

## **ZAŁĄCZNIK 3**

**Do wniosku Adama Jakubasa  
o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego**

Częstochowa, 2020

**Dr inż. Adam Jakubas**  
Politechnika Częstochowska  
Wydział Elektryczny  
Instytut Elektroenergetyki  
al. Armii Krajowej 17,  
42-200 Częstochowa  
tel. 34 325 08 92  
e-mail: jakubasa@el.pcz.czest.pl

Częstochowa, dnia 16.07.2020 r.

## **Autoreferat**

**1. Imię i Nazwisko:** Adam Jakubas

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

- 2014 Doktor nauk technicznych. Dziedzina nauki: nauki techniczne. Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika. Specjalność: Elektrotechnika. Stopień nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej w dniu 26.06.2014 r. na podstawie rozprawy pt. „Analiza wieloelektrodowego systemu do pomiaru i diagnostyki rezystancji skrośnej i powierzchniowej powłok antyelektrostatycznych”; promotor: dr hab. inż. Lech Borowik, prof. Politechniki Częstochowskiej; recenzenci: prof. dr hab. inż. Jerzy Frączek (Politechnika Śląska), prof. dr hab. inż. Andrzej Krawczyk (Politechnika Częstochowska, Prezes Polskiego Towarzystwa Zastosowań Elektromagnetyzmu).
- 2010 Inżynier, specjalność Elektronika i Telekomunikacja, Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska, 2010,
- 2009 Magister inżynier, specjalność Elektrotechnika, Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska, 2009,
- 2009 Magister, specjalność Amerykanistyka i Mass Media, Wydział Studiów Międzynarodowych i Politologicznych, Uniwersytet Łódzki, 2009,
- 2006 Licencjat, specjalność Politologia, Wydział Historyczno–Pedagogiczny, Uniwersytet Opolski, 2006.

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.

- od 03.2017 adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej.
- 01.2015 – 02.2017 adiunkt w Instytucie Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej.
- 11.2009 – 10.2014 asystent w Instytucie Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej.

### 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy.

#### a. Tytuł osiągnięcia naukowego.

**Opis, analiza i predykcja właściwości materiałów kompozytowych, istotnych dla ich zastosowania w elektrotechnice**

#### b. Osiągnięcie naukowe – monotematyczny cykl publikacji naukowych.

- AJ.1. **Jakubas A.**, Gębara P., Seme S., Gnatowski A., Chwastek K., 2017, Magnetic Properties of SMC Cores Produced at a Low Compacting Temperature, *Acta Physica Polonica A*, vol. 131, nr 5, ss. 1289-1293, DOI: 10.12693/APhysPolA.131.1289, IF<sub>2017</sub> = 0,857, lista A, 15 pkt. (WoS, SCOPUS), udział 35 %.
- AJ.2. **Jakubas A.**, Chwastek K., 2020, A simplified Sablik's approach to model the effect of compaction pressure on the shape of hysteresis loops in Soft Magnetic Composite cores, *Materials*, vol. 13, nr 1 s. 170, DOI: 10.3390/ma13010170, IF<sub>2018</sub> = 2,972, 140 pkt. (WoS, SCOPUS), udział 60 %.
- AJ.3. **Jakubas A.**, 2018, Modeling of the effect of grain size on hysteresis curves using the Takács model, w *Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE'2018)*, *IEEE Xplore*, s.4. DOI: 10.1109/PAEE.2018.8441150, 15 pkt., (WoS, SCOPUS), udział 100%.
- AJ.4. Najgebauer M., **Jakubas A.**, Szczygłowski J., 2018, Analysis of magnetic losses in Fe-polymer composites, *Journal of Electrical Engineering - Electrotechnický časopis*, vol. 69, no. 6, ss. 454-457, DOI: 10.2478/jee-2018-0073, IF<sub>2018</sub> = 0,636, lista A, 15 pkt. (WoS, SCOPUS), udział 40 %.
- AJ.5. **Jakubas A.**, Jastrzębski R., Chwastek K., 2019, Modeling the effect of compaction pressure on hysteresis curves of self-developed SMC cores, 2019, *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 38, nr 4, ss. 1154-1163, DOI: 10.1108/COMPEL-10-2018-0399, IF<sub>2018</sub> = 0,705, 40 pkt. (WoS, SCOPUS), udział 34 %.

- AJ.6. Jastrzebski R., **Jakubas A.**, Chwastek K. 2019, Modeling of DC-biased hysteresis loops with the GRUCAD description, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 61, sup. 1, ss. S151-S157, DOI: 10.3233/JAE-199557, IF<sub>2018</sub> = 0,684, 70 pkt. (WoS, SCOPUS), udział 33 %.
- AJ.7. **Jakubas A.**, 2019, Diagnostics of the Fe-based composites using a magnetic field camera, w *Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE'2019)*, *IEEE XPlore*, s. 4, DOI: 10.1109/PAEE.2019.8788976, (WoS, SCOPUS), udział 100 %.
- AJ.8. **Jakubas A.**, 2019, Examination of the magnetic properties in the magnetic circuits formed by a printing technique, *Advances in Materials Science and Engineering*, ID 3185948, vol. 2019, s. 6, DOI: 10.1155/2019/3185948, IF<sub>2018</sub> = 1,399, 40 pkt. (WoS, SCOPUS), udział 100 %.
- AJ.9. Dudzik S., **Jakubas A.**, 2018, Diagnostics of the Fe-based soft magnetics composites using active thermography, w *International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics'2018)*, *IEEE XPlore*, s. 4, DOI: 10.1109/DIAGNOSTIKA.2018.8526135, 15 pkt. (WoS, SCOPUS), udział 50 %.

c. *Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.*

## Wstęp

Przedstawiony do oceny dorobek stanowi wybór najważniejszych prac opisujących prowadzone przez autora badania związane z materiałami kompozytowymi stosowanymi w elektrotechnice.

Materiały kompozytowe dzięki stosunkowo łatwej możliwości kształtowania ich właściwości stanowią obecnie coraz bardziej powszechną alternatywę dla tradycyjnych materiałów stosowanych w elektrotechnice. Nowoczesne kompozyty proszkowe o właściwościach magnetycznie miękkich (ang. Soft Magnetic Composites - SMC) są w ostatnim czasie obszarem zainteresowania środowiska naukowego oraz przemysłu. SMC są wykorzystywane między innymi w magnetowodach maszyn i urządzeń elektrycznych, do konstrukcji dławików, a także - co najistotniejsze - w konstrukcjach nowoczesnych pojazdów elektrycznych i elektrycznych silników. Materiały SMC pozwalają na konstrukcję skomplikowanych trójwymiarowych obiektów, których obwody magnesujące mają kształty nieosiągalne dla tradycyjnych blach transformatorowych.

Elastyczność kształtowania cech kompozytów elektrotechnicznych umożliwia zastosowanie ich również jako materiały ekranujące zakłócenia i niepożądane promieniowanie elektromagnetyczne (EMSC – Electromagnetic Shielding Composites). Tego typu materiały są wysoko pożądane w zastosowaniach medycznych, lotniczych, wojskowych, motoryzacyjnych i elektroniki przemysłowej.

W obrębie prac związanych z przedmiotowymi materiałami istotne jest uzyskanie najlepszych parametrów elektrycznych i magnetycznych w wymaganym zakresie częstotliwości pracy, przy jednoczesnym zachowaniu dobrych właściwości mechanicznych

i termicznych. Punktem odniesienia mogą być w tym przypadku materiały konwencjonalne, głównie blachy elektrotechniczne. W toku badań uwzględnione zostały takie zagadnienia jak: wpływ wielkości ziarna, ciśnienia formowania, gęstości, temperatury formowania, właściwości mechaniczne, naprężenia wewnętrzne, stratność, rodzaj i ilość materiału spajającego, możliwość pojawienia się defektów.

Zasadniczym osiągnięciem naukowym autora jest monotematyczny cykl publikacji dotyczący metod opisu zmian właściwości magnetycznych i elektrycznych kompozytów miękkich magnetycznie, w kontekście cech jakościowych i ilościowych komponentów składowych, parametrów wytwarzania oraz występowania defektów. Habilitant opracował własną technologię wytwarzania kompozytów opartą na procesie prasowania na gorąco proszków metalowo-polimerowych. Zaprezentował również autorską, niedestrukcyjną metodę oceny jednorodności struktury kompozytów, bazującą na analizie pola magnetycznego na powierzchni badanego obszaru. W wyszczególnionych pracach oraz pozycjach uzupełniających autor w kompleksowy sposób przedstawił wyniki badań czynników mających istotny wpływ na końcowe parametry kompozytów, ze szczególnym uwzględnieniem ich zastosowania w elektrotechnice. Przeprowadził między innymi pomiary rezystancji, przenikalności elektrycznej, indukcyjności, przenikalności magnetycznej, wytrzymałości mechanicznej oraz modelowanie i nieniszczące badania struktury kompozytów. W celu utrzymania kontroli nad materiałem badawczym, w większości przypadków do przygotowania próbek wykorzystano opracowaną przez autora metodę niskotemperaturowego wytwarzania kompozytów metalowo-polimerowych. Rezultaty prac badawczych wykazują ich wysoki potencjał użytkowy, szczególnie w trzech obszarach aplikacyjnych: kompozytowych materiałach miękkich magnetycznie, kompozytowych materiałach ekranujących pole elektromagnetyczne oraz zagospodarowaniu wysokojakościowych, poprodukcyjnych materiałów odpadowych dostępnych w postaci metalowych pyłów, proszków, wiórów i płatków.

### **Osiągnięcia autora związane badawczo z doktoratem**

Habilitant obronił rozprawę doktorską w czerwcu 2014 r. W rozprawie doktorskiej autor przedstawił analizę możliwości pomiarowych układów wieloelektrodowych do wyznaczenia parametrów rezystancyjnych powłok kompozytowych. Przeprowadzając analizę przydatności poszczególnych metod zwrócił szczególną uwagę na te, które nadają się do badania rezystywności antyelektrostatycznych powłok nakładanych na powierzchnie o różnych własnościach elektrycznych oraz o skomplikowanym kształcie. Ten ostatni wymóg umożliwił wykonanie pomiarów na obiektach rzeczywistych. W ramach rozprawy doktorskiej autor zaproponował oryginalną metodę pomiarową opartą na klasycznej metodzie czteropunktowej i metodzie Van der Pauwa oraz wykonał stanowisko badawcze, które wraz z autorskim sposobem analizy danych doświadczalnych umożliwiała pomiary rezystancji oraz diagnostykę powierzchni kompozytów warstwowych. Badania zostały przeprowadzone z zastosowaniem komercyjnej antyelektrostatycznej farby epoksydowej Epitan 66, zawierającej pigmenty przewodzące, naniesionej na podłoża przewodzące (np. stal) oraz nieprzewodzące (np. tworzywo sztuczne, szkło).

Po uzyskaniu stopnia doktora autor wniosku prowadził dalsze badania dotyczące właściwości elektrycznych kompozytów. Rozwinął zaproponowane sposoby modelowania o analizę zmienności parametrów elektrod i obszaru pomiarowego w układach trójwymiarowych. Następnie uzupełnił tematykę podjętą w doktoracie poprzez opracowanie kompleksowej metody modelowania pomiaru rezystancji i rezystywności kompozytów, łączącą w całość wcześniejsze rozwiązania. Przeprowadził także dodatkowe badania weryfikujące na modelach fizycznych oraz zastosował opracowania rozwiązania do pomiaru właściwości elektrycznych kompozytów stosowanych w tekstronice. W rezultacie opublikował trzy prace w czasopiśmie o wysokim wskaźniku IF [A.16], [A.24], [A.25], cztery prace w czasopiśmie krajowych [A.29 - A.32] oraz wydał współautorską monografię [M.1].

