

Koncepcja Wykorzystania Surowców Pochodzących z Recyklingu do Produkcji Kompozytowych Materiałów Miękkich Magnetycznie

Streszczenie. Przedmiotem pracy są badania kompozytów metalowo-polimerowych wytwarzanych ze sproszkowanych materiałów pochodzących z recyklingu. Kwestie te mają na celu rozwiązanie problemu utylizacji odpadów poprodukcyjnych dostępnych w postaci pyłów metalowych, proszków i wiórów oraz odpadów z polimerów termoplastycznych. Przeprowadzone badania wstępne wskazują na możliwość wykorzystania metody do wytwarzania kompozytu metal / polimer do budowy rdzeni SMC.

Abstract. The subject of the work is research on metal-polymer composites produced of powdered recycled materials. These issues are aimed at addressing the main problem of utilization of postproduction waste materials available as metallic dusts, powders and shavings and waste materials from thermoplastic polymers. The preliminary studies carried out indicate the possibility of using the method of producing a metal / polymer composite for the construction of SMC cores. (**Concept of Using Recycled Raw Materials for the Production of Composite Soft Magnetic Materials**).

Słowa kluczowe: materiały magnetyczne, kompozyty elektrotechniczne, proszki metali, odpady metalowe
Keywords: magnetic materials, Softmagnetic Composite Materials, metal powder, metal waste

Wstęp

Współczesny przemysł poszukuje nowych materiałów funkcjonalnych o lepszych właściwościach użytkowych od aktualnie stosowanych. Równocześnie przy rozwijaniu nowych technologii ważne jest zmniejszenie obciążenia dla środowiska naturalnego. Rozwiązaniem, które pozwoli na realizację tego celu, jest stworzenie komponentów, wykorzystujących produkty odpadowe.

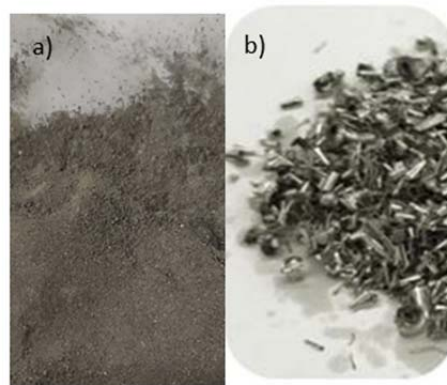
W ostatnich latach światowa produkcja tworzyw polimerowych przekroczyła 360 mln ton rocznie. Znaczna część przedmiotów po zakończeniu użytkowania zostaje składowana na wysypiskach [1-3]. W celu wydłużenia okresu eksploatacji oraz zwiększenia możliwości zagospodarowania odpadów, nieustannie prowadzone są prace mające na celu poprawę właściwości tworzyw poprzez ich modyfikację [4,5]. Wyróżnić można trzy typy modyfikacji polimerów: chemiczną, fizyczną oraz fizykochemiczną. Modyfikacja chemiczna prowadzona jest na etapie polimeryzacji, poprzez ingerencję w skład makrocząsteczki tworzywa. Modyfikacja fizyczna polega na dodaniu do tworzywa napełniacza w postaci: proszku, włókien, wiór itp. W takim przypadku tworzywo polimerowe stanowi osnowę, natomiast materiał dodatkowy jest napełniaczem. W przypadku modyfikacji fizycznej najczęściej występuje wyraźna granica pomiędzy osnową, a napełniaczem. Funkcją osnowy jest zachowanie spójności struktury kompozytu, odwzorowanie żądanego kształtu i wymiarów detalu oraz przenoszenie obciążeń na fazę zbrojącą. Zadaniem napełniacza jest najczęściej zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej materiału. Zaletami modyfikacji fizycznej są m.in.: brak konieczności użycia skomplikowanej aparatury, prostota wytworzenia jednorodnego materiału oraz szybkość wprowadzenia wyników prac badawczych. Modyfikacja fizykochemiczna stanowi kombinację metody chemicznej oraz fizycznej [6-8].

Koncepcja, przedstawiona w poniższej pracy, zakłada zagospodarowanie wysokojakościowych, poprodukcyjnych materiałów odpadowych dostępnych w postaci metalowych pyłów, proszków i wiórów oraz wszelkiego rodzaju odpadów polimerów termoplastycznych i termoutwardzalnych do wytworzenia kompozytowych materiałów miękkich

magnetycznie. Tego typu kompozyty mogą znaleźć zastosowanie jako transformatory wysokiej częstotliwości, dławiki, filtry oraz przekładki formujące strumień magnetyczny w rdzeniach wieloszczelinowych [9].

