

*dielektromagnesesy, magnesy spiekane,
właściwości magnetyczne, właściwości elektryczne*

Marcin KARBOWIAK*, Bartosz JANKOWSKI*, Dariusz KAPELSKI*,
Marek PRZYBYLSKI*, Patryk MACIEJEWSKI*, Barbara ŚLUSAREK*

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNYCH I ELEKTRYCZNYCH MAGNESÓW TRWAŁYCH PRZEZNACZONYCH NA OBWODY MAGNETYCZNE MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Magnesy trwale stosowane są w urządzeniach powszechnego użytku, zarówno w domu, samochodzie czy pociągu. Występują, między innymi, w silnikach elektrycznych i prądnicach pracujących w różnych warunkach środowiskowych. Magnesy trwale muszą spełniać określone wymagania pod względem takich właściwości fizycznych jak: właściwości magnetyczne, mechaniczne, termiczne i elektryczne. Powinny być również odporne na działanie czynników środowiskowych. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości magnetycznych spiekanych ferrytowych magnesów trwałych, magnesów spiekanych ze stopu Nd-Fe-B i SmCo, oraz magnesów wiązanych powstałych poprzez spojenie proszku magnetycznie twardego substancją spajającą tzw. dielektromagnesów. W przypadku magnesów wiązanych przeprowadzono również badania właściwości elektrycznych. Obecnie magnesy wiązane znajdują coraz częściej zastosowanie w konstrukcjach silników elektrycznych. Ich dobre właściwości fizyczne oraz tańsza technologia produkcji obwodów magnetycznych, umożliwia projektantom urządzeń elektrycznych konstruowanie nowoczesnych energooszczędnych silników elektrycznych. Przy zredukowanych kosztach produkcji możliwe jest zaprojektowanie silnika elektrycznego o lepszych parametrach użytkowych. Do badań wytypowano proszki magnetycznie twarde takich producentów, jak: Magnequench oraz Yuxiang [1–6].

1. MAGNESY TRWAŁE PRZEZNACZONE DO BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH

Celem prowadzonych badań jest stworzenie bazy wiedzy, dotyczącej wiązanych i spiekanych magnesów trwałych, zawierającej informacje o właściwościach fizycznych różnych magnesów trwałych. Znajomość właściwości fizycznych magnesów trwałych jest niezwykle przydatna dla projektantów maszyn elektrycznych [1–6]. Do badań wy-

* Instytut Telei i Radiotechniczny, 03-450 Warszawa, ul. Ratuszowa 11, e-mail: barbara.slusarek@itr.org.pl

typowano: dielektromagneszy z szybko chłodzonej taśmy ze stopu Nd-Fe-B, magnesy spiekane ze stopu Nd-Fe-B i SmCo, oraz spiekane magnesy ferrytowe. Magnesy wiązane zostały wyprodukowane w Instytucie Tele i Radiotechnicznym (ITR). Natomiast spiekane magnesy trwale to dostępne na rynku magnesy komercyjne. W przypadku magnesów wiązanych przeprowadzono również badania dotyczące wpływu technologii produkcji na ich właściwości fizyczne. Badania rozszerzono poprzez wykonanie zestawów próbek z proszku magnetycznie twardego poddanego chemicznej modyfikacji. W przypadku magnesów spiekanych badania przeprowadzono na zakupionych magnesach trwałych o wymiarach odpowiadających wymaganiom stawianym przez odpowiednie normy. Modyfikację proszku magnetycznie twardego przeprowadzono w Instytucie Chemii Przemysłowej (ICHP).

1.1. DIELEKTROMAGNESY Nd-Fe-B

Właściwości fizyczne dielektromagnesów zależą od rodzaju zastosowanego proszku magnetycznego, rodzaju i ilości tworzywa spajającego, oraz parametrów procesu technologicznego. Do badań przygotowano próbki wykonane z materiałów produkowanych przez firmę Magnequench, jak również proszków stanowiących nowość na rynku. Jako przykład popularnie stosowanego materiału na magnesy spajane zaproponowano proszek z szybko chłodzonej taśmy ze stopu Nd-Fe-B typu MQP-B. Przeprowadzono również badania właściwości magnetycznych i elektrycznych dielektromagnesów wykonanych z proszków wytwarzanych przez chińską firmę Yuxiang Magnetic Materials typu: NQP-A, NQP-B, NQP-C, NQP-D, NQP-L. Z zastosowaniem tych proszków wiązane są duże oczekiwania, materiał wg. danych producenta powinien mieć parametry porównywalne z parametrami innych proszków dostępnych na rynku przy niższej cenie. Materiałem spajającym, który był stosowany w badaniach jest Epidian 100 produkowany przez firmę Organika Sarzyna. Korzystając ze zdobytego doświadczenia w dziedzinie produkcji magnesów wiązanych, zespół wytypował parametry procesów wytwarzania próbek przeznaczonych do badań tego typu dielektromagnesów.