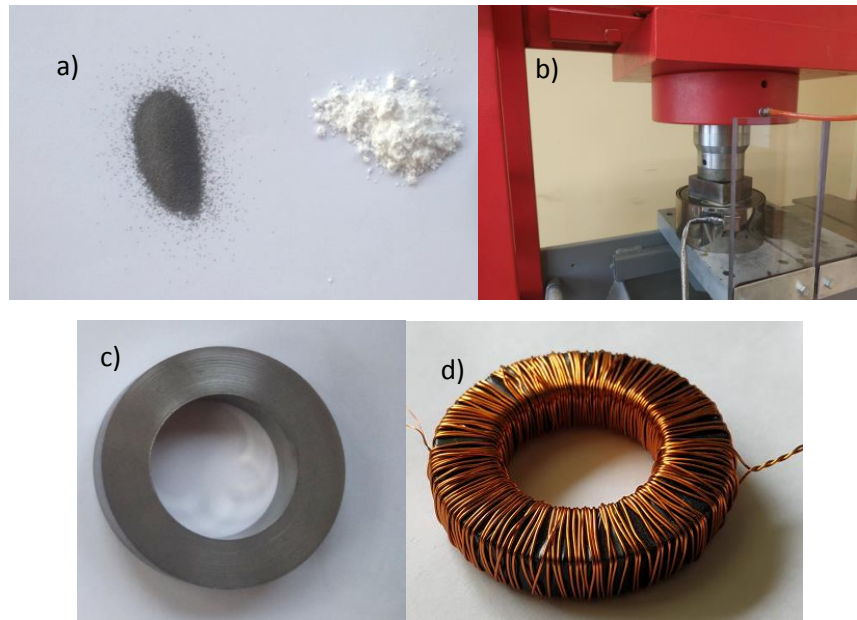
### **Działalność badawcza autora po doktoracie w ramach cyklu publikacji.**

Dalsza działalność badawcza autora stanowiła rozwinięcie koncepcji zawartych w doktoracie w aspekcie badania właściwości materiałów o heterogenicznej strukturze. Autor skoncentrował swoją uwagę na możliwościach aplikacyjnego zastosowania materiałów kompozytowych, bazujących na proszkach metalowo-polimerowych, w tym SMC i EMSC.

Większość prac badawczych dotyczących SMC opiera się na dostępnych na rynku produktach takich jak Somaloy firmy Höganäs. W przypadku tych produktów parametry wytwarzania są względnie wysokie, np. temperatura utwardzania jest rzędu 500 °C, podczas gdy ciśnienie prasowania wynosi ok. 800 MPa. Pomimo istotnych zalet tych proszków, wymagają one stosowania, w procesie wytwarzania detali, form wykonanych z materiałów o wysokiej wytrzymałości mechanicznej, co pociąga za sobą zwiększone koszty wytwarzania. Zastosowanie komercyjnych rozwiązań ograniczało habilitantowi możliwości kontroli i zmiany cech mieszanek proszków metalowo-polimerowych w celu opisu zależności pomiędzy parametrami istotnymi dla ich zastosowania w elektrotechnice. Narzucone przez producenta właściwości proszków takie jak rodzaj i proporcje składników oraz rozmiary ziarna umożliwiło zbadanie korelacji właściwości magnetycznych jedynie w zależności od niektórych parametrów, jak temperatura i ciśnienie formowania [Ślusarek, B., Szczygłowski, J., Chwastek, K. and Jankowski, B. (2015), A correlation of magnetic properties with material density for soft magnetic composite cores, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, Vol. 34 No. 3, pp. 637-646. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-10-2014-0255>].

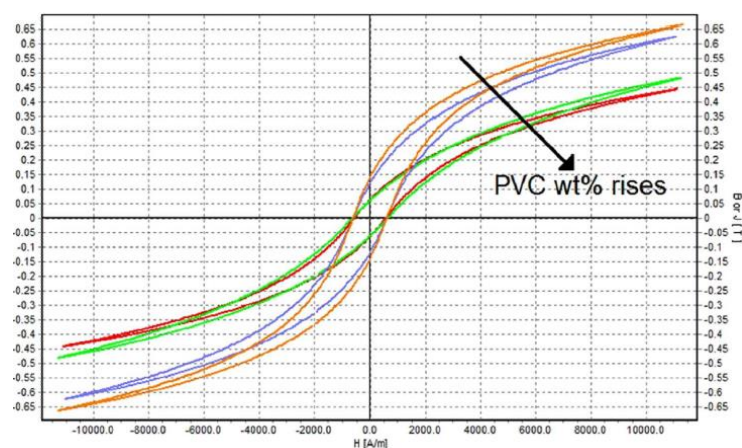
W rezultacie odbycia stażu naukowego w 2016 r. na Wydziale Technologii Energetycznych na Uniwersytecie w Mariborze (Słowenia), autor otrzymał dostęp do aparatury umożliwiającej przeprowadzenie pomiarów i wytwarzanie własnych kompozytów metalowo-polimerowych. Tym samym rozszerzył dotychczasową tematykę badań o badania właściwości magnetycznych i termo-mechanicznych nowoczesnych kompozytów bazujących na proszkach metali ferromagnetycznych. W pracy **AJ.1**, autor przedstawił możliwości wyprodukowania własnych rdzeni SMC z wykorzystaniem łatwo dostępnych komponentów proszkowych, głównie żelaza i poli(chlorku winylu) - PVC. Metoda wytwarzania jest też przedmiotem zgłoszenia patentowego - Sposób wytwarzania kompozytu polimerowego, P.420850 [III.3.b]. W przypadku tych SMC wartości parametrów przetwarzania były znacznie niższe: temperatura formowania 165 °C i ciśnienie prasowania około 200 MPa, niż w produktach komercyjnych.

Przykładowe etapy wytwarzania rdzeni SMC zaprezentowano na rysunku 1. Autor zbadał próbki o identycznym składzie jakościowych ale o różnej zawartości PVC, odpowiednio 0,5%, 1%, 1,5% i 2% wagowo. Pierwszym etapem badań było określenie optymalnej zawartości PVC w celu uzyskania stabilnych próbek, zdolnych do utrzymania względnie dobrych właściwości magnetycznych. Testy rozpoczęto przy zawartości polimeru 20% wagowych, ale do dalszych badań wybrano cztery próbki o odpowiednio wyższej zawartości Fe.



Rys. 1. Poglądowe etapy wytwarzania próbek rdzeni kompozytowych, a) składniki, b) formowanie, c) gotowy rdzeń, d) transformator toroidalny.

Właściwości magnetyczne próbek toroidalnych określono za pomocą komputerowo wspomaganego układu pomiarowego Metis HyMac. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów przy  $f = 50$  Hz. Po zwiększeniu zawartości polimeru krzywe histerezy uległy spłaszczeniu – średnia przenikalność uległa zmniejszeniu. Częstotliwość wzbudzenia została tak dobrana, że odkształcenie pętli spowodowane przepływem międzyziarnowych prądów wirowych można było zaniedbać.



Rys. 2. Przykładowa rodzina pętli histerezy dla rdzeni o różnej zawartości wagowej PCV.

Materiały kompozytowe są zwykle izotropowe, dlatego do ich opisu matematycznego odpowiednie są techniki obliczeniowe i modele opracowane dla izotropowych ośrodków. Teoretyczny opis właściwości kompozytów miękkich magnetycznie może być zrealizowany zarówno na poziomie różnych skali czasowo-przestrzennych i z wykorzystaniem modeli o różnym stopniu skomplikowania aparatu matematycznego. Wśród różnych opisów histerezy w rdzeniach SMC uwagę zespołu naukowego, który skupił wokół siebie autor wniosku, przyciągnęły m.in. fenomenologiczny model  $T(x)$ , podejście Jilesa-Athertona (JA) i jego modyfikacje jak np. model GRUCAD oraz model eliptyczny profesora Zakrzewskiego. Modelowanie ma również na celu ograniczenie konieczności przeprowadzenia znacznej ilości czasochłonnych eksperymentów, a także predykcję i opis właściwości istotnych do zastosowań w elektrotechnice.

W celu opisanie zmierzonych pętli histerezy (m.in. w **AJ.1**, **AJ.2**) wykorzystano model fenomenologiczny opracowany przez D. Jilesa i D. Athertona (JA). Ten model histerezy w ostatnich trzech dekadach był przedmiotem intensywnych badań ze względu na nieskomplikowaną strukturę jego równań (kombinacja równań różniczkowego zwyczajnego i nieliniowego oraz kilku dodatkowych zależności). Pierwotnie model był stosowany do opisu materiałów konwencjonalnych, jednak wraz z jego kolejnymi modyfikacjami zaczęto próbować stosować ten model do opisu kompozytów miękkich magnetycznie. Jiles i Atherton zakładają występowanie dwóch składowych podatności magnetycznej  $dM/dH$ , tj. składowej odwracalnej -  $M_{rev}$  i składowej nieodwracalnej  $M_{irr}$ . Ta ostatnia składowa ma odwzorować przeskok ściany domenowej przez przeszkodę podczas przemagnesowania (tzw. centrum zaczepiania), ta pierwsza – ugięcie ściany domenowej na przeszkodzie, nie powodujące rozpraszania energii. Istotne zalety tego modelu to fizyczna interpretacja przypisanych pętli parametrów i możliwość włączenia różnych zjawisk fizycznych do opisu w ramach "pola efektywnego". Opis ten jest jednym z najczęściej stosowanych w praktyce modeli histerezy. Model posiada również istotne wady, np. niejednoznaczne odwzorowanie krzywych w obszarach o ujemnej podatności magnetycznej  $dM/dH$  oraz niewłaściwy opis pętli cząstkowych przy podmagnesowaniu.

Autor w pracy **AJ.1** w pierwszej kolejności zbadał czy można za pomocą modelu JA opisać zmiany parametrów procesowych w kontekście zmiany wartości pola efektywnego. Podstawowy zestaw równań modelu JA zastosowany w tym artykule przedstawia się następująco:

$$\frac{dM}{dH_{eff}} = \frac{\delta_M (M_{an} - M)}{k\delta} \quad (1)$$

$$M_{an} = M_s \left[ \coth \frac{H_{eff}}{a} - \frac{a}{H_{eff}} \right] \quad (2)$$

$$H_{eff} = H + \alpha M. \quad (3)$$

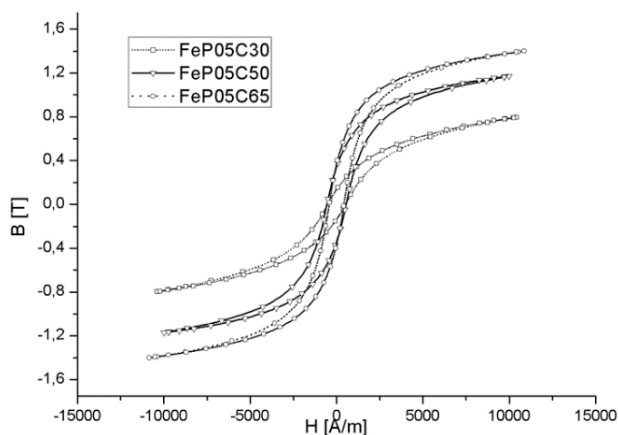
Zastosowane równania modelowe są uproszczone. Występują jedynie cztery parametry modelu:  $M_s$  [A/m] (namagnesowanie przy nasyceniu),  $a$  [A/m] tj. parametr kształtu w zmodyfikowanej funkcji Langevina,  $\alpha$  - stała bezwymiarowa, opisująca wzajemne oddziaływania między domenami magnetycznymi w materiale oraz  $k$  [A/m], którego wartość jest proporcjonalna do iloczynu gęstości miejsc zaczepienia się ścian domenowych i ich



średniej energii. Wielkość tę można przyjąć jako w przybliżeniu proporcjonalną do siły pola wymuszenia mierzonej w warunkach quasi-statycznych.

Rozpatrzono dwa przypadki zmiany wartości pola efektywnego: (a) parametr kształtu  $a$  krzywej „anhysteretycznej” był uzależniony od względnej zawartości fazy żelaza, (b) modyfikowany był parametr  $\alpha$  uwzględniający wzajemne interakcje w materiale. Stwierdzono, że metoda polegająca na uzależnieniu wartości parametru pola efektywnego  $\alpha$  od zawartości żelaza zapewnia lepszy opis zjawisk magnetyzacji w rozważanych rdzeniach SMC. Natomiast osiągnięte właściwości magnetyczne, jak  $B_m$  i  $H_c$ , były poniżej wartości osiąganych przez wspomniane produkty komercyjne, były raczej porównywalne z ferrytami MnZn. W związku z powyższym, można domniemywać, że opracowane rdzenie mogą mieć podobne zastosowania np. w filtrach tłumiących zakłócenia elektromagnetyczne, dławikach, transformatorach dopasowujących o małych rozmiarach. W omawianej pracy autor wniosku zaproponował procedurę przygotowania mieszaniny proszkowej, procesu formowania próbek toroidalnych oraz przedstawił wyniki pomiarów właściwości magnetycznych i obliczeń modelowych.