Wykorzystanie surowców pochodzących z recyklingu

Materiały objęte zainteresowaniem powstają między innymi przy produkcji transformatorów (blachy prądnicowe i transformatorowe, taśmy amorficzne i nanokrystaliczne), produkcji i obróbki (wiercenie, frezowanie, szlifowanie) narzędzi i form z wysokojakościowej stali i stopów ferromagnetycznych (rys.1).



Rys. 1. Metalowe odpady poprodukcyjne, a) pyły stalowe, b) wióry stalowe.

Inne materiały, które również znajdują się w obszarze zainteresowania, są to odpady nieekonomiczne – wymagające dodatkowej obróbki lub obecnie nieprzydatne w gospodarce. Oprócz odpadów metalowych do produkcji proponowanych kompozytów zamierza się wykorzystać odpady polimerowe, głównie pozostałości po produkcji dzianin syntetycznych (rys. 2). Są to włókna m.in. polipropylenowe, polietylenowe i poliestrowe.

Zastosowanie tego kompozytów wykonanych z mieszanin metalowo-polimerowych pozwoli na dopasowanie właściwości mechanicznych i elektromagnetycznych, których silnym atutem jest proekologiczny charakter.



Rys. 2. Odpady polimerowe po produkcji dzianin syntetycznych

Miękkie magnetyczne materiały kompozytowe

Zwiększona świadomość w zakresie redukcji emisji gazów cieplarnianych, rosnące obawy o zrównoważony rozwój to tylko niektóre z kluczowych czynników napędzających wzrost rynku magnetycznie miękkich kompozytów (Softmagnetic Composite Materials). SMC obecnie konkurują z laminatami stalowymi, przy podobnym lub nawet niższym koszcie produkcji [10]. Korzyści wynikające z zastąpienia konwencjonalnego laminowanego rdzenia w maszynie elektrycznej za pomocą SMC są znaczące i obejmują obniżone straty przy wysokich częstotliwościach pracy, a modułowa konstrukcja umożliwia łatwe wyjmowanie pojedynczych elementów w celu naprawy lub wymiany [11]. Ze względu na znaczące korzyści ekonomiczne i środowiskowe, materiały SMC mają ogromny potencjał do zastosowania w maszynach elektrycznych, szczególnie tych o skomplikowanych strukturach. Zapotrzebowanie na SMC jest związane z produkcją silników do napędów pojazdów, zastosowania miękkich materiałów magnetycznych obejmują alternatory, transformatory, silniki, elektromagnesy, solenoidy, przełączniki, cewki dławikowe, głośniki i słuchawki itd.

Badania wstępne

Do wstępnych badań pozyskano materiały odpadowe z różnych zakładów przemysłowych. Przykładowymi materiałami wykorzystanymi w badaniach były: zendra w płatkach o średnicy około 5 mm (pochodząca z procesu walcowania blach) i taśma nanokrystaliczna w postaci wstęgi o szerokości 10 mm (pozostała z produkcji rdzeni transformatorowych – rysunek 3).

Tabela. 1. Oszacowany skład chemiczny badanych materiałów:

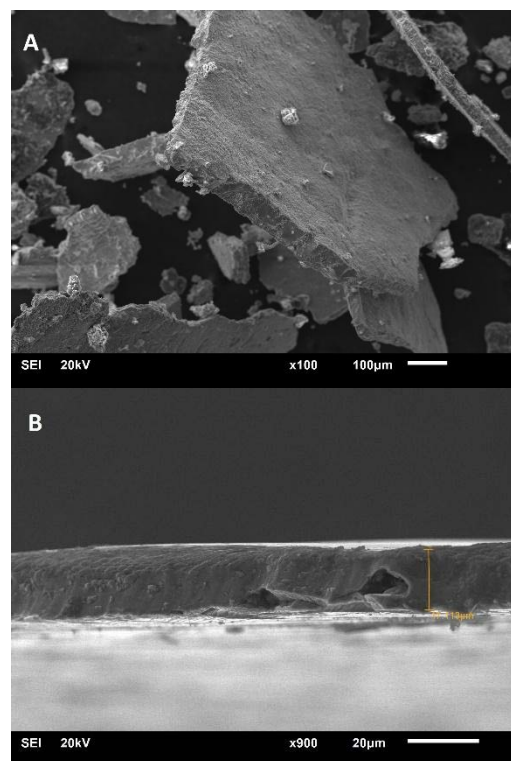
Zendra						
Pierwiastek	Fe	C	O	Al	Si	-
Udział masowy [%]	reszta	<0,5	25,7	0,2	0,1	-
Taśma nanokrystaliczna						
Pierwiastek	Fe	C	O	Co	Cu	Nb
Udział masowy [%]	reszta	<0,3	0,1	7,1	1	5,3

Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcia badanych materiałów wykonane przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) firmy JEOL model JSM-6610LV pracującego w trybie pomiaru elektronów wtórnych. Wykonano także analizy składu chemicznego metodą SEM-EDS (Energy Dispersive Spectrometry) z wykorzystaniem modułu X-MAX 80 firmy Oxford Instruments (tab. 1). Ze względu na możliwy duży błąd wskazań zawartości węgla w mierzonych próbkach wynikającego z ograniczeń metody EDS, w stosunku do małych błędów zawartości

pierwiastków metalicznych, przedstawione w tabeli udziały zostały oszacowane z dokładnością do 0,1 mas. %, a dla węgla podano maksymalny możliwy próg jego zawartości.



Rys. 3. Materiały odpadowe: a) zendra w płatkach o średnicy około 5 mm, b) taśma nanokrystaliczna o szerokości 10 mm



Rys. 4. Zdjęcia SEM ukazujące a) płatki zendry oraz b) przekrój i grubość taśmy nanokrystalicznej.

Materiały poddano wstępnemu rozdrobnieniu. Następnie materiał przetworzono w laboratoryjnym młynku szybkoobrotowym IKA® A11 basic, który mielił materiał na drobne frakcje (rys.5a). Po zmieleniu w młynku dany materiał przesypywano na sitach wibracyjnych przy użyciu wstrząsarki laboratoryjnej Morek MULTISIEW Lpze-2e, aby oddzielić od siebie dane frakcje materiału (rys.5b).

Po przesortowaniu materiału przez sита o różnej gęstości oczek uzyskano materiał o odpowiedniej gradacji ziarna. Do wytworzenia kompozytów jako osnowę wykorzystano tworzywa termoplastyczne oraz termoutwardzalne tj. polimer PVC, żywicę fenylową oraz żywicę fenylo-akrylową. Wykorzystując kalorymetrię skaningową DSC określono charakterystyczne temperatury przetworstwa. W przypadku polimeru PVC temperatura mięknienia wyniosła około 150°C, dla żywic termoutwardzalnych kolejno, dla żywicy fenolowej 130°C, żywicy fenolowo-akrylowej 150°C. Czas sieciowania dla obu żywic wynosił 12 minut.



Rys. 5. a) Laboratoryjny młynek szybkoobrotowy IKA® A11 basic, b) Wstrząsarka laboratoryjna Morek MULTISIEW LpzE-2e

Przed wytworzeniem rdzeni toroidalnych, sporządzono próbki w postaci pastylek o średnicy 30 mm, o grubości 5-7 mm. Przeprowadzono prasowanie na prasie HOLZMANN Werkstattpresse WP 75H (rys.6) próbek o różnym składzie, zarówno bez dodatku polimeru jak i z dodatkiem tworzywa.



Rys. 6. Prasa HOLZMANN Werkstattpresse WP 75H

Próby z użyciem proszków metali w celu uzyskania różnych właściwości fizycznych przeprowadzono dla wybranych sił nacisku, kolejno dla 7,15, 22, 36 oraz 43 ton. Kompozyty w osnowie PVC oraz w osnowie żywic utwardzalnych tj. żywicy fenolowej i żywicy fenolowo-akrylowej poddano jednakowym próbom, tj. dla 7, 15, 22, 36 oraz 43 ton. Dla osnowy PVC w temperaturze mięknięcia ciśnienie prasownicze było zmniejszane do 5 ton. Natomiast dla osnów z żywic utwardzalnych po osiągnięciu temperatury mięknięcia, ciśnienie prasowania nie zostało zmniejszone. W zależności od zawartości żywicy zaobserwowano różne wartości spadku ciśnienia po uplastycznieniu się żywicy.

