

kompozyty magnetycznie miękkie, kompozyty magnetycznie twarde, dielektromagnetyki, spieki, magnetowody zintegrowane, właściwości magnetyczne

Tomasz JANTA*

ELEMENTY KOMPOZYTOWE ZINTEGROWANE

Elementy przetworników elektrycznych wykonane z kompozytów proszkowych mogą spełniać różne funkcje. Często są to jednoskładnikowe elementy magnetycznie miękkie stanowiące magnetowód kompozytowy zastępujący magnetowód wykonany uprzednio z blach elektrotechnicznych lub odlewów. Taka funkcja znajduje coraz szersze znaczenie ze względu na istotne zalety technologii kompozytów proszkowych. Istotą ich stosowania są zarówno niskie koszty wytwarzania związane np. z bezodpadowością produkcji, jak i względy ekologiczne.

Technologia kompozytowa umożliwia również wykonywanie magnetowodów o skomplikowanych kształtach, niemożliwych lub bardzo trudnych do wykonania w formie magnetowodu blachowego. Przykładem mogą być magnetowody silników liniowych czy też silników indukcyjnych małej mocy. Przy rozpatrywaniu zastosowań dielektromagnetyków istotna jest założona przestrzenna izotropia magnetyczna takich magnetowodów.

Możliwe jest wykonywanie elementów spełniających w elektroprzetwornikach jednocześnie różne funkcje, np. mechaniczną, magnetyczną i elektryczną. Element taki, wyprasowany np. bezpośrednio na wale, może stanowić kompletny wirnik: zastępować jego magnetowód oraz uzwojenie. Stanowi on element zintegrowany.

1. WSTĘP

Elementy przetworników elektrycznych wykonane z kompozytów proszkowych mogą spełniać różne funkcje. Najczęściej są to jednorodne elementy magnetycznie miękkie stanowiące magnetowód kompozytowy zastępujący magnetowód wykonany uprzednio z blach elektrotechnicznych [1]. Taka funkcja znajduje coraz szersze znaczenie ze względu na istotne zalety technologii kompozytów proszkowych. Ponadto w niektórych rozwiązaniach technicznych, ze względu na kształt lub kierunek przepływu strumienia

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: tomasz.janta@pwr.wroc.pl

magnetycznego optymalne wykonanie magnetowodu blachowego okazuje się bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

Technologia kompozytowa umożliwia wykonanie magnetowodów o praktycznie dowolnych kształtach izotropowych dla przestrzennego strumienia magnetycznego. Przykładem są magnetowody tubowych silników liniowych, wirników i stojanów silników indukcyjnych małej mocy czy mikromaszyn prądu stałego [1, 2].

W przypadku magnetowodów mikromaszyn czy maszyn małej mocy wykonanie magnetowodu blachowego może być obecnie po prostu ekonomicznie nieuzasadnione. Zaletą stosowania kompozytów proszkowych są bowiem niskie koszty wytwarzania związane m.in. z bezodpadowością produkcji, jak i coraz to bardziej doceniane względy ekologiczne. Magnetowody kompozytowe, zwłaszcza te z dielektromagnetyków, pozwalają na łatwe odzyskiwanie i separację miedzi uzwojenia przez mechaniczne rozkruszanie uszkodzonego uzwojonego magnetowodu. Zwiększa to zarówno ochronę środowiska jak i obniża globalne zużycie miedzi. Również materiał magnetowodu kompozytowego najczęściej nadaje się do recyklingu.

Niskie koszty wytwarzania magnetowodów związane są również z tym, że producenci proszków magnetycznie miękkich wprowadzili do swojej oferty przygotowane mieszanki proszku żelaza, izolatora i spoiwa oraz środka poślizgowego w różnych proporcjach, zoptymalizowanych w zależności od rodzaju wykonywanego kompozytu. Mieszanki te stanowią kompletną zasypkę do form, które każdorazowo przed prasowaniem wystarczy jedynie pokryć środkiem poślizgowym. Takie rozwiązanie jest nie tylko proste, ale pozwala na zmniejszenie powierzchni magazynowej i warsztatowej oraz na pełną automatyzację procesów technologicznych istotnie redukując w ten sposób koszty wytwarzania. Dotyczy to obu głównych rodzajów magnetycznie miękkich kompozytów proszkowych a więc spieków i dielektromagnetyków. W zależności od zastosowanej technologii można bowiem otrzymywać różne, z punktu widzenia właściwości magnetycznych i mechanicznych, rodzaje kompozytów proszkowych.