W toku dalszych prac otrzymano rozszerzone wyniki badań właściwości magnetycznych próbek rdzeni SMC o różnym rozmiarze ziarna żelaza [A.23] oraz zastosowaniu różnego rodzaju osnowy [A.12]. Habilitant wykazał także eksperymentalnie, że wpływ ciśnienia formowania jest również bardzo istotny [A.10, A.20]. Przeprowadzone badania wykazały, że wraz ze wzrostem ciśnienia formowania nastąpił wzrost podatności magnetycznej – charakterystyki magnesowania przybrały bardziej strome nachylenie. Wraz ze wzrostem ciśnienia formowania rdzeni możliwe było również osiągnięcie wyższych wartości indukcji  $B$  przy niższym natężeniu pola magnetycznego  $H$  – rysunek 3. Pomiary wykonano dla trzech rodzajów próbek o identycznych wymiarach:  $d_o = 50$  mm,  $d_i = 30$  mm,  $h = 9,8$  mm, gdzie  $d_o$  to średnica zewnętrzna  $d_i$  to średnica wewnętrzna,  $h$  to wysokość. Próbki cylindryczne przygotowano przy użyciu prasy hydraulicznej o nacisku konstrukcyjnym 75 ton, dla których uzyskano ciśnienie prasowania odpowiednio: 234 MPa (30 ton – C30), 390 MPa (50 ton – C50), 507 MPa (65 ton – C65). Zawartość polimeru (PVC) w kompozycji wynosiła 0,5% w ogólnej wadze próbki.



Rys. 3. Typowe wartości  $B_{max}$  badanych SMC w zależności od ciśnienia formowania.

Rozszerzenie prowadzonych badań eksperymentalnych pozwoliło autorowi na wyznaczenie wartości ciśnienia formowania, przy których poprawa parametrów magnetycznych jest już

niewielka w stosunku do wzrostu ciśnienia. Należy zaznaczyć, że wzrost ciśnienia formowania wymaga zastosowania bardziej wytrzymałych materiałów do budowy form i pociąga za sobą zwiększone koszty wytwarzania.

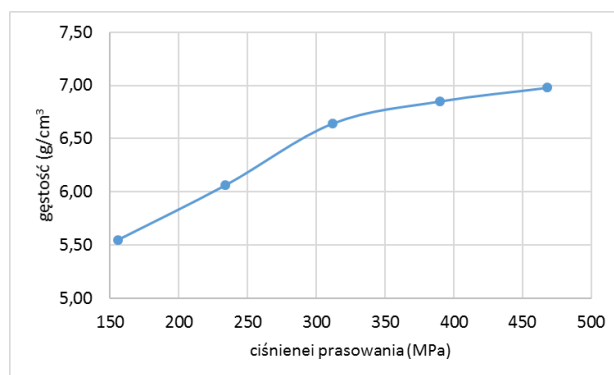
Z uwagi na możliwości uwzględnienia w modelu Jilesa-Athertona różnych zjawisk fizycznych, habilitant zaproponował istotną modyfikację tego modelu dla SMC, tak aby opisać efekt zmiany kształtu pętli za pomocą dodatkowej składowej bezpośrednio związanej z ciśnieniem prasowania kompozytów. W tym celu wykorzystano podejścia Sablika, podobnie jak miało to miejsce w pracy [A.17], dotyczącej wpływu naprężeń szczątkowych na siły pola koercji w procesie wyciągania drutów. W pracy **AJ.2** skupiono się na możliwości modelowania tego efektu przy użyciu teorii Jilesa-Athertona-Sablika (JAS). Założono, że wpływ zmieniającego się ciśnienia zagęszczania można opisać przez bezpośrednie wprowadzenie do równań modelu członu zależnego od naprężenia. Zaproponowaną modyfikację dostrzegł sam twórca modelu [Sablik, M. J. (2020). Prediction of Magnetic Properties of a Plastically Deformed Steel and One Way to Measure its Plastic Deformation. *Advances in Materials Science*, 20(2), 5-13.].

Opis bazuje na pojęciu pola efektywnego  $H_{eff}$ , które z punktu widzenia inżynierii rozumiane jest jako środek do wprowadzenia wyników dowolnego zjawiska do modelu teoretycznego. W ten sposób uzyskuje się przybliżenie efektu. Pole efektywne powinno być postrzegane jako współdziałanie między wieloma komponentami, które wzmacniają działanie bodźca zewnętrznego. Pole efektywne może obejmować wpływ prądów wirowych, lepkość termiczną, naprężenia mechaniczne, efekty rozmagnesowania itp., co można zapisać jako

$$H_{eff} = H + H_{\omega} + H_T + H_{\sigma} + H_D \quad (4)$$

W rozpatrywanym przypadku uznano, że pole efektywne składa się ze składowej średniego pola Weissa i elementu magnetoelastycznego, t.j.  $H_{eff} = H + \alpha H + H_{\sigma}$ , przy czym ostatni termin przypisuje się w literaturze M. Sablikowi.

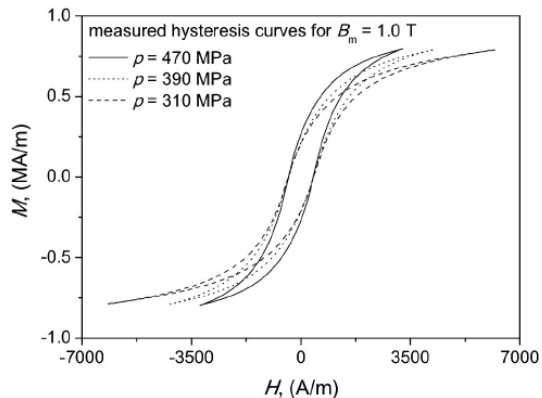
Habilitant w celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych i modelowych przygotował zestaw próbek, wykonanych przy różnym ciśnieniu formowania, w przedziale od 156 do 470 MPa. Miało to istotny wpływ na uzyskaną gęstość kompozytu – rysunek 4.



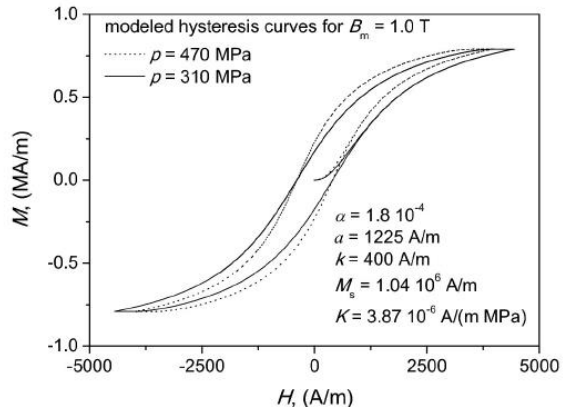
Rys. 4. Obliczone wartości gęstości kompozytów dla wybranych wartości ciśnienia zagęszczania.

Stosunek wagowy proszku Fe do PVC utrzymywano jak w poprzednich eksperymentach na stałym poziomie 99,5/0,5. Zauważono, że dla ciśnienia zagęszczania równego 470 MPa uzyskana maksymalna indukcja wyniosła około 1,3 T, co jest wartością porównywalną z wartością dla niektórych stopów amorficznych. Dla niższych ciśnień zagęszczania wartości

$B_{\max}$  były niższe. Jako reprezentatywną wartość wybrano  $B_m = 1,0$  T, aby zobrazować kształty niektórych zmierzonych krzywych histerezy (rysunek 5).



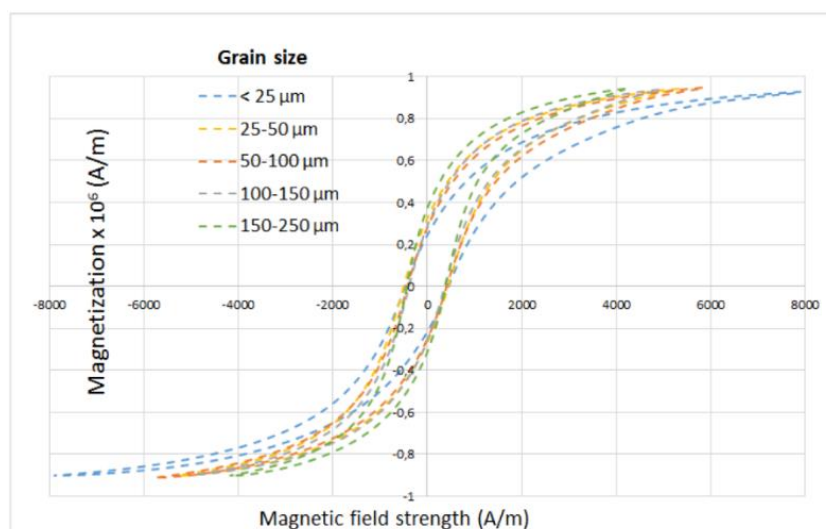
Rys. 5. Zmierzone krzywe histerezy dla wybranych wartości ciśnienia zagęszczania.



Rys. 6. Modelowane krzywe histerezy dla  $B_m = 1,0$  T i oszacowany zestaw parametrów modelu JAS.

Parametry modelu JAS zostały oszacowane przy użyciu algorytmu DIRECT. Ich wartości, a także niektóre wybrane modelowane krzywe histerezy pokazano na rysunku 6. Błąd w określaniu natężenia koercji nie przekraczał 2,4%. W przypadku punktu remanencji było to około 16,5%. Można stwierdzić, że jakościową zmianę kształtu modelowanej krzywej można uzyskać poprzez aktualizację wartości efektywnego parametru pola średniego.

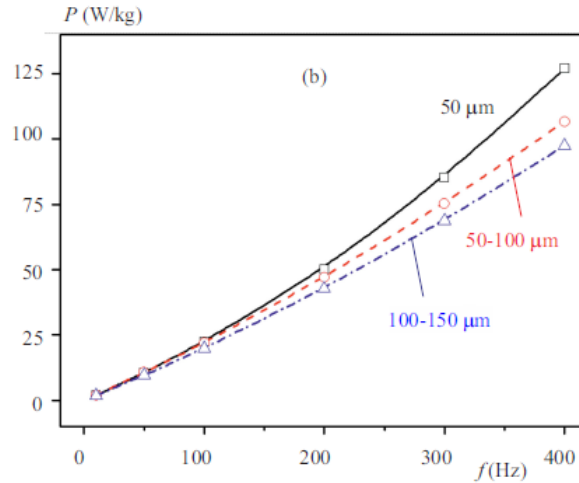
Kolejnym parametrem konstrukcyjnym poddanym analizie była wielkość ziaren proszku magnetycznego. Autor przeprowadził szereg badań eksperymentalnych, mających na celu wyznaczenie optymalnego rozmiaru ziaren [m.in. A.23]. Do opisu krzywych doświadczalnych wykorzystał fenomenologiczny model Takácsa. Istotnym jest, że opis ten jest bezwymiarowy, a co za tym idzie, może być wykorzystywany do modelowania pętli różnych materiałów elektrotechnicznych charakteryzujących się właściwościami posiadającymi histerezę. Autor modelu do opisu krzywych histerezy wykorzystał odpowiednią kombinację funkcji liniowej oraz funkcji tangensa hiperbolicznego. Niewątpliwą zaletą zaproponowanego opisu jest zdolność do odtworzenia prostych pętli histerezy jak i bardziej skomplikowanych krzywych magnesowania. W kontekście prowadzonych przez habilitanta badań, ważne jest, że model  $T(x)$  umożliwia wykorzystanie teorii pola efektywnego. Pozwala to w łatwy sposób rozszerzyć model o zależności uwzględniające zmiennych procesowych tj. rozmiaru uziarnienia cząstek żelaza w kompozycie. W pracy **AJ.3** autor zbadał właściwości magnetyczne rdzeni SMC przy ustalonych w poprzednich etapach udziale wagowym składników oraz ciśnieniu i temperaturze formowania. Pożądane przedziały granulacji ziaren uzyskano poprzez separację jednego rodzaju proszku Fe w wytrząsarce sitowej. Odpowiednie frakcje posłużyły następnie do wykonania rdzeni. Różnice kształtu pętli histerezy w zależności od rozmiaru ziaren żelaza pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Pętłe histerezy uzyskane dla pięciu kompozytów różniących się wielkością ziarna Fe.

