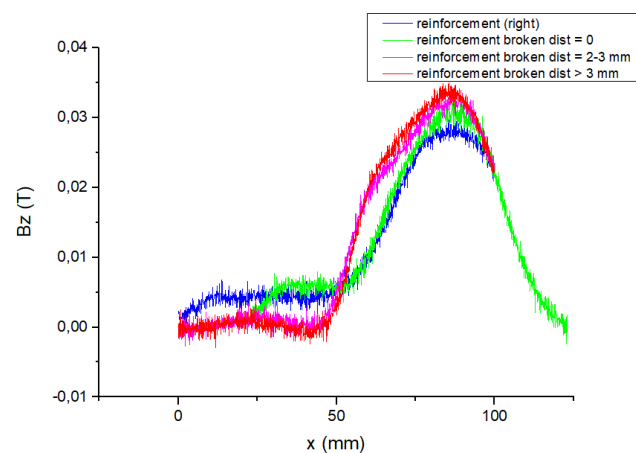
Rys. 8. Rozkłady wartości składowej Z pola magnetycznego nad badaną próbką. a) Uszkodzenie zbrojenia bez jego rozczepienia (pęknięcie pełne), b) Uszkodzenie zbrojenia z przerwą przekraczającą 3 mm w sposób znaczny

Podobne pomiary wykonano w przypadku zmiany położenia źródła pola magnetycznego. Tym razem magnes ten został ustawiony na prawej części mierzonej próbki. Uzyskane rezultaty zaprezentowano na rysunkach 9-10. Analizując otrzymane obrazy z rysunku 9 można zauważyć, że w przypadku próbki gdzie zbrojenie nie posiadało

uszkodzenia zmiany pola były bardziej harmonijne i szczyt występujący nad źródłem pola magnetycznego osiągał mniejsze wartości aniżeli w próbkach posiadających zbrojenie uszkodzone. Wzrost wartości rozszczepu uszkodzonego zbrojenia powodował wzrost wartości maksymalnej indukcji w obszarze występowania źródła pola.



Rys. 9. Obrazy składowej Z pola magnetycznego nad badaną próbką. a) Próbka z rdzeniem ciągłym – bez uszkodzenia, b) Uszkodzenie zbrojenia bez jego rozczepienia (pęknięcie pełne), c) Uszkodzenie zbrojenia z przerwą przekraczającą 3 mm w sposób znaczny



Rys. 10. Rozkłady wartości składowej Z pola magnetycznego nad badaną próbką dla zbrojenia ciągłego oraz dla różnych wartości rozszczepu

Wnioski

W powyższej pracy wskazano potencjał jaki drzemie w wykorzystaniu pola magnetycznego i kamery pola magnetycznego posiadającą wysokiej rozdzielczości matrycę zbudowaną z czujników Halla. Zasadniczą zaletą

przedstawionego rozwiązania jest możliwość detekcji uszkodzeń bez istniejącej przerwy gdzie doszło do całkowitego pęknięcia materiału zbrojącego kompozyt, lecz bez jego jakiegokolwiek przemieszczenia. W takim przypadku metoda np. termowizyjna mogła by się okazać zawodna. Analizując powyższe rezultaty zauważono, że możliwe jest określenie wartości przerwy w zbrojeniu w oparciu o rozkład wartości pola wzdłuż badanego rdzenia zbrojącego, Należy przeprowadzić dalsze badania i analizę mające na celu możliwość zdefiniowania funkcji lub metody umożliwiającej określenie wartości przerwy na bazie wartości rozkładu pola nad badaną próbką.

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: radoslaw.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] 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] Wu D., Liu Z., Wang X., Su L., Composite magnetic flux leakage detection method for pipelines using alternating a) b) a) b) c) PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 1/2021 139 magnetic field excitation, *NDT & E International*, 91 (2017), 148-155,
- [5] Ege Y, Coramik M, A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline inspection, *Measurement*, 123 (2018), 163-174,.
- [6] 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,