Pastyłki poddano szeregowi badań, m.in. pomiaru twardości, gęstości, rezystancji w celu określenia warunków technologicznych wytwarzania docelowych próbek o optymalnych właściwościach fizycznych, mechanicznych i elektrycznych otrzymanych kompozytów.

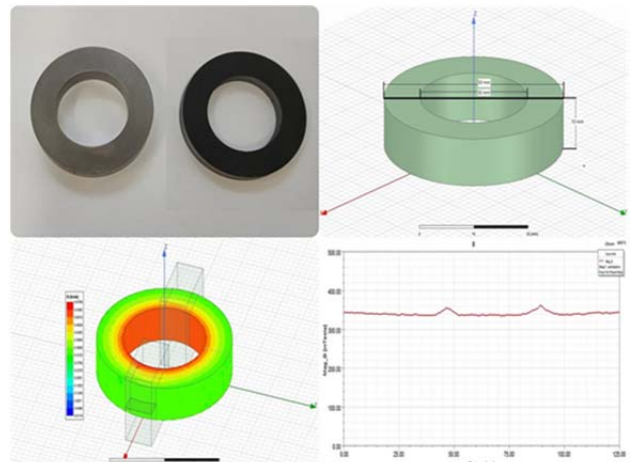
Następnie wykonano rdzenie toroidalne o docelowej geometrii (średnica zewnętrzna 50 mm, wewnętrzna 30 mm

i wysokość 10 mm) przy identycznych temperaturach formowania. Zmieniono siłę nacisku, która dla tego detalu wyniosła 63 ton. W przypadku rdzenia wykonanego z osnowy PVC po osiągnięciu temperatury mięknięcia ciśnienie prasowania zostało zmniejszone do 5 ton.

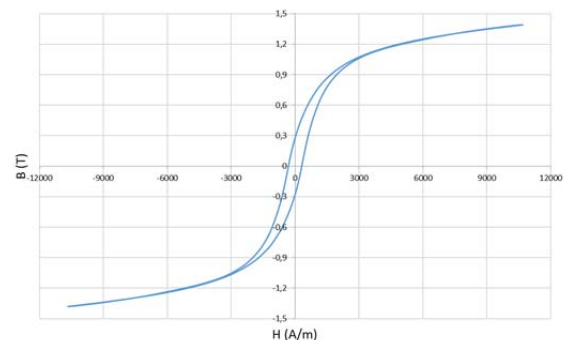


Rys. 7. Powierzchnia przygotowanych próbek materiałów kompozytowych a) zendra 95% + PVC 5%, b) żelazo 2 mm c) żelazo 50-100 µm d) 1% żywicy fenolowo-akrylowej + 99% nanokrystalik 250 µm

Do badań wstępnych wykorzystano proszki ferromagnetyczne o różnej wielkości ziarna (od 50 µm do 2 mm) oraz spoiwo, z których wykonano następujące kompozycje (proporcje wagowe): 95% zendra + 5% PVC, 99% płatków nanokrystalicznych + 1% żywicy fenolowo-akrylowej, 100% Fe płatki 2 mm, 99,5 % Fe (50-100 µm) + 0,5 % PVC (rys.7).



Rys.8. a) Przykładowe rdzenie kompozytowe, b) Geometria modelu w programie Ansys Maxwell, c) Rozkład indukcji w modelu rdzenia, d) Rozkład indukcji na powierzchni rdzenia.



Rys.9. Przykładowa charakterystyka B/H dla kompozytu Fe-PVC zmierzona w warunkach quasi-statycznych (10 Hz).

Na podstawie danych z pomiarów laboratoryjnych, przygotowano modele rdzeni transformatorowych w programie Ansys Maxwell. Przykładowy rdzeń, wraz z modelem przedstawiono na rysunku 8.

Przeprowadzone badania laboratoryjne miały głównie na celu zbadanie wpływu wielkości ziarna metalu, składu jakościowego i ilościowego kompozytów, ciśnienia formowania, czasu formowania na właściwości elektryczne i magnetyczne uzyskanych kompozytów. Przykładowe wyniki wstępnych pomiarów parametrów magnetycznych dla mieszaniny proszku Fe (50-100 μm) + 0,5 % PVC przedstawiono na rysunku 9.