Autor wykazał, że najlepsze właściwości magnetyczne uzyskano dla ziaren o rozmiarze w przedziale  $<150-250>$   $\mu\text{m}$ . Należy wspomnieć, że proces magnesowania zależy w dużej mierze od struktury domeny. Materiały o dużej wielkości cząstek (powyżej  $150 \mu\text{m}$ ) mają złożoną strukturę domen magnetycznych. Proces magnetyzacji w tych materiałach odbywa się poprzez dominujący proces ruchu ścian magnetycznych i pomniejszy proces obrótu wektora magnetyzacji. W materiałach o małej wielkości cząstek (mniejszej niż  $25 \mu\text{m}$ ) dominuje obrót wektora magnetyzacji. W zakresie wielkości cząstek ( $50-150 \mu\text{m}$ ) oba procesy mają porównywalny znaczenie. Uzyskane wyniki potwierdzają wyżej wspomniane relacje fizyczne. W przypadku próbek badanych na tym samym poziomie magnetyzacji, koercja reprezentowana przez współczynnik  $H_{c0}$  i współczynnik nachylenie pętli histerezy malały wraz ze wzrostem średniej wielkości cząstek. Zależności te dowodzą, że proces magnesowania jest łatwiejszy w przypadku materiałów zawierających duże cząstki.

Wpływ zmiennych procesowych jest również wyraźnie dostrzegalny w odniesieniu do poziomu strat magnetycznych w rdzeniach kompozytowych. Zebrane we wcześniejszych etapach badań dane wykorzystano do przeprowadzenia porównania parametrów magnetycznych w stosunku do typowych blach elektrotechnicznych, które zaprezentowano w pracy **AJ.4**. Autor wykazał, że zmiana rozmiaru ziarna ma istotny wpływ na właściwości magnetyczne wykonanych rdzeni (stratność, natężenie koercji, indukcja remanencji, indukcja nasycenia) i stwierdził, że lepszymi parametrami (najwyższy stosunek  $B_m/H_c$ ) cechują się próbki o większym rozmiarze cząstek żelaza ( $100-150 \mu\text{m}$ ) – rysunek 8. Zauważono również, że zmiana częstotliwości przemagnesowania nie wpływa znacząco na kształt pętli histerezy. Eksperymentalne pomiary wykonano przy użyciu systemu REMACOMP C-200, zgodnie ze standardem IEC 60404. Otrzymane charakterystyki strat w żelazie w zakresie od 10 do 400 Hz wskazały na przewagę kompozytów z uziarnieniem w zakresie  $100-150 \mu\text{m}$ . Korzyści wynikające z zastosowania większego rozmiaru ziarna żelaza są już znaczące.



Rys. 8. Wpływ wielkości ziarna żelaza na straty magnetyczne w kompozytach Fe-polimer, dla  $B_m = 1,0$  T

W celu ułatwienia projektowania obwodów magnetycznych pożądane jest opracowanie nowych narzędzi CAD, zdolnych do uwzględnienia nieliniowych właściwości materiału. Poszukiwania rozwiązania, lepiej dostosowanego do opisu właściwości magnetycznych SMC w stosunku do modelu Jilesa-Athertona zwróciły uwagę habilitanta i zespołu badawczego (dr hab. inż. Krzysztof Chwastek oraz wspólny doktorant mgr inż. Radosław Jastrzębski) na model GRUCAD. Model, brazylijskiej grupy badawczej, stanowi cenną alternatywę dla oryginalnego opisu JA. W modelu GRUCAD gałęzie pętli histerezy uzyskuje się poprzez wprowadzenie odpowiednich przesunięć – odstrojenia – względem tak zwanej krzywej anhysteretycznej nie wzdłuż osi  $M$ , lecz wzdłuż osi  $H$ . Eliminuje to potrzebę wprowadzenia pseudoparametru  $\delta_M$ ,

$$\delta_M = 0.5[1 + \text{sign}((M_{an} - M)dB/dt)] \quad (5)$$

którego wartość musi być stale monitorowana w modelu JA i którego rolą jest wyeliminowanie fragmentów pętli o ujemnych różnicach podatności uzyskanych po odwróceniu pola. Ważną zaletą modelu GRUCAD jest to, że opisy procesów nieodwracalnych i odwracalnych są odseparowane, co ułatwia analizę. Ponadto dobrze znany problem modelu JA z ujemnymi wartościami podatności różniczkowej  $dM/dH$  po nagłej zmianie kierunku pola nie jest tu obecny, dlatego opis GRUCAD jest odpowiedni do obliczeń metodą elementów skończonych.

Na bazie przeprowadzonych przez habilitanta badań eksperymentalnych zweryfikowano przydatność podejścia GRUCAD do modelowania symetrycznych krzywych histerezy [AJ.5]. W rozpatrywanym przypadku, zmienną wejściową modelu jest indukcja magnetyczna  $B$ . Wyjście modelu to całkowite natężenie pola  $H$ . Oznacza to, że opis ten można łatwo włączyć do dwuwymiarowej metody FEM opartej na potencjale wektora magnetycznego  $\vec{A}(\vec{B} = \text{rot}\vec{A})$ , gdzie indukcja magnetyczna jest znana przed natężeniem pola. W pomiarach magnetycznych przeprowadzanych zgodnie z międzynarodowymi standardami, takimi jak IEC 60404, kształt fali indukcji magnetycznej jest kontrolowany. Oznacza to, że dane pomiarowe mogą być wykorzystane jako bezpośrednie dane wejściowe dla modelu GRUCAD. Zestaw rozważanych równań dla modelu GRUCAD wyglądał następująco:

$$H_{an} = \frac{B}{\mu_0} - M_S \left( \coth \lambda - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{1}{a} \left[ (1 - \alpha) H_{an} + \alpha \frac{B}{\mu_0} \right] \quad (7)$$

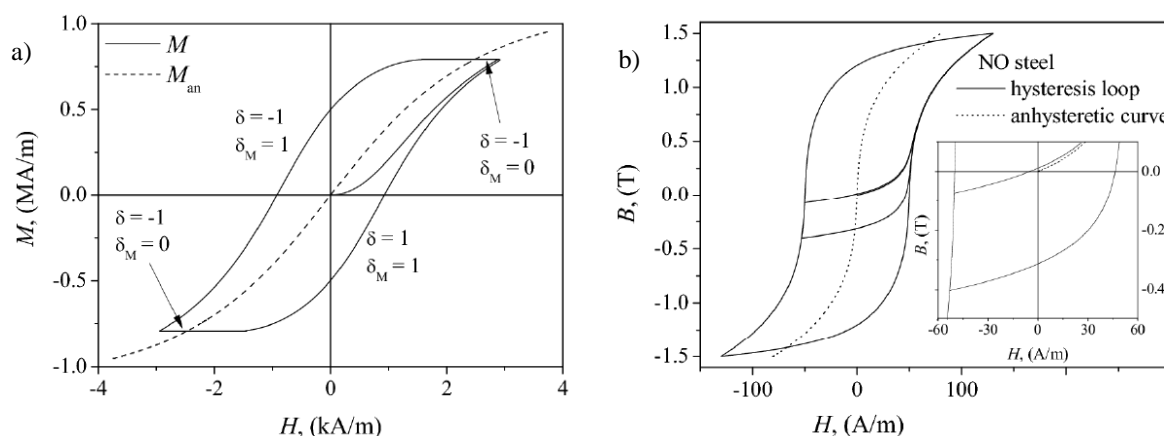
$$\frac{dH_h}{dB} = \frac{H_{HS}(\coth \lambda_H - 1/\lambda_H) + H_h}{\gamma \delta} \quad (8)$$

$$\lambda_H = \frac{H_h + \delta H_{HS}}{a} \quad (9)$$

$$H = H_{an} + H_h \quad (10)$$

gdzie  $M_s$  jest parametrem modelu definiowanym jako magnetyzacja nasycenia, natomiast  $a$  i  $\alpha$  są współczynnikami funkcji Langevina, która została wykorzystana do opisu krzywej bezhisterezowej jak to miało miejsce w przypadku modelu JA, jednak należy zaznaczyć że interpretacja parametru  $\alpha$  nie ma żadnego powiązania z polem efektywnym jak to miało miejsce w modelu JA.

W pracy zweryfikowano przydatność podejścia GRUCAD do modelowania symetrycznych krzywych histerezy samodzielnie wykonanych rdzeni SMC. Na rysunku 9 pokazano wypłaszczenie krzywej modelu JA z pseudoparametrem  $\delta_M$  w obszarze przemagnesowania (w przypadku braku uwzględnienia  $\delta_M$  krzywa uzyskuje ujemne nachylenie) oraz prawidłowy opis z zastosowaniem modelu GRUCAD.



Rys. 9. Pętla histerezy i krzywa anhysteretyczna symulowane za pomocą modelu JA zawierającego parametr  $\delta_M$  (a) oraz za pomocą modelu GRUCAD (b).

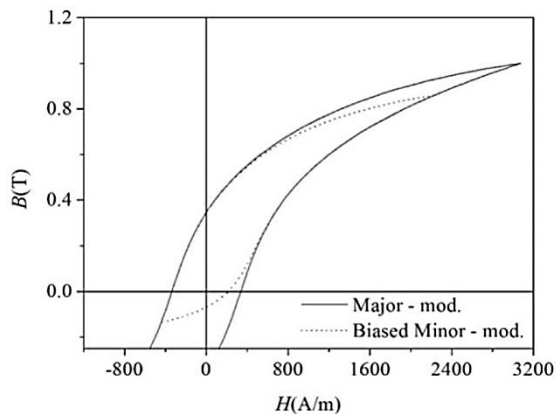
Stwierdzono, że otrzymane kształty pętli histerezy są stosunkowo dobrze opisane, błąd procentowy natężenia pola koercji nie przekracza 16% w warunkach quasi-statycznych. Zależy to zarówno od wielkości ziarna, jak i od ciśnienia zagęszczania.

Zalety modelu GRUCAD oraz jego stosunkowo prosta implementacja w oprogramowaniu MATLAB umożliwiły przeprowadzenie badań magnetycznie miękkich rdzeni kompozytowych w przypadku gdy są one podmagnesowane prądem stałym [AJ.6]. Sygnały wzbudzenia obwodów magnetycznych w rzeczywistych warunkach mogą znacznie różnić się od sygnałów określonych w odpowiednich normach, np. IEC-60404. Jedną z najczęstszych sytuacji jest obecność sygnału przesunięcia prądu stałego, który w skrajnych przypadkach może powodować nieprawidłowe działanie transformatorów energetycznych z powodu prądów indukowanych geomagnetycznie.

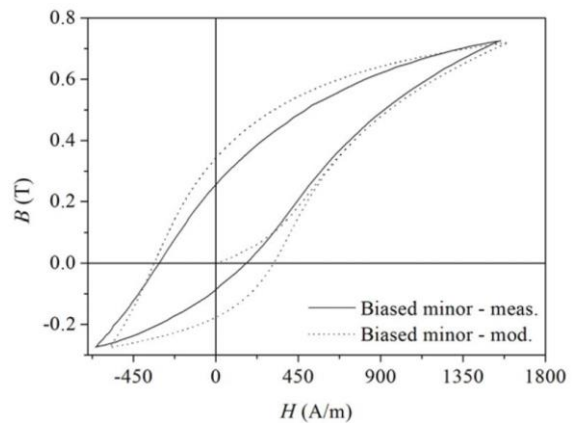
Z zasad Madelunga [Madelung E., (1905) Über Magnetisierung durch schnellverlaufende Ströme und die Wirkungsweise des Rutherford-Marconischen Magnetdetektors, Ann. Phys. 322(10), 861–890.] wynika, że fragmenty gałęzi pętli cząstkowych z podmagnesowaniem DC



powinny pokrywać się lub przynajmniej dążyć asymptotycznie do fragmentów dla głównej pętli. Oznacza to, że wstępująca gałąź pętli cząstkowej jest równoważna wstępującej gałęzi głównej pętli z odpowiednim przesunięciem. Możliwe jest uzyskanie fragmentów dowolnej mniejszej pętli z odchyleniem prądu stałego (lub bez) za pomocą odpowiednio przesuniętych fragmentów głównej pętli. To jakościowe zachowanie zostało zilustrowane na rysunku 10, gdzie przedstawiono obie krzywe modelowane przy użyciu metody GRUCAD. Wartości parametrów modelu pozostają niezmienione dla pętli obciążonych prądem stałym.



