

*dielektromagnesesy, magnesy spiekane,  
właściwości mechaniczne*

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

## **BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH MAGNESÓW TRWAŁYCH PRZEZNACZONYCH NA OBWODY MAGNETYCZNE MASZYN ELEKTRYCZNYCH**

Magnesy trwale znajdują zastosowanie w konstrukcjach różnego rodzaju maszyn elektrycznych takich jak silniki czy prądnice. Stosowane są również w sprzęgłach, systemach ABS, głośnikach, mikrofonach, czujnikach i chwytakach magnetycznych. Wytrzymałość mechaniczna magnesów trwałych stanowi niezwykle istotny czynnik, który może zdecydować o możliwości zastosowania magnesu w danej aplikacji. Optymalna wytrzymałość mechaniczna magnesów trwałych zależy od konstrukcji silnika. Istotne znaczenie ma to, czy magnes trwały umieszczony jest w wirniku czy stojanie. Wpływ na wybór magnesów trwałych ma też sposób ich mocowania, jak również to czy są magnesowane przed czy po montażu silnika. Czynniki te wpływają na rodzaj i wielkość naprężeń mechanicznych występujących w magnesie w czasie pracy urządzenia. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych: spiekanych magnesów ferrytowych, spiekanych magnesów ze stopu Nd-Fe-B i SmCo, oraz magnesów wiązanych tworzywem tzw. dielektromagnesów. Nowe materiały magnetyczne oraz tańsza technologia produkcji pozwala projektantom urządzeń elektrycznych konstruować nowoczesne i energooszczędne silniki elektryczne. Do badań wytypowano proszki magnetycznie twarde takich producentów jak Magnequench oraz Yuxiang [1–6].

### **1. MAGNESY TRWAŁE PRZEZNACZONE DO BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH**

Znajomość parametrów określających właściwości mechaniczne magnesów trwałych jest niezwykle przydatna dla projektantów maszyn elektrycznych. W związku z tym konieczne jest prowadzenie badań właściwości mechanicznych różnego rodzaju magnesów trwałych. W ramach prowadzonych prac do badań wytypowano dielektromagnesesy

---

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

Nd-Fe-B, magnesy spiekane ze stopu Nd-Fe-B i SmCo, oraz spiekane magnesy ferrytowe. W badaniach stosowano komercyjne magnesy spiekane. Magnesy wiązane zostały wyko-  
nane w Instytucie Tele i Radiotechnicznym (ITR). Przeprowadzono badania dotyczące  
wpływu technologii produkcji dielektromagnesów na ich właściwości mechaniczne [1–6].

### 1.1. DIELEKTROMAGNESY

Parametry technologii produkcji dielektromagnesów mają istotny wpływ na ich wła-  
ściwości mechaniczne. Dotyczy to zarówno rodzaju zastosowanego proszku magnetycz-  
nego, rodzaju i ilości substancji spajającej, jak i parametrów procesu technologicznego  
takich jak: ciśnienie prasowania oraz temperatura i czas utwardzania. Dielektromagnesy  
wytwarzano z proszku z szybko chłodzonej taśmy ze stopu Nd-Fe-B typu MQP-B produ-  
kowanego przez firmę Magnequench. Innymi materiałami które stosowano w badaniach  
były proszki produkowane przez chińską firmę Yuxiang Magnetic Materials typu: NQP-A,  
NQP-B, NQP-C, NQP-D oraz NQP-L. Według danych producenta proszki te powinny  
mieć parametry porównywalne z parametrami innych proszków dostępnych na rynku.  
Materiał spajający, który wykorzystano w produkcji dielektromagnesów to 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.