Magnetycznie miękkie kompozyty proszkowe dzielą się na dwie zasadnicze grupy:

- spieki, tj. kompozyty proszkowe obrabiane w wysokich temperaturach, rzędu 1200 °C, oraz
- dielektromagnetyki, tj. kompozyty utwardzane w temperaturach 180 °C do 500 °C.

Dielektromagnetyki, w porównaniu do spieków, to kompozyty charakteryzujące się korzystniejszą, mniejszą stratnością, zwłaszcza z prądów wirowych. Ich technologia jest prosta a dodatkowo praktycznie nie występują skurcze technologiczne wypraski mogące mieć miejsce w przypadku spieków. Pozwala to na uniknięcie konieczności przeprowadzania dodatkowej obróbki mechanicznej. Te cechy powodują, że właśnie dielektromagnetyki cieszą się szczególnym zainteresowaniem badaczy upatrujących o wiele większe i łatwiejsze pole ich zastosowania.

Spieki natomiast cechuje wyższa indukcja nasycenia, wyższa przenikalność magnetyczna oraz, co czasami może mieć decydujące znaczenie, dużo większa wytrzymałość mechaniczna. Stratność tych materiałów jest jednak o rząd wyższa niż dielektromagne-

tyków, w których cząsteczki żelaza izolowane są zastosowanym dielektrykiem, którym często jest żywica epoksydowa.

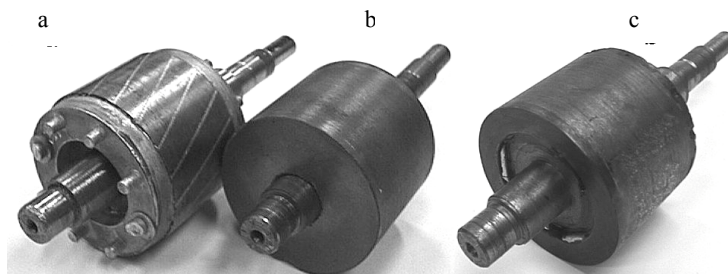
2. MAGNETOWODY ZINTEGROWANE

Obok magnetowodów kompozytowych wykonywanych jako jednorodne można w stosunkowo łatwy sposób wykonać obwody magnetyczne niejednorodne o zróżnicowanych właściwościach. Do elementów magnetycznie miękkich stanowiących bazę magnetowodu elektropretwornika można „dodać” np. elementy o zwiększonej przewodności elektrycznej [3], elementy magnetycznie twarde [4] czy też termoelementy [5]. Oczywiście wykonanie takich magnetowodów, określanymi zintegrowanymi, nie jest już takie proste technologicznie, ale może być bardzo opłacalne ekonomicznie.

Magnetowody zintegrowane to nierozłączne połączenie dwóch lub więcej elementów składowych o różnych właściwościach, np. mechanicznych, magnetycznych, elektrycznych czy też cieplnych. Nierozłączność magnetowodu, wynikająca z braku elementu łączącego, bywa kłopotliwa w przypadku uszkodzenia. Naprawa wymaga bowiem wymiany co najmniej całego elementu zintegrowanego a nie jedynie uszkodzonej części składowej.

Najprostszym przykładem elementu zintegrowanego jest magnetowód kompozytowy wirnika wyprasowany bezpośrednio na wale. Wówczas kompletny wirnik to uzwojony zintegrowany element (wał plus uzwojony magnetowód). Oczywiście przy takim rozwiązaniu wał silnika (a praktycznie najczęściej mikrosilnika) musi być zmodyfikowany tak, aby wirnik był osadzony w sposób pewny. Stąd pojawić się na nim powinny odpowiednie wgłębienia jednostronne lub dwustronne, które wypełni proszek magnetowodu. Wał może być też np. radełkowany.

