

Michał LUBINA

Branżowy Ośrodek Badawczo-
Rozwojowy Maszyn Elektrycznych

MAGNESY TRWAŁE Z PIERWIASTKÓW ZIEM RZADKICH I KOBALTU

Streszczenie. W artykule podano własności magnesów trwałych z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu. Omówiono niektóre zagadnienia związane z ich wytwarzaniem i zastosowaniem w maszynach elektrycznych.

1. Wstęp

Opanowanie produkcji magnesów trwałych z materiałów ceramicznych, stosowanych między innymi w maszynach elektrycznych o średnich mocach, a ostatnio wprowadzenie do produkcji magnesów z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu spowodowały wzrost zainteresowania wśród wytwórców maszyn elektrycznych materiałami magnetycznymi twardymi o dużej energii właściwej i dużym natężeniu powściąągającym.

Maszyny elektryczne o mocach do kilkudziesięciu kW z magnesami ceramicznymi, w połączeniu z układami sterowania o nowoczesnych rozwiązaniach, zrewolucjonizowały przed 5-6 laty serwonapędy w wielu gałęziach przemysłu. W przypadku magnesów z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu czynione są dopiero próby zastosowania ich w maszynach elektrycznych. Bardzo dobre własności magnetyczne nowych materiałów są zapowiedzią kolejnego skoku w rozwoju konstrukcji maszyn elektrycznych.

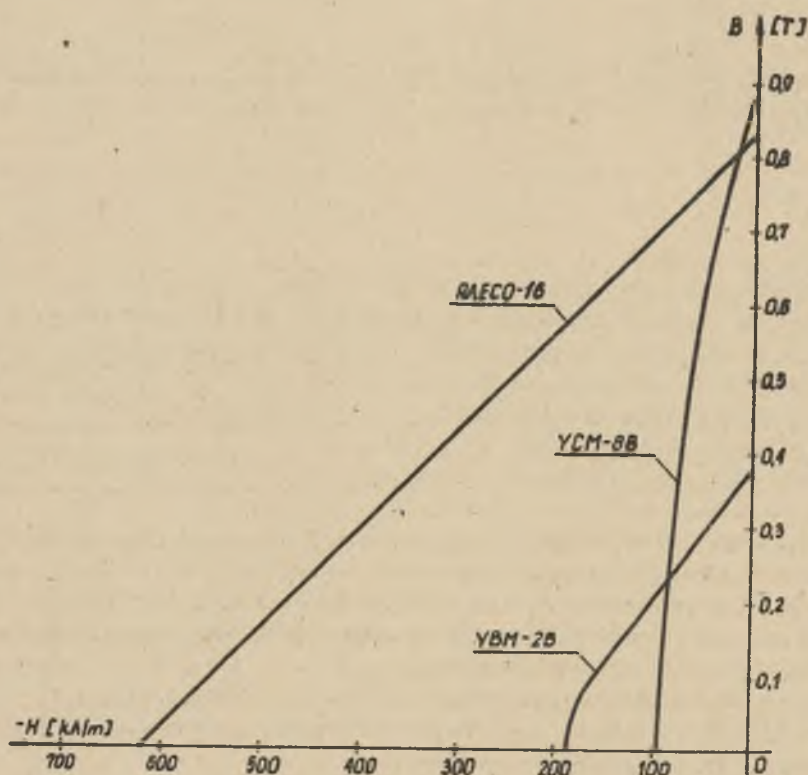
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie własności materiałów magnetycznych z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu, niektórych zagadnień związanych z ich produkcją i zastosowaniem.

2. Własności materiałów magnetycznych z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu

Pierwiastki ziem rzadkich (zwane również lantanowcami), to grupa 15 pierwiastków o zbliżonych własnościach chemicznych, występujących najczęściej łącznie w małych ilościach w skorupie ziemskiej (szacunkowo $6 \cdot 10^{-3}\%$ masy). Do pierwiastków ziem rzadkich należą m.in.: samar Sm, prazeodym Pr, cer Ce, lantan La, neodym Nd.

Przed ok. 10 laty rozpoczęto w USA i w Japonii prace nad otrzymaniem nowych materiałów magnetycznych, w skład których wchodzi właśnie lantanowce.