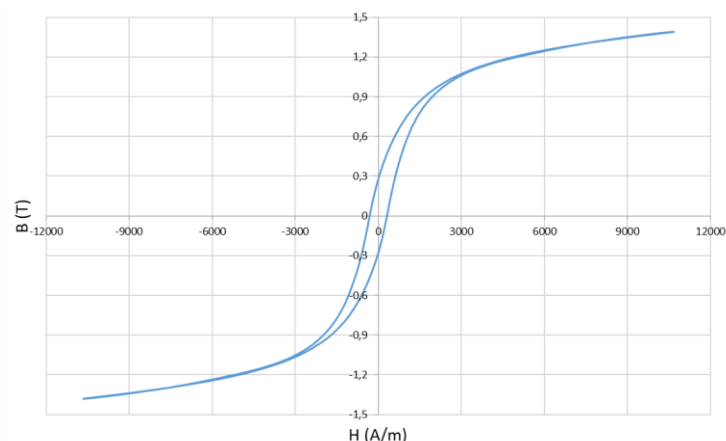
Rys. 10. Zamodelowana pętla główna i podmagnesowana DC pętla cząstkowa.



Rys. 11. Pomiarowa i modelowana pętla cząstkowa dla  $B_{max}=0,72$  T.

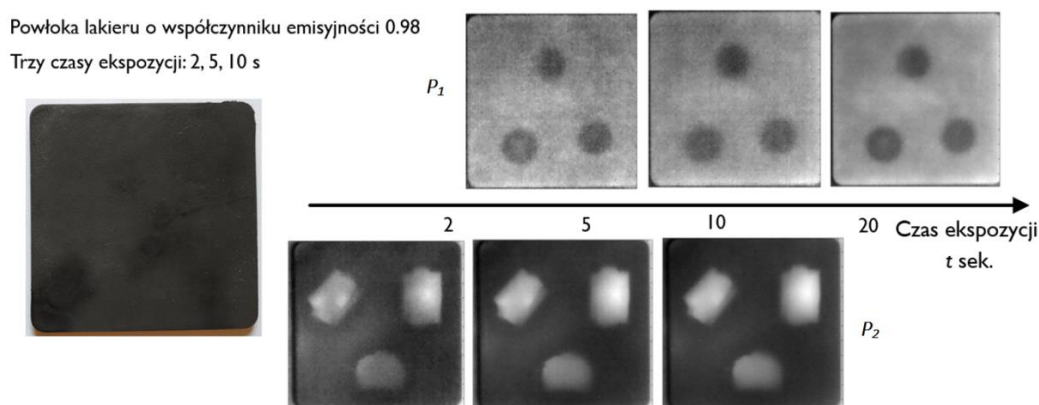
Model GRUCAD okazał się bardzo przydatny i rozwojowy. Wykazano, że zmierzone i modelowane krzywe histerezy z podmagnesowaniem DC są zgodne jakościowo. Dokładność modelowanych mniejszych pętli zależy w znacznym stopniu od jakości reprezentacji głównej pętli i szacowanych wartości parametrów. Ten sam zestaw parametrów może służyć do opisu wszystkich krzywych magnesowania, zarówno symetrycznych, jak i podmagnesowanych. Jest to ważna zaleta proponowanego opisu w porównaniu z modelem Jilesa-Athertona. Badania modelowe wykazały, że pomimo bardzo dobrego dopasowania głównej pętli (błąd względny 3,1%), dopasowanie mniejszych pętli opartych na DC jest na dużo niższym poziomie i osiąga nawet 41% błędu – rysunek 11. Rozbieżności między modelowanymi i mierzonymi pętlami cząstkowymi z podmagnesowaniem prądem stałym wynikają z tego, że modelowane pętla cząstkowe znajdują się w obszarze największego błędu pętli głównej.

Autor opracował koncepcję badań kompozytów proszkowych, następnie na bazie doświadczeń z pobytu na stażu naukowym zbudował laboratorium badawcze. Umożliwiło to przeprowadzenie badań eksperymentalnych, w których habilitant mógł sterować pewnymi zmiennymi niezależnymi (wielkość ziarna, ciśnienie, temperatura, rodzaj i ilość składników, itd.) oraz obserwować ich wpływ na zmienne zależne (np. kształt pętli histerezy, straty). Ostatecznie w wyniku badań eksperymentalnych i modelowych habilitant ustalił, że najlepsze parametry magnetyczne w warunkach quasi-statycznych można otrzymać stosując wielkość ziaren w zakresie 150-250  $\mu\text{m}$ , 0,5% zawartości PVC, ciśnienie formowania ok. 510 MPa, temperaturę formowania w przedziale 170 – 180  $^{\circ}\text{C}$ . Tak przygotowane rdzenie osiągają parametry  $B_{max} = 1,4$  T,  $B_r = 0,28$  T,  $H_c = 310$  A/m (rysunek 12).



Rys. 12. Przykładowy kształt pętli histerezy opracowanych przez habilitanta proszkowych rdzeni SMC.

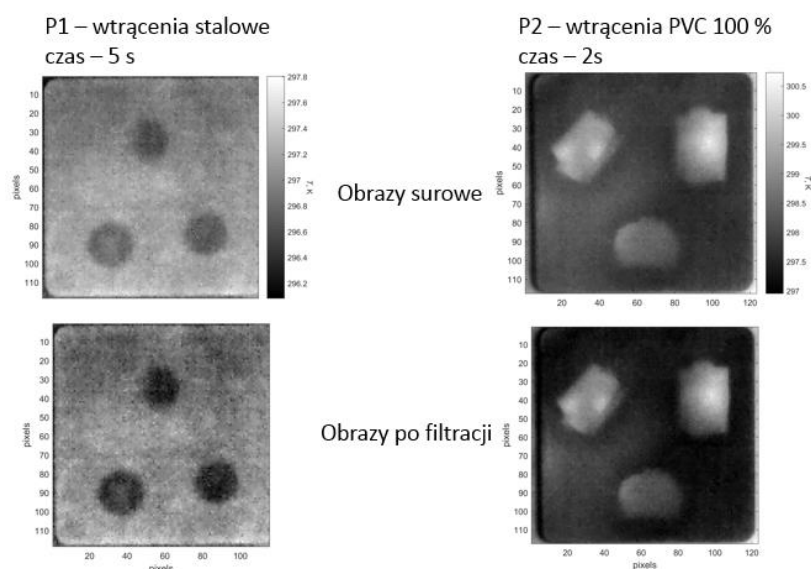
Równoległe do badań właściwości magnetycznych, elektrycznych i modelowania, autor przeprowadził badania nad nieinwazyjnymi metodami defektoskopii opracowanych kompozytów miękkich magnetycznie. Współpraca ze specjalistą od pomiarów termowizyjnych umożliwiła wykonanie pomiarów homogeniczności struktury kompozytów proszkowych za pomocą kamery promieniowania podczerwonego. Rezultaty badań zaprezentowano podczas konferencji międzynarodowej *Diagnostika'18* i opublikowano w pracy **AJ.9**. W celu określenia zależności pomiędzy właściwościami kompozytów, a ich jakością wykonania autor przygotował płaskie próbki referencyjne oraz próbki z różnymi układami defektów, m.in. dodano inkluzje polimerowe i metalowe, które kontrastowały z materiałem wypełnienia. Próbki oznaczono jako  $P_1$  (skład Fe-60%, PVC-40%) i  $P_2$  (skład Fe-90%, PCV-10%). Następnie próbki materiału poddano procesowi ogrzewania i chłodzenia, podczas którego rejestrowano sekwencję obrazów w podczerwieni. Pozwoliło to na wykrycie obszarów o różnych właściwościach termicznych (rysunek 13).



Rys. 13. Eksperyment pomiarowy

Na podstawie wyników pomiarów termograficznych wykonano analizę porównawczą danych z próbek z defektami i bez wad. Dodatkowo, przeprowadzono obróbkę i filtrowanie morfologiczne obrazów w celu zwiększenia kontrastu defektów (rysunek 14).

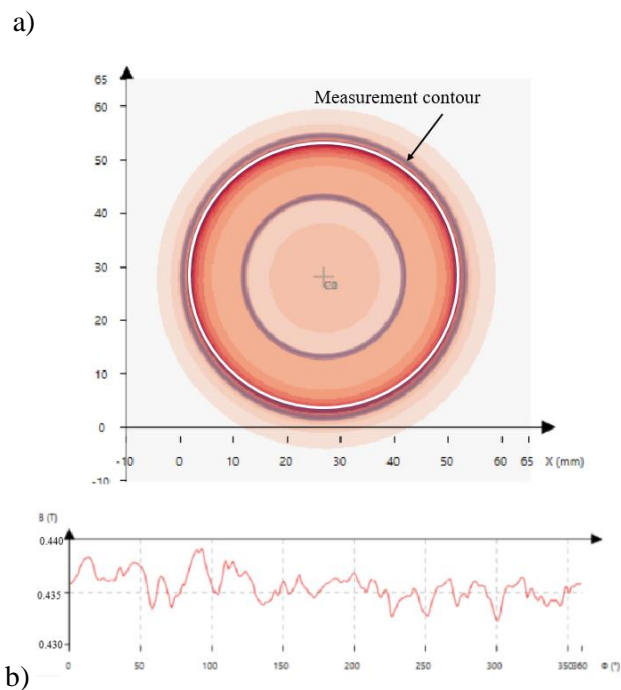




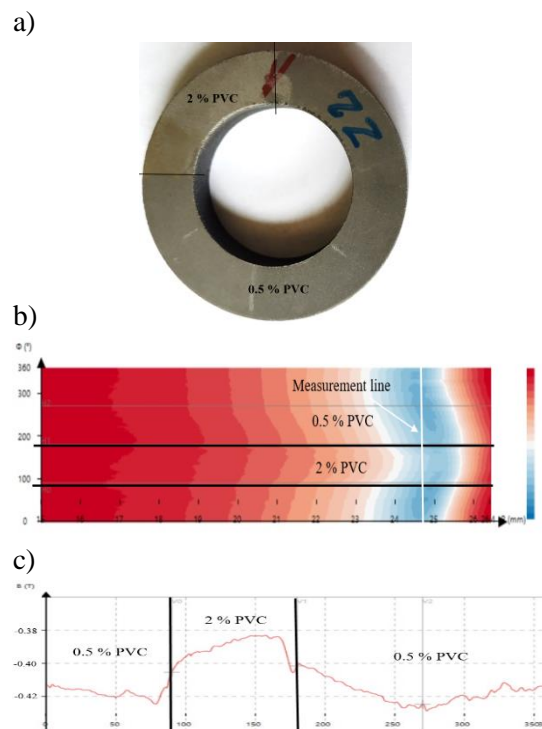
Rys. 14. Wyniki filtracji morfologicznej

Wyniki badań pozwalają założyć, że możliwe jest opracowanie nowej metody detekcji defektów w materiałach kompozytowych na podstawie otrzymanych obrazów rozkładu temperatury. Umożliwi to identyfikację defektów, takich jak wtrącenia, brak jednorodności, pęknięć lub zniekształceń w strukturze badanego obiektu.