1.2. MAGNESY SPIEKANE

Badaniom poddano również dostępne na rynku spiekane magnesy trwale. Spiekane magnesy Nd-Fe-B, ze względu na zawartość neodymu skłonnego do utleniania, powleka się cienkimi warstwami antykorozyjnymi. Najczęściej są to powłoki: Ni, Zn, Ni-Zn lub Ni-Cu-Ni. Obecność powłoki antykorozyjnej uniemożliwia przeprowadzenie badań własności elektrycznych.

Przeprowadzono badania magnetyczne anizotropowych spiekanych magnesów trwałych wykonanych z następujących materiałów: ferryt typu F30, Nd-Fe-B typu N38, SmCo₅ typu S18, Sm₂Co₁₇ typu S30.

1.3. DIELEKTROMAGNESY Z PROSZKU Nd-Fe-B PODDANEGO PROCESOWI SILANIZACJI

Kolejnym etapem badań prowadzonych w ramach prac nad materiałami magnetycznie trwałymi była próba poprawy właściwości fizycznych materiału proszkowego, poprzez poddanie go procesom powlekania warstwą adhezyjną. Warstwa ta nakładana jest w celu poprawy prasowalności proszku i zwiększenia wytrzymałości mechanicznej gotowej wypraski. Materiałem powlekającym był silan, a proces nanoszenia jego warstwy to proces silanizacji. Cienka warstwa silanu na powierzchni ziaren magnetycznie twardego proszku, wzmacnia wytrzymałość połączenia z materiałem spajającym oraz poprawia prasowalność mieszanki. Proces silanizacji proszków magnetycznie twardych przeprowadzono w Instytucie Chemii Przemysłowej (ICHP). Silanizacji poddano proszek magnetycznie twardy typu MQP-B. Zastosowano dwa rodzaje silanów A-1100 i A-187. Po procesie silanizacji ziarna proszku zostały pokryte żywicą silikonową. Przygotowano też ziarna proszków które pokryto żywicą silikonową i epoksydową.

W ramach badań wykonano dielektromagnesy z proszków magnetycznie twardych po procesie silanizacji z naniesioną żywicą silikonową oraz z żywicą silikonową i epoksydową. Próbkę dielektromagnesów wykonano dla następujących parametrów procesu technologicznego: ciśnienie prasowania 900 MPa, temperatura utwardzania 180 °C, czas utwardzania 2 h. Badania wstępne nie przyniosły spodziewanych efektów, w związku z tym przeprowadzono proces silanizacji stosując inne parametry tego procesu.

2. WYKONANIE ZESTAWÓW BADAWCZYCH

Badania właściwości magnetycznych i elektrycznych dielektromagnesów przeprowadzono na próbkach o następujących wymiarach:

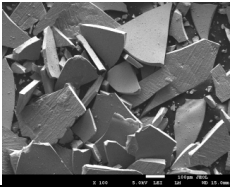
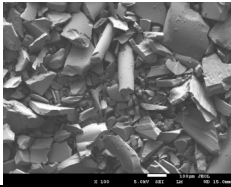
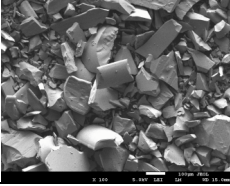
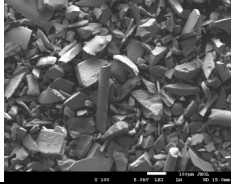
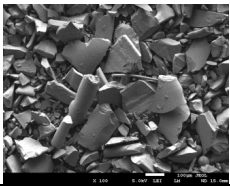
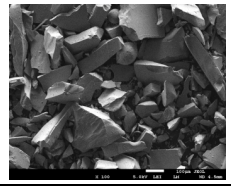
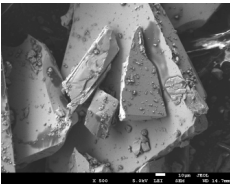
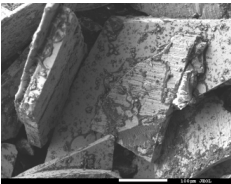
- badania magnetyczne ($\varnothing 10 \times 4$ mm),
- badanie elektryczne ($76 \times 12 \times 6$ mm).