Elementem zintegrowanym jest również wirnik silnika asynchronicznego małej mocy o przewodzącej warstwie zewnętrznej [6–8]. Infiltrowana miedzią warstwa zewnętrzna magnetowodu wirnika (rys. 1b, 1c) wykonana w jednym procesie technolo-



Rys. 1. Wirniki: a – silnika klatkowego, oraz wykonane technologią: b – dielektromagnetyku, c – spieku
 Fig. 1. Rotors: a – of the squirrel-cage motor, and made of technology: b – dielectromagnetic, c – sinters

gicznym z magnetycznie miękkim rdzeniem zastępuje, w założeniu, uzwojenie wirnika. Silniki z takimi wirnikami charakteryzują się, między innymi, zwiększonym momentem i prądem rozruchowym. Oczywistym jest, że charakterystyki takich silników zależą zarówno od grubości jak i przewodności zewnętrznej warstwy infiltrowanej. Magnetyczno-infiltrowane magnetowody dotyczyć mogą zarówno spieków, w których w procesie spiekania przewodzący infiltrat przechodzi najczęściej w fazę ciekłą, jak i dielektromagnetyków. W tym przypadku stosować należy przewodzące infiltraty o niskich temperaturach topnienia tak, aby w procesie utwardzania dielektromagnetyku (bardzo często 180 °C), a w zasadzie elementu zintegrowanego, infiltrat tworzył przestrzenną siatkę przewodzącą i powodował pożądaný istotny wzrost przewodności elektrycznej.

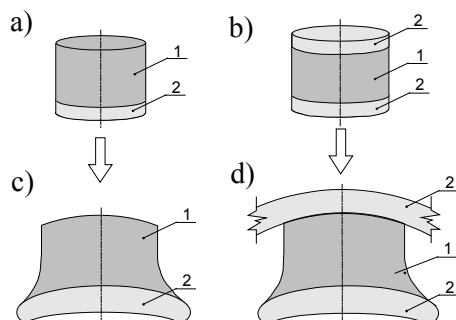
Jeżeli taki magnetowód wyprasujemy bezpośrednio na odpowiednio przygotowanym wale, co jest technologicznie całkiem proste, otrzymamy trójskładnikowy element zintegrowany stanowiący kompletny wirnik.

Zintegrowany wirnik kompozytowy może być wykonany bez pierścieni zwierających lub łącznie z pierścieniami. Nowum jest tutaj możliwość wprowadzenia dodatkowych pierścieni zwierających, ponieważ oprócz standartowo stosowanych skrajnych pierścieni można wprowadzić na długości magnetowodu wirnika dowolną ilość pierścieni wewnętrznych. Pozwala to wykonywać wirniki o wielu szeregowych kłatkach bez większych nakładów finansowych.

Zintegrowany wirnik kompozytowy ma jeszcze jedną bardzo istotną zaletę. Jest gładki i bezżłobkowy. Dzięki temu nadaje się do silników o zmiennej liczbie par biegunów (tzw. wielobiegunowych). W silnikach takich, w celu niedopuszczenia do powstawania niekorzystnych harmoniczných żłobkowych zakłócających pracę silnika, wymagane jest prawidłowe dobranie stosunku liczby żłobków stojana i wirnika dla każdej zastosowanej liczby par biegunów (prędkości obrotowej). W silnikach z wirnikami klatkowymi lub zwojonymi (pierścieniowymi) często jest to bardzo trudne czy wręcz niemożliwe do zrealizowania. Prawie każde rozwiązanie praktyczne jest kompromisem między wymaganiami a możliwościami. Zastosowanie zaprezentowanego wirnika zintegrowanego likwiduje ten problem ponieważ wirniki gładkie nie wywołują harmoniczných.