W efekcie rozwoju badań prowadzonych nad metodami nieinwazyjnej oceny jakości opracowanych kompozytów, powstała autorska koncepcja wykorzystania kamery pola magnetycznego opartej na mikroczujnikach Halla. Jest to innowacyjne podejście do zastosowania urządzenia, które pierwotnie zostało zaprojektowane do badania właściwości magnesów trwałych. Badania nad zaproponowanym rozwiązaniem zostały przeprowadzone w ramach grantu pt. *Nieinwazyjne badanie jednorodności struktury kompozytów miękkich magnetycznie* realizowanego w konkursie NCN MINIATURA 2 [C.2]. W toku prac badawczych habilitant przygotował próbki rdzeni i płytek kompozytowych oraz spreparował w nich różnego rodzaju defekty, m.in. w postaci wtrąceń (grudek) z materiału polimerowego i zanieczyszczeń, nawiercenia otworów o różnej średnicy i głębokości, wywołanie pęknięć itp., itd. Metodologia badań wstępnych zakładała zbudowanie przystawki, wewnątrz której znajdował się magnes neodymowy o wymiarach pokrywających się z badaną próbką. Umożliwiło to łatwą i szybką wymianę próbek bez zmiany orientacji przestrzennej źródła pola. Badania zostały wykonane w lutym 2019 r. przy użyciu trój-osiowej kamery pola magnetycznego wyposażonej w detektor MiniCub3D firmy MagCam w siedzibie producenta Magcam NV w Belgii. Wyniki badań wstępnych zostały zaprezentowane podczas konferencji *Progress in Applied Electrical Engineering PAEE 2019* i opublikowano w pracy **AJ.7**. W początkowej fazie eksperymentu zebrano informacje o natężeniu pola tuż nad powierzchnią próbek referencyjnych o zawartości PVC: 0,5%, 2%, 5%, 10%. Przykładowy magnetogram dla próbki ref\_0,5 (0,5% PVC) pokazano na ryc. 15a).



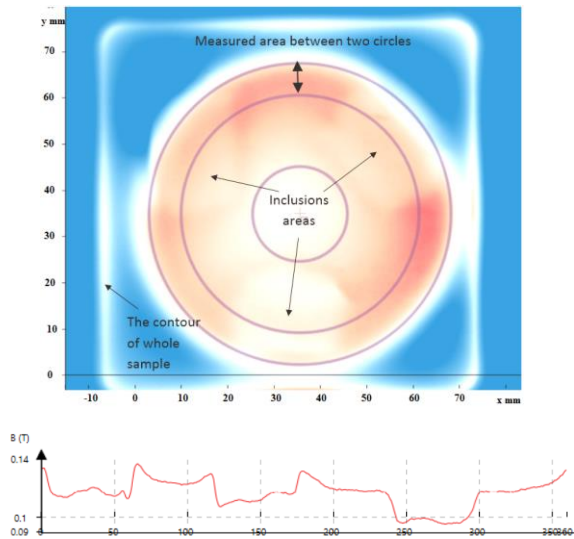
Rys. 15. Przykładowy magnetogram w układzie kartezyjskim, próbka referencyjna ref. 0,5% PVC (a), rozkład gęstości strumienia magnetycznego wzdłuż krzywej (b).



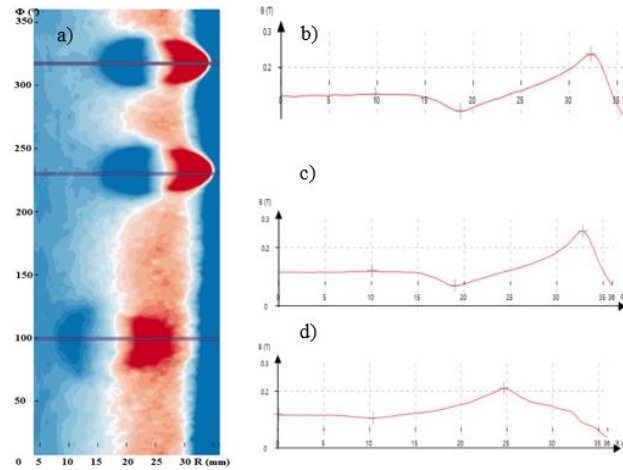
Rys. 16. Badana próbka (a), magnetogram próbki 0,5–2% PVC we współrzędnych cylindrycznych (b), rozkład gęstości strumienia magnetycznego wzdłuż linii (c).

Bardziej szczegółowe informacje na temat jakościowych i ilościowych parametrów próbek uzyskano w cylindrycznym układzie współrzędnych – na podstawie składowej osiowej  $B_a$  (jest ona zazwyczaj taka sama jak  $B_z$ ). Wynik pokazano na ryc. 15b). Przykładowo pierwsza kontrolowana próbka składała się z dwóch kompozycji o różnej zawartości polimeru odpowiednio 0,5% i 2% (rysunek 16a). Na rysunku 16b pokazano rozkład pola magnetycznego w tej próbce. W części (b) system kartezyjski został przekształcony w system cylindryczny. Ten widok umożliwia lokalizację i ocenę niejednorodnego obszaru na całej powierzchni próbki. Szczegółowy obraz jakościowych i ilościowych cech heterogeniczności przedstawiono w części (c). W tym przypadku analiza została ograniczona do wykresu gęstości strumienia magnetycznego wzdłuż linii pomiarowej. Obszary o różnym składzie ilościowym można wyraźnie rozróżnić na rysunku 16c. Można również ocenić szybkość zmiany niejednorodności kompozycji. Wartość gęstości strumienia magnetycznego dla obszaru o zawartości polimeru 0,5% jest zbliżona do wartości odniesienia z próbki referencyjnej 0,5 % PVC i wynosi maksymalnie -0,43 T (znak „-” wynika ze zmiany polaryzacji magnesu trwałego na biegun „N”). Mapowanie pola magnetycznego na powierzchni próbek umożliwiło lokalizację i identyfikację wad.

Inny przeanalizowany przypadek miał na celu potwierdzenie skuteczności metody w wykrywaniu trąceń magnetycznych i niemagnetycznych w strukturze kompozytu magnetycznego. W tym celu przygotowano prostokątne próbki, w których umieszczono po trzy wtrącenia o różnej grubości  $h$  ( $1h$ ,  $2h$  i  $3h$ ) – rysunki 17 i 18. Są to te same próbki, które zbadano za pomocą termowizji – rysunek 14.



Rys. 17. Próbkę PFe70, a) rozmieszczenie wtrąceń polimerowych, b) magnetogram w układzie kartezjańskim, c) rozkład pola magnetycznego wzdłuż linii pomiarowej



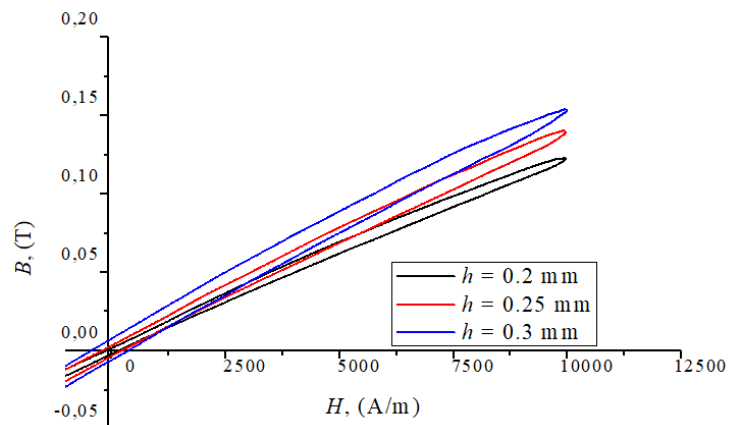
Rys. 18. Próbkę PFe90, a) rozmieszczenie wtrąceń stalowych, b) magnetogram w układzie cylindrycznym, c) rozkład pola magnetycznego wzdłuż linii pomiarowych

Przygotowane próbki różniły się proporcjami proszków żelaza i PVC. Próbkę PFe90 zawierała wagowo 10% PVC i 90% żelaza, natomiast w próbce PFe70 obniżono zawartość żelaza do 70%. Tak przygotowane mieszaniny umieszczono w stalowych formach w dwóch porcjach. Pierwszą część kompozycji wstępnie sprasowano, a następnie dodano wtrącenia w postaci płytek PCV (dla próbki PFe90) i krążków z nieorientowanej blachy elektrycznej (dla PFe70). Formę następnie wypełniono pozostałą mieszaniną Fe-PVC i wyprasowano pod ciśnieniem ok. 500 MPa i w temperaturze 170 °C.

Zmiana charakteru wtrącenia w strukturze kompozytu daje różne wyniki widoczne na magnetogramach. W pierwszym przypadku można zaobserwować osłabienie gęstości strumienia magnetycznego w obszarze wtrąceń. Jednak w drugim z rozważanych przypadków pojawiają się dodatkowe dipole magnetyczne. Zróżnicowanie tych zjawisk pozwala dodatkowo (poza lokalizacją wady) określić jej charakter - magnetyczny lub niemagnetyczny. Proponowana metoda jest podstawą do opracowania szybkiej i dokładnej metody diagnostyki rdzeni SMC i innych materiałów kompozytowych. Przyczyni się to do zwiększenia wydajności produkcji i poprawy wydajności komponentów.

Zdobyta wiedza i doświadczenie w obszarze kompozytów do zastosowań w elektrotechnice znalazła zastosowanie aplikacyjne przy realizacji prac badawczo-rozwojowych m.in. w projekcie PARP PO IR *Bony na innowacje dla MŚP*

pt. *Opracowanie i wdrożenie innowacyjnych ślizgów trolejbusowych* [B4] oraz w projekcie RPSL dla działania: 1.2. Badania, rozwój i innowacje w przedsiębiorstwach pt. *Zastosowanie właściwości ferromagnetycznych elektronicznych obwodów drukowanych do zabezpieczeń dokumentów, wyrobów i opakowań przed fałszerstwami* [J.2]. W ramach tej pracy badawczej autor opracował magnetyczną metodę inspekcji i pomiaru grubości warstwy kompozytowej zawierającej proszki metali ferromagnetycznych, naniesionej na podłoża dielektryczne. Opracowanie badań zostało przedstawione w publikacji **AJ.8**. Idea metody została oparta na eliptycznym modelu prof. Zakrzewskiego. Pierwotnie model eliptyczny służył do określania strat mocy w blachach elektrotechnicznych. W rozpatrywanym przypadku wykorzystano go do określenia parametrów pozwalających na obliczenie grubości warstwy farby ferromagnetycznej naniesionej na podłożu papierowe. Podejście wprowadziło równoważną przenikalność (zastępując kształt pętli histerezy elipsą), co umożliwiło uproszczenie obliczeń przestrzennego rozkładu wielkości elektromagnetycznych w próbce ferromagnetycznej. Zależności kształtów krzywej magnetyzacji od grubości powłoki (farby) dla struktury wielowarstwowej (podłoże + powłoka) pokazano na rysunku 19.



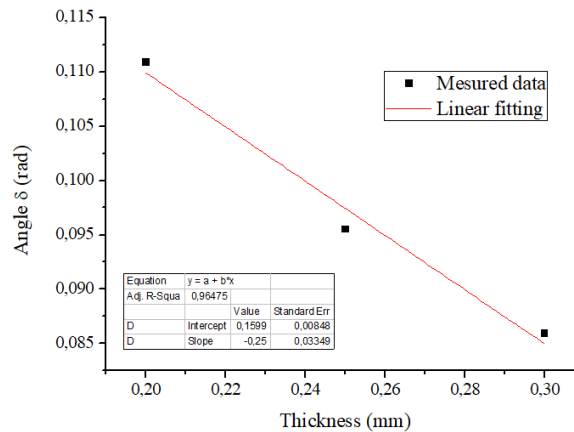
Rys. 19. Kształt pętli histerezy dla różnej grubości warstwy magnetycznej

Autor zaproponował dodatkowo wskaźnik - kąt  $\delta$ , który pozwala na szybki i prosty sposób weryfikacji grubości powłok magnetycznych na elastycznych podłożach diamagnetycznych w warunkach produkcyjnych. Równoważny kąt histerezy  $\delta$  jest definiowany na podstawie danych pomiarowych za pomocą równania:

$$\delta = \arcsin \frac{A^*}{\pi B_m^* H_m^*} \quad (11)$$

gdzie  $A^*$  jest obszarem pętli histerezy,  $B_m^*$  i  $H_m^*$  są odpowiednio indukcją magnetyczną (T) i natężeniem pola magnetycznego (A/m).