Najważniejsze informacje o właściwościach magnetycznych materiału zawarte są w krzywej odmagnesowania magnesu. Na rys. 1 zestawiono przykładową krzywą odmagnesowania magnesu z samaru i kobaltu [1] z przykładowo wybranymi, dotąd stosowanymi materiałami: ferrytowym i odlewanym typu Alnico [2]. Natomiast w tabelicy 1 podano podstawowe dane porównywanych materiałów.



Rys. 1. Krzywe odmagnesowania ferrytu strontowego YBM - 2 B [2], materiału typu Alnico YCM - 8 B [2] i materiału z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu RAECO 16 [1]

Tabela 1

Porównanie własności materiałów magnetycznych ferrytowych,
typu Alnico 1 z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu

Własność	Jedn.	YBM-2B	YCM-8B	RAECO-16
Pozostałość magnetyczna B_r	T	0,38	0,88	0,83
Natężenie powściąągające H_c	kA/m	187,9	99,8	636
Natężenie powściąągające γH_c	kA/m	195,5	-	1430
Energia właściwa $(BH)_{max}$	kJ/m^3	24,7	38,2	127
Przenikalność odwracalna μ_r	-	1,1	3,0	1,2
Gęstość $\times 10^3$	kg/m^3	4,7	7,3	8,2
Rezystywność	$\Omega \cdot \text{m}$	10^6	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$

Obecnie magnesy z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu produkowane są na skalę przemysłową względnie wprowadzane do produkcji m.in. przez kilkanaście firm amerykańskich (nazwy firmowe REMCO-16, RAECO-15, HICOREX 90, 95, INCOR 16 i in.), przez kilka firm japońskich (nazwy firmowe HICOREX 10, 18, 23, 26, CORMAX-1300, -1800, -2300 i in.), a także przez firmy Wielkiej Brytanii (nazwy firmowe SAMCOMAG i HERA), Francji (CORMAG), Republiki Federalnej Niemiec (VACOMAX) i Szwajcarii (RECOMA-16, -20). W tabelicy 2 podano parametry oferowanych materiałów wg pracy [3].

Widoczny jest duży rozrzut własności magnetycznych, zwłaszcza w zakresie energii właściwej, natężenie magnesowania, nieodwracalnego obniżenia pozostałości magnetycznej. Wynika on zarówno z zestawienia materiałów dużej liczby producentów, jak i z niedoskonałości procesu technologicznego. Stąd przy zamawianiu magnesów konieczne jest określenie tolerancji wartości odpowiednich danych. Według pracy [1] wartości nominalne $B_r, H_c, \gamma H_c$ mogą mieć tolerancje $\pm 5\%$, natomiast $(BH)_{max} - \pm 10\%$. W przypadku ostrzejszych wymagań konieczna jest selekcja magnesów.

Magnezy trwałe stosowane w maszynach elektrycznych powinny zachowywać wartości parametrów magnetycznych, zwłaszcza indukcji magnetycznej, w cza-

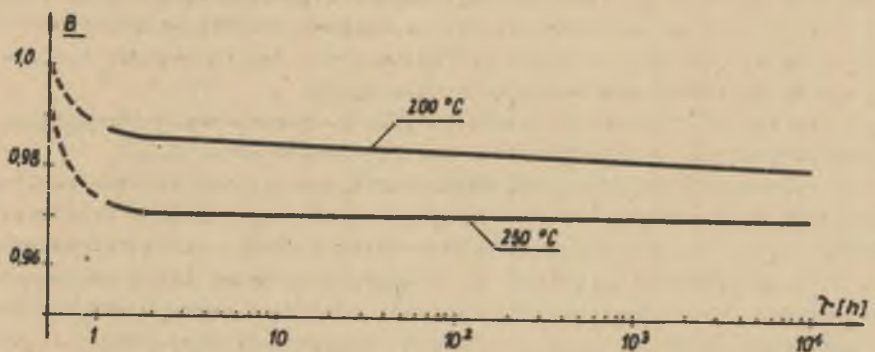
Tablica 2
Właściwości produkowanych przemysłowo materiałów magnetycznych z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu

Właściwość	Jedn.	SmCo	(Sm,Pr)Co	Sm(Cu,Fe,Co)	Ce(Cu,Fe,Co)
Pozostałość magnetyczna B_r	T	0,78-0,9	0,89-1,5	0,92	0,36-0,7
Natężenie powściąągające H_c	kA/m	560-680	510-700	500	200-440
Natężenie powściąągające J_H	kA/m	1200-2000	920-1240	530	380-480
Energia właściwa $(BH)_{max}$	kJ/m^3	120-160	134-200	168	16-96
Przenikalność odwracalna μ_r	-	1,0-1,1	1,05	-	1,01
Natężenie pole orientującego	kA/m	2400-4800	4800	-	960-1200
Współczynnik temperatury	%/deg	-0,04 do -0,05 ¹⁾	-0,05 ²⁾	-0,03 ³⁾	-0,09 ³⁾
Współczynnik nieodwracelnego obniżenia indukcji	%	150°C : 1,4-5	-	200°C : 9	właściwości stabilne
Wytrzymałość na zginienie	N/mm ²	93,0	93	-	-
Wytrzymałość na ściąganie	N/mm ²	294	294	-	-
Wytrzymałość na rozciąganie	N/mm ²	34,5	-	-	-
Moduł sprężystości	N/m ²	0,165	0,165	-	-
Twardość w stopniach Vickersa	HV	510	513	-	-
Przewodność cieplna	W/m deg	9,63	12,14	-	-
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	10^{-6} /deg	8,43	7,8	-	-

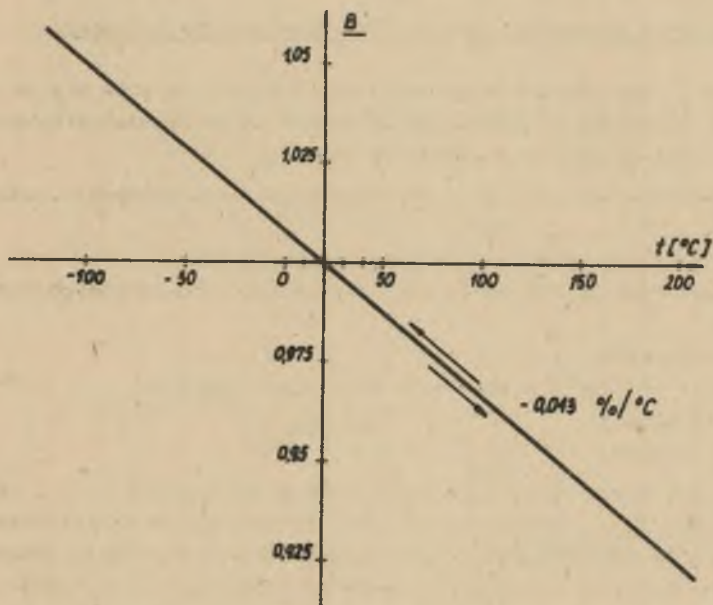
1) 25-250°C

2) 25-200°C

3) 20-120°C



Rys. 2. Charakterystyki starzenia materiału RAECO-16 dla dwu temperatur stabilizacji



Rys. 3. Odwracalna charakterystyka temperaturowa materiału RAECO-16

się eksploatacji. Wartość indukcji ulega nieodwracalnemu obniżeniu, zwłaszcza w wyższych temperaturach. O stopniu obniżenia decydują m.in. takie czynniki: rodzaj procesu technologicznego, stosowanie wstępnego termicznego stabilizowania po namagnesowaniu, jego temperatura i czas trwania, kształt krzywej odmagnesowania, gęstość magnesu. Dla uniknięcia obniżenia indukcji w trakcie eksploatacji przeprowadza się u wytwórcy magnesów, względnie u użytkownika starzenie stabilizujące. Pożądane jest, by odbywa-

ło się ono przy symulacji rzeczywistego obwodu magnetycznego. Typową charakterystykę starzenia podano na rys.2. Początkowa obniżka indukcji o ok. 1-3% następuje bardzo szybko, przed upływem 1 godz. Po 2 godz. obniżka jest bardzo mała, zwiększa się o niecały 1%.

Po starzeniu termicznym charakterystyka temperaturową materiałów z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu jest odwracalna (rys. 3).