### 1.2. MAGNESY SPIEKANE

Badania właściwości mechanicznych magnesów spiekanych przeprowadzono na  
komercyjnych magnesach. Z uwagi na ograniczony asortyment dostępnych na rynku  
wymiarów i kształtów magnesów spiekanych badania mechaniczne zawężono do badań  
wytrzymałości na ściskanie i zginanie. Badań wytrzymałości na rozciąganie nie można  
przeprowadzić, ze względu na niedostępność na rynku próbek o wymiarach spełniają-  
cych założenia normy [9]. Ze względu na dużą twardość materiałów spiekanych typu  
SmCo badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na próbkach o mniejszych  
wymiarach. W badaniach stosowano spiekane magnesy trwałe takie jak: ferryt anizotro-  
powy typu F30, anizotropowy magnes Nd-Fe-B typu N38, anizotropowy magnes Sm-  
Co<sub>5</sub> typu S18 oraz anizotropowy magnes Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> typu S30.

## 2. PRÓBKI PRZEZNACZONE DO BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH MAGNESÓW TRWAŁYCH

Przeprowadzono badania wytrzymałości mechanicznej na ściskanie, zginanie oraz  
zrywanie magnesów trwałych. Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono

zgodnie z obowiązującymi normami [7–10]. Normy dotyczące badań właściwości mechanicznych określają kształt i wymiary próbek pomiarowych. W związku z tym konieczne było wykonanie próbek dielektromagnesów o odpowiednich kształtach i wymiarach. Wymiary badanych próbek:

DIELEKTROMAGNESY		
badanie wytrzymałości na zginanie	30 × 12 × 6 mm	
badanie wytrzymałości na ściskanie	Ø10 × 14 mm	
badanie wytrzymałości na zrywanie	długość: 90 mm przekrój części pomiarowej: 5,6 × 5,6 mm	
badanie twardości	Ø10 × 4 mm	

Przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu rodzaju proszku magnetycznie twardego i parametrów procesu technologicznego na właściwości mechaniczne dielektromagnesów. Wpływ ciśnienia prasowania na właściwości mechaniczne magnesów trwałych badano na próbkach prasowanych ciśnieniem: 700, 800, 900 MPa przy takich samych pozostałych parametrach procesu technologicznego. Wpływ zawartości epidianu, temperatury i czasu utwardzania badano na próbkach prasowanych ciśnieniem 900 MPa. Próbki dielektromagnesów przeznaczonych na badania właściwości mechanicznych prasowano za pomocą prasy włoskiej firmy Matest o maksymalnej sile nacisku 3000 kN. Następnie wypraski zostały utwardzone w komorze termicznej firmy Instron. Wymuszony obieg powietrza zapewnia równomierny rozkład temperatury wewnątrz komory.

Badanie wytrzymałość mechanicznej na ściskanie oraz zginanie komercyjnych magnesów spiekanych przeprowadzono na próbkach o wymiarach:

MAGNESY SPIEKANE	Ferryt F30	Nd-Fe-B N38	SmCo <sub>5</sub> S18	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub> S30
ściskanie	Ø10 × 5	Ø10 × 5	Ø5 × 7	Ø5 × 7
zginanie	24,5 × 9,85 × 6	30 × 10 × 5	30 × 12 × 6	30 × 12 × 6

### 3. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH DIELEKTROMAGNESÓW

Parametry procesu technologicznego wpływają nie tylko na właściwości magnetyczne dielektromagnesów ale także na ich właściwości mechaniczne. W związku z tym przeprowadzono pomiary właściwości mechanicznych dielektromagnesów z proszku MQP-B wytwarzanych przy różnych parametrach procesu technologicznego. Przeprowadzono pomiary twardości Brinella, wytrzymałości na ściskanie, zginanie oraz zrywanie. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów właściwości mechanicznych dielektromagnesów wykonanych z proszku MQP-B.