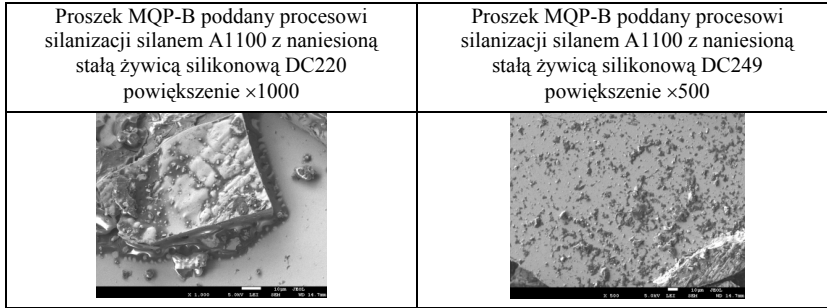
Próbki do badań właściwości magnetycznych i elektrycznych wykonano na prasie włoskiej firmy Matest, o maksymalnej sile prasowania 3000 kN bez obecności pola magnetycznego. Sprasowane wypraski utwardzono w komorze termicznej firmy Instron, która dzięki wymuszonemu obiegowi powietrza zapewnia utrzymanie jednakowych warunków termicznych. Przygotowano próbki do badania wpływu ciśnienia prasowania, temperatury oraz czasu utwardzania na właściwości magnetyczne gotowych dielektromagnesów. Stosowano ciśnienie prasowania: 700, 800, 900 MPa, temperaturę utwardzania w zakresie: 160, 180, 200 °C oraz czas utwardzania: 2, 3, 4 h. Badania właściwości magnetycznych spiekanych magnesów trwałych przeprowadzono na próbkach o wymiarach:

Magnesy spiekane	Ferryt F30	Nd-Fe-B N38	SmCo ₅ S18	Sm ₂ Co ₁₇ S30
badania magnetyczne	$\varnothing 10 \times 5$	$\varnothing 10 \times 5$	$\varnothing 10 \times 4$	$\varnothing 10 \times 4$

3. BADANIA METALOGRAFICZNE

W ramach prowadzonych badań wykonano zdjęcia metalograficzne proszkowych materiałów magnetycznych stosowanych do wykonania dielektromagnesów. Zdjęcia wykonano na elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM). Pozwalają one porównać kształt i wielkość ziaren oraz powierzchnie proszkowych materiałów magnetycznie twardych stosowanych w badaniach. Na rys. 1 przedstawiono zdjęcia metalograficzne proszków wytypowanych do badań. Średnia wielkość ziarna proszku typu MQP-B wynosi ok. 250 μm , natomiast proszki z grupy NQP mają mniejsze ziarna, a ich średnia wielkość wynosi ok. 75–150 μm .

MQP-B powiększenie $\times 100$	NQP-A powiększenie $\times 100$
	
NQP-B powiększenie $\times 100$	NQP-C powiększenie $\times 100$
	
NQP-D powiększenie $\times 100$	NQP-L powiększenie $\times 100$
	
Proszek MQP-B poddany procesowi silanicacji silanem A1100 powiększenie $\times 500$	Proszek MQP-B poddany procesowi silanicacji silanem A1100 z naniesioną stałą żywicą silikonową DC217 powiększenie $\times 250$
	



Rys. 1. Zdjęcia metalograficzne wytypowanych proszków magnetycznie twardych
 Fig. 1. Metallographic pictures for selected hard magnetic powders

Jak pokazują zdjęcia metalograficzne przedstawione na rysunku 1, proszki różnią się wielkością i kształtem ziaren. Proszek z szybko chłodzonej taśmy typu MQP-B ma duże płaskie nieregularne ziarna. Natomiast proszki z grupy NQP mają ziarna mniejsze o różnych kształtach. Część ma kształt płaskich nieregularnych płatków, natomiast część ma kształt walca. Na powierzchni proszku MQP-B poddanego procesowi silanizacji widać obszary pokryte nierównomiernie warstwą silanu.

4. WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNYCH I ELEKTRYCZNYCH DIELEKTROMAGNESÓW Nd-Fe-B

Utwardzone próbki materiałów magnetycznie twardych przeznaczone do badań właściwości magnetycznych namagnesowano w magniesnicy impulsowej. Pomiarów właściwości magnetycznych przeprowadzono na namagnesowanych do nasycenia próbkach dielektromagnesów za pomocą histerezografu włoskiej firmy Laboratorio Elettrofisico typ AMH-20K-HS.

4.1. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNYCH

W ramach prowadzonych prac wykonano pomiary właściwości magnetycznych dielektromagnesów wykonanych z proszków magnetycznie twardych typu NQP firmy Yuxiang. Przeprowadzono również badania właściwości magnetycznych dielektromagnesów wykonanych z proszku MQP-B firmy Magnequench. Parametry procesu technologicznego wpływają na właściwości magnetyczne gotowych dielektromagnesów. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań właściwości magnetycznych próbek z materiału MQP-B wykonanych przy różnych parametrach procesu technologicznego.

Jak pokazują wyniki badań, parametry procesu technologicznego mają istotny wpływ na właściwości magnetyczne gotowych dielektromagnesów. Maksymalną gęstość energii magnetycznej wykazują próbki prasowane ciśnieniem 900 MPa, utwar-

dzane w temperaturze 180 °C w czasie 2 h. Próbkę te zawierały 2,5% wag. żywicy epoksydowej. Wzrost zawartości żywicy powoduje spadek właściwości magnetycznych próbek dielektromagnesów. Badania pokazują, że optymalne parametry magnetyczne wykazują próbki dielektromagnesów wytwarzane przy ciśnieniu prasowania 900 MPa, 180 °C, 2 h. W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań właściwości magnetycznych próbek z materiału NQP-A.

Tabela 1. Wpływ parametrów technologicznych na właściwości magnetyczne dielektromagnesów z proszku MQP-B
Table 1. Influence of technological parameters on the magnetic properties of dielectromagnets from powder MQP-B

MQP-B							
Parametry technologii produkcji			d	B_r	H_{cJ}	H_{cB}	$BH_{(max)}$
			[g/cm ³]	[T]	[kA/m]	[kA/m]	[kJ/m ³]
Zmiana ciśnienia prasowania	180 °C 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st.cynku	900 MPa	5,83	0,671	681,60	423,90	71,83
		800 MPa	5,79	0,646	661,72	404,97	63,96
		700 MPa	5,77	0,648	652,07	405,75	64,83
Zmiana temperatury utwardzania	900 MPa 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st.cynku	200 °C	5,86	0,644	621,50	394,10	61,35
		180 °C	5,83	0,671	681,60	423,90	71,83
		160 °C	5,88	0,639	672,83	407,83	63,95
Zmiana czasu utwardzania	900 Mpa 180 °C 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st.cynku	4 h	5,89	0,670	662,15	408,90	71,42
		3 h	5,87	0,646	649,84	403,69	64,61
		2 h	5,83	0,671	681,60	423,90	71,83
Zmiana zawartości spoiwa	900 MPa 180 °C 2 h 0,2% wag. st.cynku	Epidian 3,5% wag.	5,77	0,637	705,00	423,28	66,94
		Epidian 2,5% wag.	5,83	0,671	681,60	423,90	71,83
		Epidian 1,5% wag.	5,89	0,706	676,48	435,51	75,33

Tabela 2. Wpływ parametrów technologicznych na właściwości magnetyczne dielektromagnesów z proszku NQP-A
Table 2. Influence of technological parameters on the magnetic properties of dielectromagnets from powder NQP-A

NQP-A							
Parametry technologii produkcji			d	B_r	H_{cJ}	H_{cB}	$(BH)_{max}$
			[g/cm ³]	[T]	[kA/m]	[kA/m]	[kJ/m ³]
Zmiana ciśnienia prasowania	180 °C 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st.cynku	900 MPa	5,99	0,603	663,5	379,60	57,29
		800 MPa	5,90	0,580	623,93	354,79	50,32
		700 MPa	5,83	0,563	624,97	348,92	47,94
Zmiana temperatury utwardzania	900 MPa 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st.cynku	200 °C	5,98	0,567	610,20	347,99	48,29
		180 °C	5,99	0,603	663,5	379,60	57,29
		160 °C	5,99	0,568	627,76	352,84	48,99
Zmiana czasu utwardzania	900 Mpa 180 °C 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st.cynku	4 h	5,98	0,582	623,86	354,57	50,44
		3 h	5,98	0,570	622,4	350,91	48,58
		2 h	5,99	0,603	663,5	379,60	57,29
Zmiana zawartości spoiwa	900 MPa 180 °C 2 h 0,2% wag. st.cynku	Epidian 3,5% wag.	5,83	0,557	642,48	351,83	48,48
		Epidian 2,5% wag.	5,99	0,603	663,50	379,60	57,29
		Epidian 1,5% wag.	6,07	0,601	621,49	363,04	52,93