Dla użytkownika magnesów oprócz własności magnetycznych istotne są wytrzymałość mechaniczna i zwartość jego struktury, decydujące o trwałości magnesu. Cechy te są w dużym stopniu scharakteryzowane przez wytrzymałość materiału na zginanie, ściskanie i rozciąganie oraz przez moduł sprężystości. Magnes z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu są materiałami kruchymi, stąd pomierzone wartości wytrzymałości posiadają duży rozrzut statystyczny. Dlatego podane w tabelicy 2 wartości powinny być przyjmowane z dużą ostrożnością.

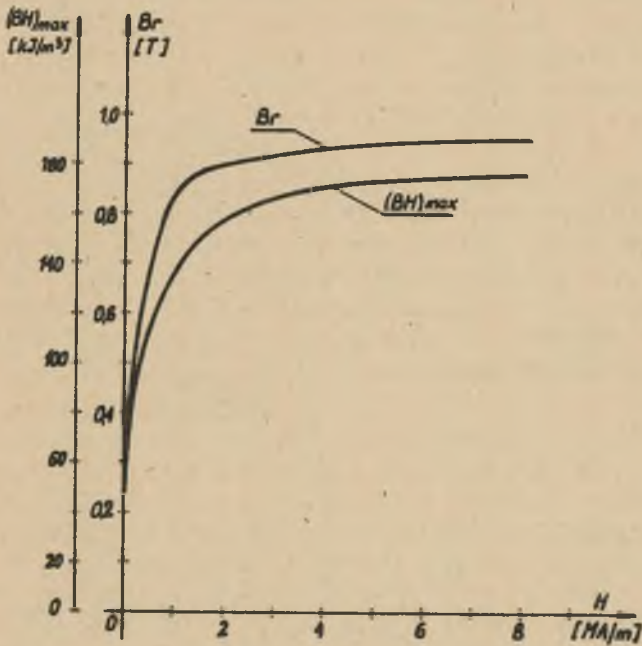
3. Otrzymywanie magnesów z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu

Magnes z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu otrzymuje się na drodze metalurgii proszków. Do ważniejszych etapów procesu technologicznego stosowanego przez jednego z producentów należą:

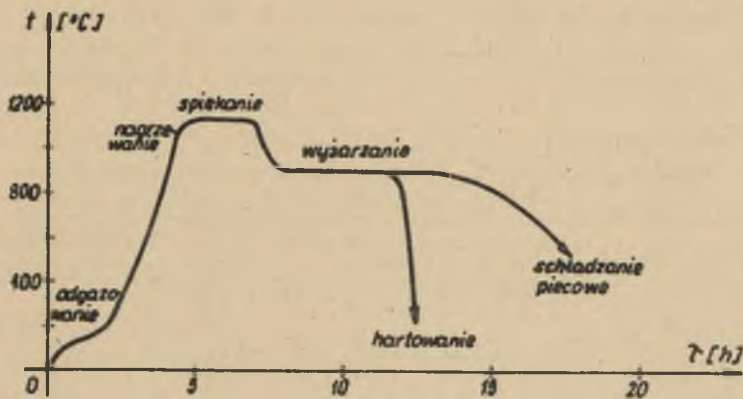
- topienie składowych metali w atmosferze gazów szlachetnych i odlewanie kokilowe,
- kruszenie wlewka na proszek o właściwej sypkości,
- sortowanie cząstek dla otrzymania ziaren o ściśle określonych wymiarach (10 μm),
- suszenie proszku,
- prasowanie (8 t/cm^2) w obecności pola magnetycznego,
- spiekanie proszku,
- obróbka cieplna.

Zasadniczy wpływ na wartość pozostałości magnetycznej B_r i energii właściwej $(BH)_{\text{max}}$ posiada wartość pola orientującego w czasie prasowania (rys. 4). Duże wartości pól orientujących stwarzają poważne problemy związane z koniecznością zapewnienia jednorodności pola, dla uzyskania wysokiego stopnia ujednoczenia zorientowania cząstek. Dotyczy to zwłaszcza magnesów o dużych wymiarach lub o polaryzacji kompleksowej. Oprzyrządowanie musi mieć odpowiednie własności magnetyczne, a jednocześnie dużą wytrzymałość mechaniczną.