Tabela 1. Badania właściwości mechanicznych próbek z proszku MQP-B  
 Table 1. Research of mechanical properties for samples from powder MQP-B

MQP-B						
Parametry technologii produkcji			Twardość <i>HB</i>	Wytrzymałość na ściskanie <i>R<sub>c</sub></i>	Wytrzymałość na zginanie <i>R<sub>g</sub></i>	Wytrzymałość na zrywanie <i>R<sub>m</sub></i>
				[MPa]	[MPa]	[MPa]
Zmiana ciśnienia prasowania	180 °C 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	900 MPa	61	167,3	61,7	27,0
		800 MPa	59	164,0	59,0	26,5
		700 MPa	55	156,0	55,9	28,9
Zmiana temperatury utwardzania	900 MPa 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	200 °C	62	178,3	66,8	31,0
		180 °C	61	167,3	61,7	27,0
		160 °C	62	158,0	64,3	25,7
Zmiana czasu utwardzania	900 Mpa 180 °C 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	4 h	59	15810	58,7	30,4
		3 h	64	166,3	67,9	30,1
		2 h	61	167,3	61,7	27,0
Zmiana zawartości spoiwa	900 MPa 180 °C 2 h 0,2% wag. st. cynku	Epidian 3,5% wag.	70	203,3	78,1	39,0
		Epidian 2,5% wag.	61	167,3	61,7	27,0
		Epidian 1,5% wag.	45	106,3	39,7	13,3

Wzrost ciśnienia prasowania spowodował poprawę zarówno twardości dielektromagnesów, jak i ich wytrzymałości na ściskanie i zginanie. Wyniki pokazane w tabeli 1 pokazują, że wzrost ciśnienia prasowania powoduje nieznaczny spadek wytrzymałości na zrywanie. Zmiana temperatury utwardzania nie powoduje zmiany twardości gotowych dielektromagnesów. Wzrost temperatury utwardzania oraz wzrost zawartości żywicy epoksydowej powoduje zwiększenie wytrzymałości mechanicznej na ściskanie dielektromagnesów z proszku MQP-B. Zwiększenie zawartości żywicy epoksydowej powoduje znaczną poprawę wytrzymałości na zginanie. Zawartość żywicy epoksydowej oraz temperatura i czas utwardzania wypraski wpływają na wytrzymałość mechaniczną na zrywanie utwardzonego materiału magnetycznie twardego, Wzrost temperatury i czasu utwardzania oraz wzrost zawartości żywicy epoksydowej powodują poprawę wytrzymałości mechanicznej na zrywanie.

Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono również dla dielektromagnesów wykonanych z proszku NQP-A. Badano wpływ ciśnienia prasowania, temperatury i czasu utwardzania oraz wpływ zawartości żywicy epoksydowej na wytrzymałość mechaniczną na ściskanie zginanie oraz zrywanie.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych dielektromagnesów wykonanych z proszku NQP-A.

W przypadku proszku NQP-A wzrost ciśnienia prasowania powoduje poprawę parametrów mechanicznych dielektromagnesów. Zmiana temperatury i czasu utwardzania oraz zawartości żywicy epoksydowej wpływa na zmianę twardości dielektromagnesów. Pomiar twardości dielektromagnesów są obarczone dużym błędem. Błąd ten wynika z niejednorodności próbek. W jednym przypadku kulka pomiarowa maszyny

wytrzymałościowej zagłębia się w obszarze o większej zawartości epidianu, w innym natomiast w obszarze o większej zawartości proszku magnetycznego. Wzrost temperatury utwardzania oraz wzrost zawartości żywicy epoksydowej powodują wzrost wytrzymałości mechanicznej na ściskanie. Wytrzymałość na zginanie zależy w dużym stopniu od temperatury utwardzania oraz zawartości żywicy epoksydowej. Wzrost temperatury utwardzania oraz wzrost zawartości żywicy epoksydowej powoduje wzrost wytrzymałości na zginanie. W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych dielektromagnesów wykonanych z proszku NQP-B.