Wyniki badań właściwości magnetycznych dielektromagnesów z proszku NQP-A pokazują, że tak jak w przypadku proszku MQP-B, parametry procesu technologicznego wpływają na właściwości magnetyczne dielektromagnesów z proszku NQP-A. W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań właściwości magnetycznych próbek z materiału NQP-B.

Tabela 3. Wpływ parametrów technologicznych na właściwości magnetyczne dielektromagnesów z proszku NQP-B
Table 3. Influence of technological parameters on the magnetic properties of dielectromagnets from powder NQP-B

NQP-B							
Parametry technologii produkcji			d	B_r	H_{cJ}	H_{cB}	$BH_{(max)}$
			[g/cm ³]	[T]	[kA/m]	[kA/m]	[kJ/m ³]
Zmiana ciśnienia prasowania	180 °C 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	900 MPa	5,95	0,617	686,4	388,2	60,57
		800 MPa	5,92	0,617	691,9	389,8	60,79
		700 MPa	5,87	0,612	699,1	390,1	60,40
Zmiana temperatury utwardzania	900 MPa 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	200 °C	5,97	0,617	673,9	382,2	59,23
		180 °C	5,95	0,617	686,4	388,2	60,57
		160 °C	5,97	0,619	693,7	391,9	61,48
Zmiana czasu utwardzania	900 MPa 180 °C 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	4 h	5,96	0,617	681,4	385,9	60,14
		3 h	5,94	0,615	682,5	385,6	60,18
		2 h	5,95	0,617	686,4	388,2	60,57
Zmiana zawartości spoiwa	900 MPa 180 °C 2 h 0,2% wag. st. cynku	Epidian 3,5% wag.	5,82	0,605	691,9	385,8	59,31
		Epidian 2,5% wag.	5,95	0,617	686,4	388,2	60,57
		Epidian 1,5% wag.	6,07	0,637	730,2	400,0	64,04

Właściwości magnetyczne dielektromagnesów z proszku NQP-B zależą, tak jak w przypadku innych proszków magnetycznych, od parametrów procesu ich wytwarzania. Badania pokazują, że najkorzystniejsze jest wytwarzanie takich dielektromagnesów przy zastosowaniu ciśnienia prasowania 900 MPa czasu utwardzania 2 h i temperatury utwardzania 180 °C. W tabeli 4 przedstawiono wyniki pomiarów właściwości magnetycznych próbek z proszków NQP-C, NQP-D, NQP-L. Na podstawie poprzednich badań, próbki wykonano przy optymalnych parametrach procesu technologicznego.

Jak pokazują wyniki badań przedstawione w tabeli 4, rodzaj zastosowanego proszku wpływa na właściwości gotowych dielektromagnesów.

Przeprowadzono badania właściwości magnetycznych dielektromagnesów wykonanych z proszków poddanych procesowi silanizacji. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 4. Wpływ parametrów technologicznych na właściwości magnetyczne dielektromagnesów z proszku NQP-C, NQP-D, NQP-L
 Table 4. Influence of technological parameters on the magnetic properties of dielectromagnets from powder NQP-C, NQP-D, NQP-L

Parametry technologii produkcji		d [g/cm ³]	B_r [T]	H_{cJ} [kA/m]	H_{cB} [kA/m]	BH_{max} [kJ/m ³]
NQP-C	900 MPa 180 °C 2 h Epidian 2,5% wag.	5,93	0,623	670,8	398,5	62,88
NQP-D		5,94	0,644	654,7	406,5	67,09
NQP-L		5,83	0,789	233,5	193,3	45,47

Tabela 5. Wpływ parametrów technologicznych na właściwości magnetyczne dielektromagnesów z proszku po procesie silanizacji i z naniesionymi żywicami
 Table 5. Influence of technological parameters on the properties of dielectromagnets from magnetic powder after silanization process and coated epoxy and silicon resin