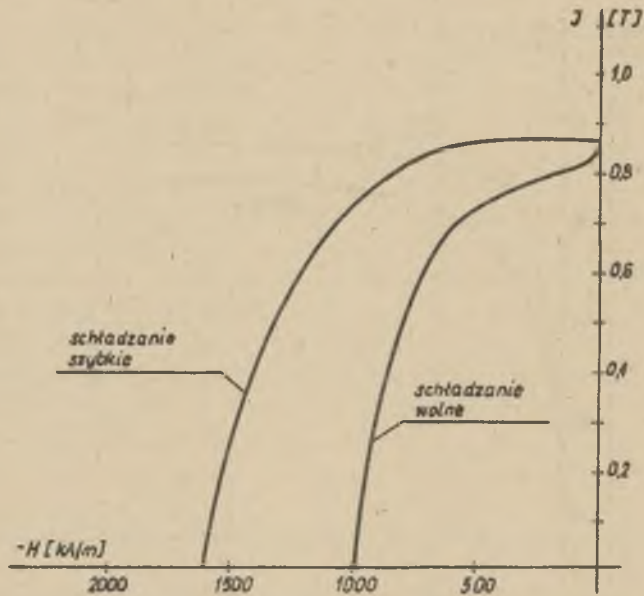
Cykl temperaturowy spiekania magnesów z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu pokazano na rys. 5. Wartość temperatury wyżarzania decyduje o wartości natężenia powściągającego J_H^c , natomiast szybkość schładzania do temperatury pokojowej decyduje o przebiegu krzywej odmagnesowania - rys.6. W przypadku dużych magnesów szybkość schładzania nie może być zbyt duża, gdyż grozi to pękaniem magnesów.



Rys. 4. Wpływ pola orientującego na wartość pozostałości magnetycznej B_r i energii właściwej $(BH)_{max}$



Rys. 5. Cykl temperatury przy spiekaniu magneesów z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu



Rys. 6. Krzywa odmagnesowania w zależności od szybkości schładzania materiału magnetycznego

Czynnikiem ograniczającym powszechne stosowanie magnesów z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu jest ich stosunkowo wysoka cena, wynikająca z wysokiej ceny surowców i kosztu wytwarzania magnesów.

W tabelicy 3 zestawiono, odniesione do ceny ferrytu barowego, jednostkowe ceny produkowanych w Wielkiej Brytanii materiałów magnetycznych o dużym natężeniu powściąągającym [5]. Cena magnesów z pierwiastków ziem rzad-

Tablica 3

Przybliżone ceny jednostkowe materiałów magnetycznych o dużym natężeniu powściąągającym

M a t e r i a ł	Cena na jednostkę masy	Cena na jednostkę objętości
Ferryt barowy	1	5
Alnico 9	10	70
PtCo	12500	194000
SmCo ₅	360	3100
MMCo ₅	20	170

kich i kobaltu jest znacznie niższa od ceny stopu platyny i kobaltu (stopu zawierającego wagowo 77% platyny), posiadającego dotąd największą energię właściwą ($73,6 \text{ kJ/m}^3$) i duże natężenie powściągające (382 kA/m), jest natomiast bardzo wysoka w stosunku do ceny dwu pierwznych materiałów.

Dlatego wprowadzono do produkcji magnesy z miszmetal i kobaltu, oznaczone w tablicy 3 przez MMC_{05} .

Miszmetal, to stop będący mieszaniną pierwiastków ziem rzadkich, najczęściej o składzie [5]: 50-55% Ce, 23-27% La, 10,5-14% Nd, 4,5-7% Pr, 1-1,5% inne pierwiastki ziem rzadkich. Cena tego materiału jest znacznie niższa od ceny czystego chemicznie metalu z grupy pierwiastków ziem rzadkich, ponieważ nie trzeba stosować kosztownego procesu technologicznego wydziałania czystych chemicznie pierwiastków.

Produkowane magnesy typu MMC_{05} posiadają pozostałość magnetyczną 0,6 T, energię właściwą 72 kJ/m^3 .

W wyniku prac prowadzonych nad polepszeniem własności magnetycznych magnesów typu MMC_{05} , otrzymano na skalę laboratoryjną materiał o pozostałości magnetycznej 0,8 T i energii właściwej 144 kJ/m^3 . Produkowane są także magnesy składające się z miszmetal i kobaltu z dodatkiem samaru o wartościach pozostałości magnetycznej 0,65-0,76 T, natężenia powściągającego $400-560 \text{ kA/m}$, energii właściwej $80-112 \text{ kJ/m}^3$.