Dużą zaletę w postaci stałości prędkości obrotowej zależnej jedynie od częstotliwości zasilania oraz liczby par biegunów mają silniki synchroniczne. Coraz częściej w praktycznych rozwiązaniach tych silników, zwłaszcza małej mocy, stosuje się wirniki z wzbudzeniem magnetoelektrycznym. Tak więc wirnik zamiast uzwojenia ma na swojej powierzchni zamontowane magnesy trwałe. Dzięki takiemu rozwiązaniu nie tylko rezygnuje się z kłopotliwego zasilania uzwojenia wzbudzenia ale zmniejsza się także, i to w sposób istotny, moment bezwładności takiego wirnika przy stosunkowo dużym momencie obrotowym. Magnesy wirnika mogą być wykonane ze specjalnych stopów lub też stosunkowo tanich dielektromagnesów, np. mieszanek proszków Ne-Fe-B i ferrytu. Także w tym przypadku wirniki mogą być wykonane w technologii kompozytów proszkowych jako wirniki zintegrowane. Wówczas wirnik wykonywany jest w jednym

procesie technologicznym i po obróbce mechanicznej (prasowanie), cieplnej (utwardzanie, scalanie) wymaga końcowej obróbki magnetycznej (magnesowania). Wzbudzenie magnetoelektryczne może znajdować się również na stojanie maszyn elektrycznych stanowiąc zintegrowane bieguny główne. Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie zintegrowane elementy kompozytowe dwu i trój składnikowe w połączeniu kompozyt magnetycznie miękki – kompozyt magnetycznie twardy oraz ich odpowiedniki w rzeczywistej maszynie elektrycznej prądu stałego.



Rys. 2. Zintegrowane próbki: a – dwuelementowa, b – trójelementowa; rzeczywiste odpowiedniki próbek w magnetowodzie stojana maszyny prądu stałego: c – biegun główny z nabiegunkiem, d – biegun główny z nabiegunkiem i częścią jarzma;
1 – element magnetycznie twardy, 2 – element magnetycznie miękki

Fig. 2. Integrated samples: a – composed of 2 elements, b – composed of 3 elements;
real equivalents of samples – cores of dc machine stator: c – pole with pole shoes;
d – pole with pole shoes and part of yoke; 1 – hard magnetic element, 2 – soft magnetic element



Rys. 3. Typowe uszkodzenia próbek wykonanych z proszku magnetycznie twardego H:
a – bez dodatku dielektryku – podczas wyjmowania z formy,
b, c – z 2% dodatkiem dielektryku – podczas magnesowania

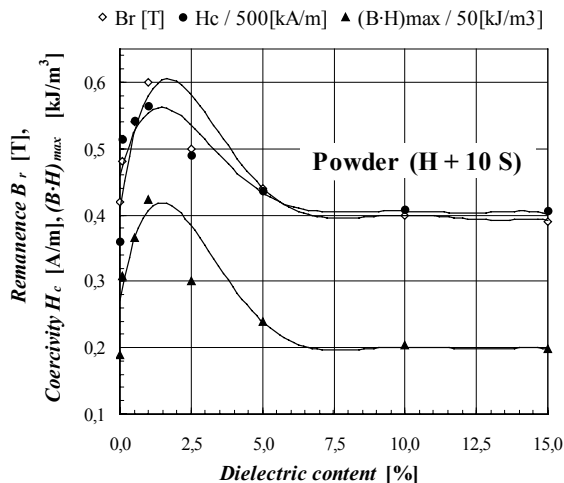
Fig. 3. Typical damages of samples made of hard magnetic powder (H):
a – without dielectric – during extraction of die, b, c – with 2% of dielectric – during magnetizing

Aby zobrazować problemy technologiczne występujące w fazie początkowej badań na rysunku 3 przedstawiono wyniki pierwszych prób wykonania kompozytów trójelementowych. Cylindryczne próbki o średnicy 10 mm i wysokości również 10 mm prasowano ciśnieniem 800 MPa a temperatura obróbki cieplnej wynosiła

180 °C przez 1 godzinę. Dielektrykiem, czyli środkiem scalająco izolującym, była żywica epoksydowa. Elementy magnetycznie miękkie wykonano z rozpylanego, magnetycznie miękkiego, proszku żelaza o wielkości cząstek od 71 do 250 μm . Elementy magnetycznie twarde wykonano z o wiele drobniejszego izotropowego proszku Nd-Fe-B. Wszelkie mieszanki proszków do wykonania próbek mieszano w mieszalniku typu V przez 0,5 godziny.