Parametry technologii produkcji			d [g/cm ³]	B_r [T]	H_{cJ} [kA/m]	H_{cB} [kA/m]	$(BH)_{max}$ [kJ/m ³]
Materiał	Zawartość silanu i żywicy [%]	Parametry technologii produkcji					
A-1100 DC217	0,5 1,49	900 MPa 180 °C 2 h	5,91	0,705	767,3	452,7	79,33
A-1100 DC220	0,5 1,49		5,87	0,705	742,0	455,4	80,27
A-1100 DC249	0,5 1,49		5,8	0,698	744,4	453,8	79,44
A-1100 E-100 DC-217	0,5 0,48 1,02		5,79	0,710	738,4	454,2	80,95
A-1100 E-100 DC220	0,49 0,47 1,00		5,73	0,733	628,8	323,3	72,71
A-1100 E-100 DC249	0,5 0,48 1,02		5,77	0,705	732,9	450,1	79,26
A-1100 E-100	0,5 1,5		5,75	0,02	728,5	440,2	76,50

Wyniki badań przedstawione w tabeli 5 pokazują, że dielektromagnesy wykonane z proszku poddanego procesowi silanizacji, a także procesowi powlekania ziaren proszku materiałem spajającym wykazują bardzo dobre właściwości magnetyczne. Wadą wykonanych dielektromagnesów są ich słabe właściwości mechaniczne. Wiele próbek uległo uszkodzeniu w procesie wytwarzania. Powodem może być zbyt mała zawartość środka spajającego.

Wyniki przeprowadzonych badań własności magnetycznych dielektromagnesów wskazują, iż zmieniając parametry procesu technologicznego można kształtować własności magnetyczne dielektromagnesów. Duże ciśnienia prasowania rzędu 900 MPa, pozwala uzyskać wysokie wartości parametrów magnetycznych. Temperatura i czas utwardzania wyprasek zależą głównie od rodzaju tworzywa spajającego. W prowadzonych badaniach

stosowano żywicę epoksydową Epidian 100. Wyniki pomiarów pokazują, że dielektromagnesy spajane tym tworzywem należy utwardzać w temperaturze 180 °C w czasie 2 h. Parametry magnetyczne dielektromagnesów można zwiększyć, kosztem zmniejszenia ilości substancji spajającej w mieszance. Zmniejszenie zawartości żywicy epoksydowej powoduje wzrost właściwości magnetycznych dielektromagnesów, ale prowadzone wcześniej badania pokazują, że dielektromagnesy w których zawartość żywicy epoksydowej jest mniejsza niż 2,5% wag. wykazują słabe właściwości mechaniczne. Przeprowadzone badania pokazały, że dielektromagnesy wykonane z proszku NQP charakteryzują się gorszymi właściwościami magnetycznym w stosunku do dielektromagnetyków wykonanych z proszku MQP-B. Wyniki badań dielektromagnesów z proszku MQP-B poddanego procesowi silanizacji pokazują, że dielektromagnesy te charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami magnetycznymi natomiast mają bardzo słabe właściwości magnetyczne.

4.2. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNYCH DIELEKTORMAGNESÓW Nd-Fe-B

Badania rezystywności przeprowadzono na próbkach w stanie nienamagnesowanym. Pomiar rezystancji utwardzonych wyprasek z proszków magnetycznych Nd-Fe-B wykonano metodą techniczną. Pomiar spadku napięcia dokonywano wzdłuż najdłuższego wymiaru prostopadłego do kierunku prasowania. Rezystywność próbek obliczono na podstawie pomiarów rezystancji zgodnie z normą [7]. W tabeli 6 przedstawiono wyniki pomiarów właściwości elektrycznych próbek z materiału MQP-B, NQP-A, NQP-B wykonanych przy różnych parametrach procesu technologicznego.

Tabela 6. Wpływ parametrów technologicznych na właściwości elektryczne dielektromagnesów z proszku MQP-B, NQP-A, NQP-B

Table 6. Influence of technological parameters on the properties of dielectromagnets from powder MQP-B, NQP-A, NQP-B

Parametry technologii produkcji			MQP-B	NQP-A	NQP-B
			ρ [μΩ*m]		
Zmiana ciśnienia prasowania	180 °C 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	900 MPa	39	49	49
		800 MPa	44	62	62
		700 MPa	50	68	68
Zmiana temperatury utwardzania	900 MPa 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	200 °C	37	53	53
		180 °C	39	49	49
		160 °C	37	55	55
Zmiana czasu utwardzania	900 MPa 180 °C 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	4h	37	47	47
		3h	39	54	54
		2h	39	49	49
Zmiana zawartości spoiwa	900 MPa 180 °C 2 h 0,2% wag. st. cynku	Epidian 3,5% wag.	35	73	73
		Epidian 2,5% wag.	39	53	53
		Epidian 1,5% wag.	30	39	39