Podsumowanie

Testy laboratoryjne na etapie badań wstępnych pokazały, że technologia kompozytów elektrotechnicznych charakteryzuje się parametrami przewidzianymi przez modele analityczne oraz, że technologia posiada potencjał rozwojowy w kierunku praktycznego zastosowania. Zakłada się, że zastosowanie proszków powstałych ze zmielenia wysokojakościowych blach i taśm elektrotechnicznych pozwoli na uzyskanie parametrów magnetycznych zbliżonych do produktów oferowanych w handlu przy jednoczesnym obniżeniu stratności tych kompozytów do wartości zawierającej się pomiędzy wartościami przyjętymi dla materiału wyjściowego, a obecnie stosowanymi materiałami proszkowymi.

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

Autorzy są wdzięczni prof. dr hab. inż. Romanowi Wyrzykowskiemu za przyznanie dostępu do infrastruktury obliczeniowej zbudowanej w ramach projektów PLATON nr. POIG.02.03.00-00-028/08 - usługa obliczeń kampusowych U3 oraz MAN-HA nr. POIG.02.03.00-00-110/13 - "Realizacja w MAN-ach usług krytycznych o wysokim poziomie niezawodności".

Autorzy: dr inż. Adam Jakubas, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: adam.jakubas@pcz.pl, dr inż. Ewa Łada-Tondyra, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: e.lada-tondyra@el.pcz.czest.pl; Marcin MAKÓWKA, e-mail: marcin.makowka@p.lodz.pl, Mateusz CHYRA, e-mail: mateuszchyra@wp.pl, Radosław JASTRZĘBSKI, mgr inż. Łukasz SUCHECKI Politechnika Częstochowska Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, e-mail: sucheki@itm.pcz.pl

LITERATURA

- [1] Farinha, C. B., de Brito, J., & Veiga, R. Assessment of glass fibre reinforced polymer waste reuse as filler in mortars. *Journal of Cleaner Production*, 210 (2019), 1579-1594.
- [2] Gubanova, E., Kupinets, L., Deforz, H., Koval, V., Gaska, K. Recycling of polymer waste in the context of developing circular economy. *Architecture Civil Engineering Environment*, 12 (2019), No. 4, 99-108.
- [3] Tomaszewska E., Szczepański Z., Macko, M., Tyszczyk K., Wykorzystanie odpadów z tworzyw sztucznych do otrzymywania nanokompozytów, *Inżynieria Ekologiczna*, 46 (2016), 149-153.
- [4] Miśkiewicz, P., Frydrych, I., Makówka, M. Examination of selected thermal properties of basalt composites. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 28 (2020), nr 2, 109-109.
- [5] Jakubas, A., Chyra, M., Gnatowski, A. (2019). The Influence of Reinforcement Fibers on Mechanical and Electrical Properties of the Electrical Engineering Composites. *Acta Physica Polonica A*, 135 (2018), nr 2, 193-195.
- [6] Gnatowski A. Wpływ przetwórstwa na właściwości mechaniczne poliamidu modyfikowanego poliwinylolodionem, *Composites Theory and Practise*, 7 (2007), No. 3, 155-159.
- [7] Ostrowska-Czubenko J., Pieróg M., Gierszewska M., Modyfikacja chitozanu krótki przegląd, *Wiadomości Chemiczne*, 70 (2016) 9-10.
- [8] Müller K., Zollfrank C., Schmid M., Natural Polymers from Biomass Resources as Feedstocks for Thermoplastic Materials, *Macromolecular Materials and Engineering*, 304 (2019), No.5, 1800760
- [9] Jakubas A., Gębara P., Seme S., Gnatowski A., Chwastek K., Magnetic properties of SMC cores produced at low compacting temperature, *Acta Physica Polonica A*, 131 (2017), No.5, 1289-1293.
- [10] Jastrzębski, R., Jakubas, A., Chwastek, K. Relationships between grain size in self-developed soft magnetic composites and the Grucad hysteresis model. *Journal of Electrical Engineering*, 69 (2018), No. 6, 485-488.
- [11] Jakubas, A., Najgebauer, M. Influence of manufacturing parameters on magnetic parameters of soft magnetic composites cores. *Journal of Electrical Engineering*, 69 (2018), No.6, 442-444.