Próbki wykonane z proszku magnetycznie twardego, zarówno bez jak i z dodatkiem dielektryku, wykazywały małą spoiłość i podczas wyjmowania z formy wiele próbek się rozwarstwiało (rys. 3a). Dodatek dielektryku zwiększał wprawdzie wytrzymałość wykonanych wyprasek, co umożliwiało wyjęcie ich z formy, jednak spoiłość ich była niewystarczająca i wiele z nich uszkadzało się podczas magnesowania (rys. 3b, 3c).

Aby zapobiec tym niekorzystnym zjawiskom, do trudno prasowalnego proszku magnetycznie twardego dodano bardzo dobrze prasowalny proszek magnetycznie miękkki. Doświadczalnie stwierdzono, że dodatek ten istotnie poprawia spoiłość wykonywanych dielektromagnesów. Im większy jest dodatek magnetycznie miękkiego proszku żelaza, tym lepsza jest spoiłość wykonywanych próbek. Pogarsza to oczywiście ich właściwości magnetycznie twarde. Określono, że dodatek 10% magnetycznie miękkiego proszku poprawia wytrzymałość mechaniczną wykonanych próbek na tyle, że ich parametry mechaniczne i magnetyczne są akceptowalne.



Rys. 4. Zależność wybranych parametrów kompozytów magnetycznie twardech wykonanych z proszku magnetycznie twardego (H) z 10% dodatkiem proszku magnetycznie miękkiego (S) w zależności od dodatku dielektryku; ciśnienie prasowania 800 MPa

Fig. 4. Influence of dielectric content on chosen parameters of hard magnetic composites made of hard magnetic powder (H) with 10% addition of soft magnetic powder (S)

5. PODSUMOWANIE

Wprowadzenie do produkcji magnetowodów kompozytowych, w tym w szczególności kompozytów zintegrowanych, jest możliwe i powinno przynieść wymierne skutki finansowe i ekologiczne. Wymaga to jednak jeszcze dalszych badań. Proste zastępowanie konwencjonalnych obwodów blachowanych obwodami kompozytowymi nie zawsze jest możliwe i celowe. Stąd konieczność poszukiwań rozwiązań konstrukcyjnych w których korzystne, przestrzenne, cechy kompozytów proszkowych znalazły by swoje zastosowanie.

Przykładowo, optymalne wykonanie magnetowodu magnetyczno-przewodzącego wirnika powinno doprowadzić nie tylko do przejścia przez przewodzącą siatkę przestrzenną funkcji elektrycznej klatki aluminiowej silnika klasycznego, ale również powinno umożliwić zlikwidowanie pierścieni zewnętrznych. Pozwoliłoby to na skrócenie magnetowodu wirnika a więc w konsekwencji na zmniejszenie wymiarów silnika lub zwiększenie jego mocy z tej samej objętości (długości).

Badając właściwości rozruchowe silników indukcyjnych mocy ułamkowej z wirnikami kompozytowymi stwierdzono, że zarówno ich statyczne jak i dynamiczne parametry rozruchowe są lepsze niż silników klatkowych. Parametry eksploatacyjne tych silników są niestety znacznie gorsze. Oznacza to, że konieczne są dalsze działania z zakresu inżynierii materiałowej i technologii dielektromagnetyków prowadzące do zwiększenia przewodności elektrycznej i przenikalności magnetycznej kompozytów przy zachowaniu możliwe niskiego poziomu stratności.

Badania potwierdziły technologiczną możliwość wykonania magnetowodów zintegrowanych zawierających elementy magnetycznie twarde i magnetycznie miękkie o zróżnicowanej konfiguracji objętościowej.