Tabela 2. Badania właściwości mechanicznych próbek z proszku NQP-A  
Table 2. Research of mechanical properties for samples from powder NQP-A

NQP-A						
Parametry technologii produkcji			Twardość HB	Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na zginanie	Wytrzymałość na zrywanie
				$R_c$ [MPa]	$R_g$ [MPa]	$R_m$ [MPa]
Zmiana ciśnienia prasowania	180 °C 2 h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% st. cynku	900 MPa	83	188,7	66,9	28,0
		800 MPa	67	163,0	62,1	33,4
		700 MPa	64	161,0	58,2	34,2
Zmiana temperatury utwardzania	900 MPa 2h 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	200 °C	75	186,0	65,4	33,7
		180 °C	83	188,7	66,9	28,0
		160 °C	76	198,0	61,2	32,0
Zmiana czasu utwardzania	900 Mpa 180 °C 2,5% wag. Epidian 100 0,2% wag. st. cynku	4 h	76	200,3	65,0	36,4
		3 h	80	189,0	70,8	29,4
		2 h	83	188,7	66,9	28,0
Zmiana zawartości spoiwa	900 MPa 180 °C 2h 0,2% wag. st. cynku	Epidian 3,5% wag.	99	201,3	82,7	44,6
		Epidian 2,5% wag.	83	188,7	66,9	28,0
		Epidian 1,5 % wag.	61	131,7	47,1	19,4

Przeprowadzono badania właściwości mechanicznych dielektromagnesów wykonanych z proszków NQP-C, NQP-D, NQP-L. Próbkę dielektromagnesów wykonano przy takich samych parametrach procesu technologicznego. W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych dielektromagnesów wykonanych z proszku NQP-C, NQP-D, NQP-L.

Jak pokazują wyniki badań przedstawione w tabeli 4 twardość oraz wytrzymałość na ściskanie zależą od rodzaju zastosowanego proszku magnetycznego. Natomiast wytrzymałość na zginanie i zrywanie jest podobna dla wszystkich próbek wykonanych z różnych proszków.

Wyniki przeprowadzonych badań właściwości mechanicznych wskazują, że poprzez zmianę parametrów procesu technologicznego można kształtować własności mechaniczne dielektromagnesów. Rodzaj zastosowanego proszku magnetycznie twardego wpływa głównie na właściwości magnetyczne magnezu trwałego, natomiast rodzaj zastosowanego tworzywa wiążącego wpływa na jego właściwości mechaniczne.

Tabela 3. Badania właściwości mechanicznych próbek z proszku NQP-B  
Table 3. Research of mechanical properties for samples from powder NQP-B

NQP-B						
Parametry technologii produkcji			Twardość HB	Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na zginanie	Wytrzymałość na zrywanie
				$R_c$	$R_g$	$R_m$
				[MPa]	[MPa]	[MPa]
Zmiana ciśnienia prasowania	180 °C 2 h	900 MPa	73	179,7	66,0	38
	2,5% wag. Epidian 100	800 MPa	70	175,0	66,0	38
	0,2% wag. st. cynku	700 MPa	51	166,0	64,4	34
Zmiana temperatury utwardzania	900 MPa 2 h	200 °C	67	189,3	70,3	40
	2,5% wag. Epidian 100	180 °C	73	179,7	66,0	38
	0,2% wag. st. cynku	160 °C	75	173,0	60,8	34
Zmiana czasu utwardzania	900 Mpa 180 °C	4 h	69	184,3	62,1	34
	2,5% wag. Epidian 100	3 h	60	185,7	66,4	33
	0,2% wag. st. cynku	2 h	73	179,7	66,0	38
Zmiana zawartości spoiwa	900 MPa	Epidian 3.5% wag.	67	198,7	85,0	47
	180 °C 2 h	Epidian 2.5% wag.	73	179,7	66,0	38
	0,2% wag. st. cynku	Epidian 1.5 % wag.	48	113,3	45,6	23

Tabela 4. Badania właściwości mechanicznych próbek z proszku NQP-C, NQP-D, NQP-L  
Table 4. Research of mechanical properties for samples from powder NQP-C, NQP-D, NQP-L

Parametry technologii produkcji		Twardość HB	Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na zginanie	Wytrzymałość na zrywanie
			$R_c$	$R_g$	$R_m$
			[MPa]	[MPa]	[MPa]
NQP-C	900 MPa 180 °C 2 h Epidian 2.5% wag.	65,8	173,0	65,8	39,0
NQP-D		63,1	176,0	63,1	37,5
NQP-L		61,4	156,0	61,4	39,5

#### 4. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH MAGNESÓW SPIEKANYCH

Przeprowadzono pomiary właściwości mechanicznych na ściskanie oraz zginanie wytypowanych, dostępnych na rynku, magnezów spiekanych. W tabeli 5 przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych magnezów spiekanych.