Jak pokazują wyniki badań próbek wykonanych z trzech rodzajów proszków przedstawionych w tabeli 6, wzrost ciśnienia prasowania powoduje spadek rezystywności. Zmiana temperatury i czasu utwardzania nie powoduje istotnych zmian rezystywności utwardzonych wyprasek. Wzrost zawartości spoiwa w przypadku proszku NQP-A oraz NQP-B powoduje wzrost wartości rezystywności. W przypadku próbek wykonanych z proszku MQP-B przy zawartości 3,5% wag. żywicy wartość rezystywności zmalała w stosunku do próbek o zawartości żywicy 2,5% wag. Przyczyną tego spadku jest wypłygnięcie nadmiaru żywicy epoksydowej w procesie utwardzania. W tabeli 7 przedstawiono wyniki badań właściwości elektrycznych próbek z materiału NQP-C, NQP-D, NQP-L.

Tabela 7. Wpływ parametrów technologicznych na właściwości elektryczne dielektromagnesów z proszku NQP-C, NQP-D, NQP-L
Table 7. Influence of technological parameters on the properties of dielectromagnets from powder NQP-C, NQP-D, NQP-L

Parametry technologii produkcji	NQP-C	NQP-D	NQP-L
	ρ		
	[$\mu\Omega\cdot\text{m}$]		
900 MPa 180 °C 2 h Epidian 2,5% wag.	50	53	61

Wyniki badań pokazane w tabeli 7 pokazują, że największą rezystywność mają próbki wykonane z proszku NQP-L. Jak pokazują wyniki pomiarów rezystywności wykonanych próbek, wartość rezystywności zależy od: rodzaju proszku magnetycznego, zawartości żywicy epoksydowej oraz od parametrów procesu technologicznego. Im większa jest wartość rezystywności wyprasek tym łatwiej namagnesować dielektromagnes. Zwiększenie rezystywności zmniejsza też straty z prądów wirowych obwodu magnetycznego.

5. WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNYCH MAGNESÓW SPIEKANYCH

W ramach prowadzonych badań przeprowadzono pomiary właściwości magnetycznych spiekanych magnezów komercyjnych. W tabeli 8 przedstawiono wyniki pomiarów właściwości magnetycznych tego typu magnezów spiekanych.

Właściwości magnetyczne magnezów spiekanych z grupy Nd-Fe-B oraz SmCo są lepsze niż właściwości magnetyczne dielektromagnesów z takich samych stopów. Jednak magnez spiekane są droższe. Natomiast właściwości spiekanych magnezów ferrytowych są bardzo małe ale ich zaletą jest niska cena. Rodzaj magnezów trwałych stosowanych w maszynach elektrycznych zależy od ich konstrukcji, stawianych wymagań oraz oczekiwanych parametrów eksploatacyjnych.

Tabela 8. Wyniki pomiarów właściwości magnetycznych magnesów spiekanych
 Table 8. The results of measurements of magnetic properties of sintered magnets

Materiał	d	B_r	H_{cJ}	H_{cB}	BH_{max}
	[g/cm ³]	[T]	[kA/m]	[kA/m]	[kJ/m ³]
Feryt	4,81	0,388	229,2	224,8	28,68
NdFeB	7,43	1,212	976,9	868,2	265,05
SmCo ₅	8,36	0,882	1598,1	584,9	128,37
Sm ₂ Co ₁₇	8,48	1,082	>1600	839,8	227,17

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania dielektromagnesów wykonanych z proszków z szybko chłodzonej taśmy ze stopu Nd-Fe-B pokazują, że możliwe jest wytwarzanie magnesów wiązanych o właściwościach magnetycznych i elektrycznych odpowiednich do wielu zastosowań. Przedstawione badania pozwalają określić zależności pomiędzy składem dielektromagnesów a ich właściwościami magnetycznymi i elektrycznymi. Wyniki prowadzonych prac pozwalają wytwarzać dielektromagnesy o właściwościach optymalnych dla danej maszyny elektrycznej.

Magnesy trwale wykonane z proszku Nd-Fe-B wiązanej substancją spajającą mają dobre właściwości magnetyczne i są tańsze od spiekanych magnesów trwałych wykonanych ze stopów SmCo oraz Nd-Fe-B. Powoduje to, iż dielektromagnesy Nd-Fe-B znajdują coraz szersze zastosowanie w konstrukcjach urządzeń elektrycznych.