Wykonanie dielektromagnesów, jako próbek jednorodnych i elementów próbek zintegrowanych ułatwione zostało przez 10% dodatek proszku magnetycznie miękkiego. Proszek ten umożliwił wciskanie twardych cząsteczek proszku magnetycznie i mechanicznie twardego zwiększając wytrzymałość mechaniczną i likwidując ewentualne pory pomiędzy cząsteczkami proszku magnetycznie twardego. Wskazuje na to trend zmiany gęstości dielektromagnesów, na którą również ma wpływ zawartość dielektryku jako wypełniacza porów. Dodatek ten praktycznie nie wpływa na wartość B_r , zmniejsza jednak istotnie wartość H_c , a tym samym i $(B \cdot H)_{\max}$ próbek magnetycznie twardych.

LITERATURA

- [1] JANTA T., *Possibilities of Replacement Sheeted Rotor by Composite One in DC Micromotors* (in polish *Możliwości zastąpienia blachowego wirnika mikrosilnika prądu stałego wirnikiem kompozytowym*). Międzynarodowe XI Sympozjum Mikromaszyny i Serwonapędy – International XI Symposium on Micromachines and Servodrives, MiS '98, Malbork, Polska, 1998, s. 186–191.

- [2] JANTA T., HOŁOWNIA J., *Powder Composites in Tube Linear Motors* (in polish – *Kompozyty proszkowe w cylindrycznych indukcyjnych silnikach liniowych*), VI Sympozjum Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki, Gliwice–Ustroń, 1995, s. 177–182.
- [3] JANTA T., WĘGLIŃSKI B., *Properties of Magnetic – Conductive PM Composites*, Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, Granada, Spain, 1998, Vol. 5, pp. 550–555.
- [4] JANTA T., WĘGLIŃSKI B., *Integrated P/M Magnetic Cores*, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 22, Electromagnetic Fields in Electrical Engineering ISEF '01, Ed. by A. Krawczyk and S. Wiak, IOS Press, Ohmsha, ISSN 1383-7281, 2002, Netherlands, pp. 430–433.
- [5] JANTA T., *Termomagnetyki wykonywane drogą metalurgii proszków. Badania wstępne*. III Seminarium „Kompozyty '98 – teoria i praktyka”, Warszawa, 1998, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1998, s. 76–84.
- [6] JANTA T., *Influence of Infiltrated Layer of Powder Rotor Thickness on Asynchronous Motor Characteristics* (in polish – *Wpływ grubości warstwy infiltrowanej wirnika kompozytowego na właściwości ruchowe silnika asynchronicznego*). XXXVI International Symposium on Electrical Machines SME'2000, Szklarska Poręba, Prace Naukowe Instytutu Maszyn i Napędów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 48, Seria: Studia i Materiały nr 20, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2000, s. 198–205.
- [7] JANTA T., *Influence of Rotor Infiltrated Layer Conductivity on Asynchronous Motor Performance* (in polish – *Wpływ przewodności warstwy infiltrowanej wirnika na właściwości ruchowe silnika asynchronicznego*). International XII Symposium on Micromachines and Servodrives, MIS '2000, Kamień Śląski, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 2000, Tom I, Vol. I, s. 184–192.
- [8] ANTAL L., JANTA T., *Parametry rozruchowe silnika asynchronicznego z kompozytowymi wirnikami infiltrowanymi*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 56, Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych, Seria: Studia i Materiały nr 24, ISSN 1733-0718, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004, s. 131–148.

INTEGRATED COMPOSITE ELEMENTS

Electric converter elements made from powder composites are able to fulfil various functions. They are often made as a single soft magnetic element forming magnetic core and simultaneously substituting it for convectional electrical sheeted core or solid core.

The goals of use of powder magnetic composites are both low cost of production and ecological reasons.

Composite technology enables to produce complicated shape magnetic cores. Typical examples are magnetic cores of line motors or extremely small induction motors.

Using integrated composite elements enables to make elements which fulfil simultaneously various complex functions for example mechanical, magnetic and electric functions. Integrated composite elements can forming the whole motor rotor substituting it for the rotor magnetic core and winding.