Badania umożliwiły opracowanie metody pomiaru grubości powłoki wykonanej z samodzielnie opracowanej farby magnetycznej, przydatnej w warunkach produkcyjnych. Na podstawie analizy uzyskanych wyników pomiarów można stwierdzić, że wartość przenikalności magnetycznej lub równoważnego kąta histerezy  $\delta$  farby magnetycznej naniesionej na podłożu papierowe może być skuteczną metodą określania jej grubości (rysunek 20).



Rys. 20. Zależność kąta  $\delta$  od grubości warstwy

## Podsumowanie osiągnięcia naukowego

Prowadzone prace były ukierunkowane przede wszystkim na aplikacyjne wykorzystanie wiedzy zdobytej podczas badań eksperymentalnych i modelowych z myślą o analizie zjawisk magnetycznych oraz predykcji właściwości elektrycznych i magnetycznych w rdzeniach i innych materiałach wykonanych jako kompozyty metalowo-polimerowe o charakterystyce magnetycznie miękkiej.

Do najważniejszych osiągnięć w głównym nurcie badań autor wniosku zalicza:

- opracowanie i weryfikację niskotemperaturowej metody wytwarzania kompozytów do zastosowań w elektrotechnice w oparciu o proszki metalowo-polimerowe. Wykazanie wpływu parametrów wytwarzania kompozytów, takich jak: skład ilościowy, rozmiar ziarna, ciśnienie formowania i rodzaj osnowy na właściwości magnetyczne wykonanych materiałów, w szczególności indukcję maksymalną, koercję i remanencję otrzymanych pętli histerezy oraz straty [AJ.1 - AJ.5],
- wykazanie przydatności modeli Takácsa oraz Jilesa-Athertona-Sablíka do opisu pętli histerezy magnetycznej z uwzględnieniem wpływu zmiennych procesowych w opracowanych kompozytach metalowo-polimerowych. Wykazanie przydatności modelu GRUCAD do opisu niesymetrycznych pętli histerezy [AJ.1 - AJ.3, AJ.5 - AJ.6],
- opracowanie nieinwazyjnej metody detekcji i analizy jednorodności struktury kompozytów oraz innych ich parametrów w oparciu o termografię komputerową oraz pomiar wartości strumienia magnetycznego [AJ.7- AJ.9].

W dalszych badaniach autor zamierza uwzględnić inne zjawiska fizyczne i struktury w rozpatrywanych obiektach, np. wielowarstwowy układ komponentów o odmiennych właściwościach (tzw. sandwich), gradientowy rozkład komponentów, zjawisko magnetostrykcji, zjawiska cieplne, badanie właściwości magnetycznych przy wysokich częstotliwościach i opracować automatyczną metodę detekcji wad kompozytów opartą o kamerę pola magnetycznego. Proponowane prace są wykonywane m.in. w trakcie prowadzonego przez habilitanta projektu pt. *Eko-innowacyjne materiały kompozytowe wykorzystujące surowce pochodzące z recyklingu do zastosowań elektrotechnicznych*, w ramach konkursu NCBiR - LIDER X [C.1]. W ramach projektu habilitant przewodzi siedmioosobowemu zespołowi, składającemu się z 5 doktorów oraz 2 doktorantów.

**5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

W ramach mobilności zagranicznej autor wniosku w roku 2016 odbył 3-miesięczny staż naukowy w Faculty of Energy Technology in Krško, Univerza v Mariboru, Słowenia. Przeprowadził tam badania w zakresie oceny właściwości magnetycznych proszkowych materiałów kompozytowych. W rezultacie odbycia stażu, autor otrzymał dostęp do aparatury umożliwiającej wytwarzanie własnych kompozycji metalowo-polimerowych i przeprowadził badania wstępne będące podstawą prezentowanego osiągnięcia naukowego [AJ.1].

W lutym 2019 r. autor wniosku prowadził badania wstępne w ramach grantu MINIATURA 2 w firmie MagCam w parku naukowo-badawczym Haasrode Research-Park w Belgii. W efekcie opracowano bazę danych pomiarowych zawierających informacje o wartości składowych pola magnetycznego  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  w próbkach materiałów SMC ze spreparowanymi defektami [AJ.7]. Dalsze badania w tym obszarze prowadzone są w laboratorium kierowanym przez habilitanta wyposażonego m.in. w Magcam Portal Scanner typ V4 PORTAL400 z MiniCube3D firmy MagCam NV [zakupionego w ramach projektu RID - C.4].

**6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.**

Aktywny udział autora wniosku w działaniach na rzecz promocji nauki polegał między innymi na udziale w organizacji konferencji naukowych, w tym: *Symposium of Magnetic Measurements and Modeling* – 2 edycje (2016, 2018), *Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów* – 2 edycje (2017 – sekretarz, 2018).

Poza działalnością naukową autor wniosku prowadzi aktywną działalność dydaktyczną i organizacyjną na rzecz macierzystego Wydziału i Uczelni. Autor wniosku jest promotorem ponad 20 prac inżynierskich i magisterskich, a od roku 2016 pełni funkcję opiekuna Studenckiego Koła Metrologii Elektrycznej działającego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej. W ramach pracy organizacyjnej autor wniosku był między innymi członkiem Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej (2015-2016), sekretarzem Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej (2017-2020), członkiem Wydziałowej Komisji ds. Studiów Doktoranckich (2017-2019), a od 2020 r pełni funkcję wydziałowego brokera innowacji. Autor wniosku opracował także materiały dydaktycznych dla przedmioty *Metody diagnostyki procesów* w ramach projektu Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Częstochowskiej, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, Nr umowy POWR.03.05.00-00-Z008/18 (konkurs POWER, NCBiR) oraz prezentacje multimedialne poszerzające wiedzę studentów w dyscyplinach Elektrotechnika, Elektronika, Automatyka i Robotyka, pt. „Podstawy programowania mikrokontrolerów na przykładzie Arduino” w ramach programu Regionalna Inicjatywa Doskonałości, nr projektu 020/RID/2018/19 (program MNiSW). Dodatkowo, autor wniosku uczestniczył w programie ERASMUS+: Koszyce, Słowacja, 2018; Alba Iulia, Rumunia, 2017; Maribor, Słowenia, 2016. Podczas wyjazdów habilitant wygłosił wykłady dla studentów o tematyce: Threats of static electricity, The antielectrostatics materials, Measurement methods



of electrical parameters of antistatic materials, Methods for measuring physical parameters of the anti-static coatings.

Zaangażowanie autora wniosku w pracę naukową, dydaktyczną i organizacyjną zostało wyróżnione indywidualnymi i zespołowymi nagrodami Rektora Politechniki Częstochowskiej w latach 2014, 2016, 2017, 2018, 2019. Ponadto, autor uzyskał zespołowo III miejsce w XL edycji Konkursu im. prof. M. Pożaryskiego na najlepsze artykuły opublikowane w roku 2015 w czasopismach z zakresu elektryki - organach SEP, za „Koncepcja tekstronicznego systemu do pomiarów funkcji życiowych małych dzieci” oraz złoty medal (zespołowo) na Międzynarodowej Wystawie Technologii i Innowacji IPITEX 2017, Bangkok, Tajlandia, za „BabyTex - Textronics System for Monitoring Vital Functions of Small Children”, a także nominację do Polskiej Nagrody Inteligentnego Rozwoju 2020 w kategorii Naukowiec przyszłości.

Autor wniosku jest promotorem pomocniczym w obronionej (dnia 14.07.2020 r.) rozprawie doktorskiej dr inż. Radosława Jastrzębskiego pt. „Zastosowanie modelu GRUCAD w opisie właściwości magnetycznych rdzeni kompozytowych”. Promotorem głównym pracy doktoranta jest dr hab. inż. Krzysztof Chwastek, prof. uczelni.

Aktywność autora wniosku w środowisku naukowym przejawia się między innymi czynnym uczestnictwem w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych, a także działalnością w ramach Polskiego Towarzystwa Zastosowań Elektromagnetyzmu (PTZE) i Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej (PTETiS) oraz udziałem w licznych zespołach eksperckich. Habilitant od 2016 r. pełni rolę eksperta w Narodowym Centrum Badań i Rozwoju, w Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości oraz Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej. Sumarycznie ocenił ponad 125 wniosków projektowych.

Autor wniosku wykonał recenzje 26 artykułów, w tym: 25 artykułów dla czasopism z listy JCR: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *Textile Research Journal*, *IEEE Sensors Journal*, *Cellulose*, *Materials*, jednego artykułu dla czasopisma krajowego: *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*. Prowadził sesje plenarne podczas krajowych (Międzyuczelniana Konferencja Metrologów - MKM'2018) oraz międzynarodowych (Symposium of Magnetic Measurements & Modeling - SMMM'2018) konferencji naukowych.

## **7. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych, dotyczących rozwoju kariery zawodowej.**

Poza głównym nurtem badań związanym z kompozytami miękkimi magnetycznie, autor wniosku zajmował się także tematyką związaną z kompozytami ekranującymi pole elektromagnetyczne oraz systemami tekstronicznymi.

Modyfikacja cech jakościowych i ilościowych opracowanych przez autora kompozytów metalowo-polimerowa umożliwiła adaptację tych rozwiązań do potrzeb konstrukcji kompozytów ekranujących pole elektromagnetyczne. W celu wykorzystania w pełni właściwości innowacyjnych kompozytów EMSC, zawierających również komponenty pochodzące z recyklingu, wymagane było przeprowadzenie zarówno badań eksperymentalnych, jak i sformułowanie teoretycznego opisu procesu rozpraszania fal elektromagnetycznych w tych materiałach. Przykładowym zastosowaniem takich kompozytów

mogą być obudowy i przesłony układów elektronicznych, a do ich wytworzenia można wykorzystać materiały z recyklingu.

W początkowym etapie prac przeprowadzono badania eksperymentalne mające na celu określenia przenikalności magnetycznej oraz rezystywności kompozytów EMSC w zakresie pól charakteryzujących się długością fali znacznie większą od rozmiaru domen (ziarna Fe – 150  $\mu\text{m}$ ) [A.22]. Otrzymane rezultaty dla kompozycji Fe-PVC o zawartości wagowej PVC w zakresie od 2% do 60 % i częstotliwości pola od 50 Hz do 1 MHz okazały się niezadowolające. Zastępcza głębokość wnikania pola w zakresie rozpatrywanych częstotliwości była stosunkowo duża. Oznaczało to, że badane kompozyty miały słabe właściwości ekranujące w tym zakresie częstotliwości. Poprawę parametrów otrzymano przy w innym doborze składu kompozytu np. rudy cynku, opisanej w [A.21].

Innym aspektem wpływającym na parametry kompozytu, głównie mechaniczne, jest zastosowanie dodatkowego zbrojenia. W artykule [A.5] przedstawiono analizę wpływu składu jakościowego i ilościowego kompozytów na ich przewodność elektryczną i właściwości mechaniczne. W tym celu habilitant przygotował badania próbek kompozytów na bazie recyklingowych materiałów metalowych. Wióry i proszki aluminium zmieszano w stałych ilościach wagowych z proszkiem PCV. Do mieszanki dodano różne rodzaje włókien wzmacniających (bawełna, celuloza, polietylen, poliamid). Krótkie włókna uzyskano przez mielenie materiałów włókienniczych. Tak przygotowane próbki formowano pod ciśnieniem i w temperaturze nie powodującej degradacji materiału, z którego wykonane było zbrojenie. Następnie przeprowadzono badania: twardości, wydłużenia i siły ugięcia, testy udarności oraz przewodności elektrycznej. Analiza danych mechanicznych i wyników pomiarów rezystancji umożliwiła autorowi określenie związków między tymi parametrami a składem ilościowym i rodzajem wzmocnienia przedstawionych kompozytów. Zastosowanie materiałów pochodzących z recyklingu, takich jak wióry aluminiowe lub stalowe spojonych polimerem i wzmocnione włóknami (również uzyskane z recyklingu) pozwala na opracowanie materiałów konstrukcyjnych do użytku w przemyśle energetycznym i elektronicznym o pożądanych właściwościach mechanicznych i elektrycznych.