Rodzaj zastosowanego proszku magnetycznego oraz rodzaj i ilość tworzywa wiążącego wpływają na właściwości fizyczne dielektromagnesów. Czynniki, które również wpływają na ich właściwości są parametry procesu prasowania i utwardzania, takie jak: ciśnienie prasowania, temperatura i czas utwardzania.

Wyniki przeprowadzonych badań tworzą bazę danych zawierającą własności fizyczne dielektromagnesów w zależności od parametrów procesu ich produkcji. Tworzona baza wiedzy umożliwi właściwy dobór materiałów magnetycznie twardych znajdujących zastosowanie w napędach elektrycznych nowej generacji.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, iż dielektromagnesy wykonane z proszku MQP-B firmy Magnequench mają lepsze własności magnetyczne niż dielektromagnesy wykonane z proszków typu NQP firmy Yuxiang. Dielektromagnesy wykonane z proszku MQP-B mają jednak mniejszą wartość rezystywności. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że proszki firmy Yuxiang w zależności od zastosowań mogą zastąpić proszki firmy Magnequench.

Na obecnym etapie badań związanych z poprawą własności fizycznych dielektromagnesów, w wyniku przeprowadzonego procesu silanizacji, uzyskano dielektromagnesy o właściwościach magnetycznych lepszych od właściwości magnetycznych dielektro-

magnesów z proszku MQP-B. Dielektromagnesy otrzymane z proszku poddanego procesowi silanizacji mają jednak zbyt małą wytrzymałość mechaniczną by mogły zostać praktycznie wykorzystane. Prowadzone są dalsze badania nad poprawą właściwości mechanicznych dielektromagnesów poddawanych procesowi silanizacji.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy POIG.01.01.02-00-113/09.

BIBLIOGRAFIA

- [1] TUMAŃSKI S., *Modern magnetic materials – the review*, Przegląd Elektrotechniczny, 4/2010, pp. 1–15.
- [2] ŚLUSAREK B., NOWAKOWSKI A., ZAKRZEWSKI K., ZIELECKA M., *The investigation on Nd-Fe-B dielectromagnets Bonded with silicon resin*, Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 2004, pp. 172–178.
- [3] ŚLUSAREK B., DUDZIKOWSKI I., *Application of permanent magnets from Nd-Fe-B powder and from mixtures of powders in dc motors*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, pp. 597–599.
- [4] ŚLUSAREK B., DŁUGIEWICZ L., *Obszar zastosowań proszkowych materiałów magnetycznych*, Elektronika, No. 8/2006, pp. 45–49.
- [5] ŚLUSAREK B., GAWRYŚ P., PRZYBYLSKI M., *Nd-Fe-B dielectromagnets designed for operation in high temperatures*. XIX Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, 2006, pp. 75–76.
- [6] ŚLUSAREK B., DŁUGIEWICZ L., *Powder magnetic material – area of application*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM, 2006, pp. 368–373.
- [7] Norma PN-C-82055/08:1990. *Oznaczanie oporności elektrycznej właściwej (rezystywności) na próbkach – Metody badań wyrobów z węgla uszlachetnionych*, 1990.

RESEARCH OF MAGNETIC AND ELECTRICAL PROPERTIES OF PERMANENT MAGNETS FOR MAGNETIC CIRCUITS OF ELECTRICAL MACHINES

The permanent magnets are used in basic consumer devices at home, in car or train. For example, these magnets may be found in electric motors and generators working in various environmental conditions. The permanent magnets have to meet the requirements of physical conditions, such as magnetic conditions, mechanical conditions, thermal conditions and electric conditions. These magnets should be also resistant to the environmental factors. In the article were presented the results of the measurements of the magnetic properties of: sintered ferrite permanent magnets, sintered magnets made from an alloy of Nd-Fe-B and SmCo and bonded magnets produced by bonding hard magnetic powder using a cohesive substance, so-called dielectromagnets. In case of sintered magnets the electric properties were additionally measured. Nowadays the sintered magnets are more and more often used in a construction of the electric motors. Their good physical properties and less expensive production technology of the magnetic circuits enables the designers of electric devices to construct the modern, low-energy electric motors. The lower costs of production enables to design the electric motor having better usable parameters. In the measurements were used the hard magnetic powders produced by Magnequench and Yuxiang.