Jak pokazują wyniki badań wytrzymałości mechanicznej magnezów spiekanych, wytrzymałość mechaniczna tych magnezów zależy od rodzaju zastosowanego proszku magnetycznego. Największa wartość wytrzymałości na ściskanie mają spiekane magnesy trwale typu  $\text{SmCo}_5$ , natomiast największą wytrzymałość na zginanie mają magnesy spiekane typu Nd-Fe-B.

Tabela 5. Właściwości mechaniczne spiekanych magnesów trwałych  
Table 5. The results of the mechanical properties of sintered magnets

Rodzaj spiekane- go magnesu trwałego	Wytrzymałość na ściskanie	Wytrzymałość na zginanie
	$R_c$ [MPa]	$R_g$ [MPa]
Ferrytowy	960	149
Nd-Fe-B	959	258
SmCo <sub>5</sub>	1855	65
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	796	94

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Właściwości mechaniczne dielektromagnesów zależą od rodzaju proszku magnetycznego, rodzaju i ilość tworzywa wiążącego oraz od parametrów procesu technologicznego takich jak: ciśnienie prasowania oraz temperatura i czas utwardzania.

Przeprowadzone badania dotyczące właściwości mechanicznych magnesów trwałych pozwalają konstruktorom maszyn elektrycznych na uwzględnienie tych parametrów w procesie projektowania maszyny. W zależności od rodzaju maszyny, magnesy trwałe które są jej częścią narażone są na różnego typu naprężenia mechaniczne. W jednym przypadku mogą być to naprężenia ściskające, w innym natomiast, dla maszyn o innej konstrukcji, mogą być to naprężenia zginające lub zrywające. Znajomość wartości parametrów mechanicznych pozwala konstruktorom na dobór magnesu trwałego odpowiedniego do konstrukcji danej maszyny.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, iż dielektromagnesy wykonane z proszku MQP-B firmy Magnequench mają mniejsze wartości parametrów określających ich wytrzymałość mechaniczną, niż dielektromagnesy wykonane z proszków typu NQP firmy Yuxiang.

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

## LITERATURA

- [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-H-04947:1976, *Metalurgia proszków – Próba statyczna ściskania*, 1976.
- [8] Norma PN-H-04942:1986, *Spiekane materiały metaliczne – oznaczanie wytrzymałości na zginanie*, 1986.
- [9] Norma PN-EN ISO 2740:2002, *Spiekane materiały metaliczne z wyjątkiem węglików spiekanych – Próbkki do próby rozciągania*, 2002.
- [10] Norma PN-EN ISO 6506-1, *Metale. Pomiar twardości sposobem Brinella. Część 1: Metoda*.

#### RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF PERMANENT MAGNETS FOR MAGNETIC CIRCUITS OF ELECTRICAL MACHINES

The permanent magnets are used in the constructions of the various electric devices such as motors or generators. They are also used in clutches, ABS systems, speakers, microphones, sensors and magnetic handles. Mechanical resistance of hard magnets is a very important factor, which may have an impact on the decision whether the given application may be possibly used. An optimal mechanical resistance of the hard magnets depends on the motor construction. First of all, it is important whether the hard magnet is located in rotor or stator. The other factors impacting the selection of the hard magnet are: the mounting method of the magnets and the fact whether the magnets were magnetized before or after the motor was assembled. These factors affect the type and size of mechanical stresses occurring in the magnet during the operation of the given device. In this 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 bonded with a substance, so-called dielectromagnets. New magnetic materials and the less expensive production technology enables the designers of the devices to construct the modern and low-energy electric motors. In the measurements were used the hard magnetic powders produced by Magnequench and Yuxiang.