W związku z niesatysfakcjonującymi efektami badań eksperymentalnych nad EMSC z wykorzystaniem tylko proszków żelaza i PVC, w pracy [A.15] przedstawiono dodatkową, szczegółową analizę teoretyczną zagadnienia ekranowania pola elektromagnetycznego. Miało to na celu wyznaczenia wymaganych cech materiałów składowych. W rezultacie otrzymano współczynnik transmisji mocy fali elektromagnetycznej przez kompozyt w postaci:

$$T = \left| 4\eta \frac{\exp(-\Gamma_2 d)}{(1+\eta)^2 - (1-\eta)^2 \exp(-2\Gamma_2 d)} \right|^2, \quad \eta = \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \quad (12)$$

gdzie  $\zeta_1$  i  $\zeta_2$  są impedancjami falowymi otoczenia i próbki, a  $\Gamma_2$  – współczynnikiem propagacji fali w próbce. Analizując otrzymane wykresy  $T(\delta)$  i przyjmując pewną wartość  $\mu_r$  stwierdzono, że w praktyce znajomość  $T$  w funkcji  $d$  jest istotna i często wystarczająca do określenia skuteczności ekranowania fali elektromagnetycznej przez kompozyt.

Obliczenia teoretyczne zweryfikowano na opracowanym stanowisku doświadczalnym (rysunek 21) z użyciem mieszaniny o różnym składzie jakościowym i ilościowym (metal + PVC), również z wykorzystaniem materiałów odpadowych (rysunek 22.). Rezultaty badań przedstawiono w pracy [M.3] zaprezentowanej podczas konferencji *Applications of*



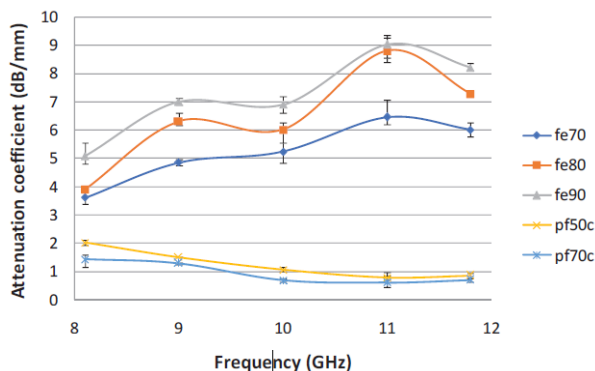
*Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine.* Modyfikacje kompozytów spowodowały, że wartości współczynnika tłumienia wyniosły od 1 do 9 dB/mm (rysunki 15-16). Najwyższe wartości (4-9 dB/mm) dotyczą płytek o dużej zawartości żelaza (Fe70, Fe80, Fe90, pył80, pył90, zendra70, zendra90). Zgodnie z oczekiwaniami, im wyższa częstotliwość, tym wyższy współczynnik tłumienia. Pewne rozbieżności można wytłumaczyć niejednorodnością płytek. Możliwe, że składniki nie zostały wymieszane w sposób jednolity, co spowodowało zróżnicowanie pomiarów i odchylenie wyników. Współczynnik tłumienia dla próbek o niskiej zawartości żelaza (Fe30 i Fe50) i dla rudy cynku (Zn85, Zn80) jest kilkakrotnie mniejszy (około 1-2 dB/mm) niż dla płytek o wysokiej zawartości żelaza.



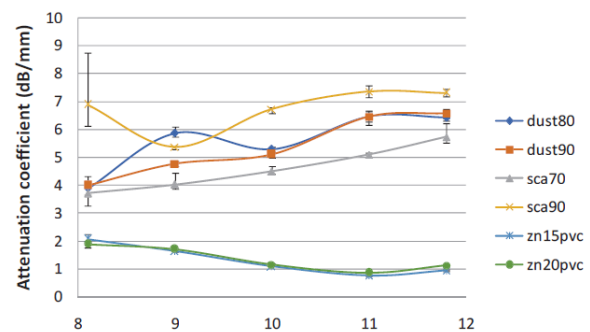
Rys. 21. Stanowisko pomiarowe, 1 – generator, 2 – falowód, 3 – szczelina pomiarowa (na próbkę), 4 – detektor, 5 – woltomierz.



Rys. 22. Próbkę kompozytów: a) 30% Fe; b) 50% Fe; c) 80% pył stalowy; d) 90% pył stalowy; e) 80% ruda Zn; f) 90% ruda Zn; g) 80% zendra; h) 90% zendra; i) 70% proszek Fe; j) 80% proszek Fe; k) 90% proszek Fe



Rys. 23. Współczynnik tłumienia w funkcji częstotliwości dla próbek z czystym żelazem.



Rys. 24. Współczynnik tłumienia w funkcji częstotliwości dla próbek z odpadami.

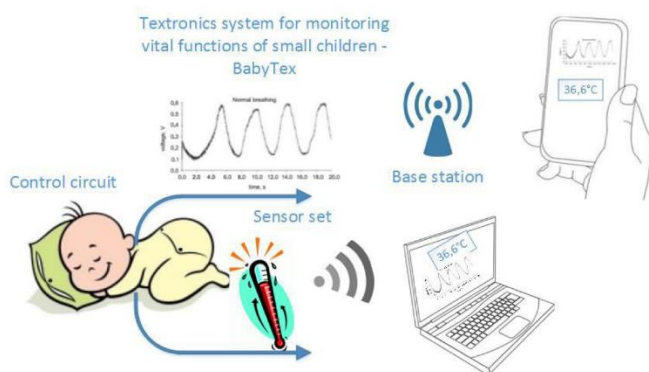
Warto zauważyć, że kompozyty na bazie odpadów mają współczynniki tłumienia porównywalne z kompozytami na bazie czystego żelaza. Jest to szczególnie widoczne w przypadku próbek z pyłu złomowiskowego lub zgorzeliny walcowniczej.

Rozszerzeniem zainteresowań badawczych Autora wniosku są również współczesne materiały tekstroniczne, które mają bardzo szerokie zastosowanie zarówno w odzieży inteligentnej, jak i w zastosowaniach przemysłowych: w przemyśle samochodowym, komputerowym i medycznym. Tekstronika łączy wiedzę z wielu dziedzin, takich jak: włókiennictwo, elektronika, informatyka, ale też automatyka, inżynieria materiałowa

i metrologia i elektrotechnika. Wyroby tekstroniczne są stosowane w służbach ratowniczych, w wojsku oraz w przedmiotach codziennego użytku. Systemy tekstroniczne wymagają użycia materiałów takich jak włókna, nitki, tkaniny elektroprzewodzące, piezoelektryczne, włókna magnetyczne, włókna optyczne i tekstylia z pamięcią kształtu oraz kompozyty.

Habilitant jest głównym pomysłodawcą i liderem prac związanych z tekstronicznym systemem do pomiaru funkcji życiowych u małych dzieci – BabyTex. Wykonanie, zasada działania i testy systemu zaprezentowano m.in. w czasopiśmie *Journal of The Textile Institute* [A.9] oraz w innych publikacjach [A.26], [A.28], [M.8]. System zakłada monitorowanie takich parametrów jak czynność oddechowa i temperatura ciała małego dziecka. Ogólne zastosowanie systemu umożliwia wczesne wykrycie anomalii będących zagrożeniem dla zdrowia i życia, zwłaszcza zespołu nagłej śmierci niemowląt - SIDS oraz nagłego wystąpienia nadmiernej gorączki lub ochłodzenia organizmu. System umożliwia także wykrycie zaburzeń oddechowych wywołanych astmą. Zintegrowanie pomiaru temperatury wraz z monitorem oddechu pozwala na kompleksowy monitoring stanu zdrowia niemowląt i małych dzieci. Pomiar rytmu oddechowego opiera się na zmianach rezystancji dzianinowego pasa wykonanego z nici elektroprzewodzącej, wkomponowanego w bieliznę dziecięcą. System monitorujący parametry życiowe małych dzieci obejmuje wygodną bieliznę inteligentną codziennego użytku, układ sterujący, stację bazową z modułem komunikacyjnym oraz aplikację dla urządzeń mobilnych (rysunek 25).

Prowadzone prace zaowocowały uzyskaniem prawa wyłącznego nr RWU.070280 na wzór użytkowy „Bielizna tekstroniczna do spania dla niemowląt” oraz złotego medalu na Międzynarodowej Wystawie Technologii i Innowacji IPITEX 2017 [III.3.a]. Rezultaty projektu zostały wdrożone w działalności firmy WOMAR Wojciech Krawczyk z Częstochowy, poprzez udzielenie licencji [III.4.a].



Rys. 25. Uproszczony schemat pracy systemu BabyTex

Kolejne prace badawcze autora wniosku w obszarze systemów tekstronicznych doprowadziły do opracowania i wdrożenia w działalności firmy Fabryka Odzieży Garment dwóch projektów [III.2.d]: „Opracowanie detektorowej odzieży roboczej z funkcją bezdotykowego wykrywania napięcia i wysokiej temperatury”, „Opracowanie technologii RFID do automatycznej identyfikacji obiektów z użyciem nici elektroprzewodzących”.

Najnowszym rozwiązaniem tekstronicznym, nad którym wraz zespołem pracował habilitant był projekt pt. „Opracowanie i wdrożenie innowacyjnej dzianiny dystansowej ze zintegrowanym systemem do redukcji mikrobiologicznej”. W tym przypadku autor kierował

zespołem 5 osobowym. Proponowany system zbudowano w oparciu o dzianinę dystansową ze zintegrowanym układem do sterylizacji wykorzystującym promieniowanie UV-C. W materiale stanowiącym pokrycie np. materaca pozwoliło to na znaczne zmniejszenie liczby drobnoustrojów w bezpośrednim otoczeniu użytkownika. Wyniki badań wstępnych oraz koncepcja zostały zaprezentowane w [M.5], [M.6] [A.1]. Projekt uzyskał aprobatę i finansowanie PARPu i był realizowany w okresie 01.2019 – 06.2020 r., jako badawcza praca zlecona, dla firmy PPHU TRANS-TEX S.C [III.2.b].

## Zestawienie dorobku

### Sumaryczne wskaźniki naukometryczne autora wniosku

Nazwa wskaźnika	Wartość
Sumaryczny Impact Factor (IF) według listy JCR po doktoracie	16,325
Indeks Hirscha według bazy Scopus	6
Liczba publikacji indeksowanych przez bazę Scopus	37
Liczba cytowań publikacji według bazy Scopus (bez autocytowań)	121(57)
Indeks Hirscha według bazy Web of Science	5
Liczba publikacji indeksowanych przez bazę Web of Science	26
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (bez autocytowań)	62(31)
Sumaryczna liczba pkt. z list MNiSW po doktoracie (z podziałem na współautorów)	940(459,43)

### Zestawienie osiągnięć naukowych oraz innych aktywności autora wniosku

Nazwa osiągnięcia	Wartość
Monografia	1
Rozdziały w monografii naukowej	8
Artykuły w czasopiśmie naukowym (pierwszy autor i samodzielne)	41(19)
Wystąpienia podczas międzynarodowych lub krajowych konferencji naukowych	10
Udział w projektach B+R, NCBR, NCN, PARP i stypendia (po doktoracie)	5(4)
Udział w konferencjach naukowych	międzynarodowe/krajowe 13/6
Udział w komitetach organizacyjnych konferencji	międzynarodowe/krajowe 3/1
Staż naukowy w zagranicznej instytucji naukowej	1
Udział w programie Erasmus + Staff Mobility for Teaching	3
Członkostwo w towarzystwach naukowym	2
Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	2
Zgłoszenie patentowe	3
Liczba wdrożeń i prac wykonanych dla przedsiębiorstw	8
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	128
Recenzowanie prac naukowych dla czasopism lub konferencji międzynarodowych	26
Promotorstwo prac magisterskich i inżynierskich	21
Promotorstwo pomocnicze w obronionym przewodzie doktorskim	1
Otrzymane nagrody w tym nagrody Rektora PCz za działalność naukową lub organizacyjną	indywidualne/ zespołowe 1/8