Inną możliwością obniżenia ceny magnesów z pierwiastków ziem rzadkich jest wprowadzenie do stopu żelaza i zwiększenie udziału procentowego w stopie kobaltu i żelaza (udział kobaltu w typowym stopie SmCo_5 wynosi 66,8%). Otrzymuje się w ten sposób materiały typu $\text{Sm}_2(\text{Co,Fe})_{17}$ o energii właściwej ok. 176 kJ/m^3 .

4. Zastosowanie

Magnesy trwałe z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu znalazły już zastosowanie m.in. w lampach mikrofalowych, precyzyjnych urządzeniach w lotnictwie i kosmonautyce, w łożyskach magnetycznych, w zegarkach elektronicznych, w maszynach elektrycznych.

Własności magnetyczne tych materiałów umożliwiają miniaturyzację wielu urządzeń, stąd mogą znaleźć różnorakie zastosowanie w przemyśle precyzyjnym, chirurgii, stomatologii itd.

W pracy [6] opisano konstrukcję serwośilników prądu stałego z uzwojeniem twornika nieruchomym, umieszczonym w stojanie i z wirującymi magnesami z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu, wytwarzającymi strumień wzbudzenia. Rozwiązanie takie jest możliwe również dla magnesów ceramicznych, ale dzięki dużemu natężeniu powściągającemu omawianych materiałów magnesy mogą mieć w tym przypadku mały wymiar promieniowy. W ten sposób, przy dużej liczbie biegunów, można otrzymać przy danej objętości silnika większe momenty, tj. lepsze wykorzystanie materiałów czynnych. Serwośilniki naj-

częściej pracują przy małych prędkościach obrotowych, typowy jest także atan zahamowany wirnika. Przeniesienie magnesów do wirnika, a uzwojenia twornika do stojana jest bardzo korzystne ze względu na rozmieszczenie źródeł ciepła (strat) w silniku, ułatwiające odbieranie ciepła przy małych prędkościach obrotowych i przy postoju. Wadą natomiast takiej konstrukcji jest konieczność odmiennego rozwiązania mechanizmu komutacji prądu twornika. Umieszczenie uzwojenia w stojanie umożliwia zastosowanie statycznego komutatora elektronicznego, który musi być jednak bardzo rozbudowany, jeżeli wymagane są małe pulsacje momentu. Zapewne z tego względu w pracy [6] zaproponowano inną koncepcję:

komutator i pierścienie ślizgowe umieszczono wewnątrz stojana, a styki toczne zamontowano na wirniku. Styki toczne wykonane są w formie szpułek, których jeden kołnierz toczy się po komutatorze, a drugi po pierścieniu ślizgowym odpowiedniej biegunowości.

W tabelicy 4 zestawiono dane silników prądu stałego wykonanych z magnesami z samaru i kobaltu oraz dla porównania dane silników wykonanych z Alnico 5 i Alnico 8.

Tabela 4

Porównanie właściwości eksperymentalnych silników prądu stałego z magnesami trwałymi

Właściwości	Jedn.	SmCo ₅	Alnico 5	CmCo ₅	Alnico 8
Moc silnika P_n	kW	0,074	0,0074	2,21	1,29
Moment ciągły (przy zahamowanym wirniku) M_n	Nm	-	-	20,3	13,9
Moment maksymalny	Nm	1,48	0,42	94,7	60,9
Moment bezwładności wirnika J	kgcm ²	0,635	0,777	121,8	135,3
Teoretyczna prędkość biegu jałowego	rad/e	270	75	209	209
Maksymalne teoretyczne przyśpieszenie	rad/s ²	23333	5450	7700	4500
Masa silnika	kg	0,45	0,39	32,6	34
Mechaniczna stała czasowa	ms	11,6	13,2	7,2	14,2
Elektryczna stała czasowa	ms	1,0	1,0	3,0	6,25

Interesujące jest porównanie ilości materiału magnetycznego użytego w obu silnikach o większej mocy. W tradycyjnej maszynie wymagane jest ok. 900 cm^3 (ok. 7,25 kg) materiału magnetycznego Alnico, natomiast objętość materiału z samaru i kobaltu wynosi ok. 185 cm^3 (ok. 1,5 kg).

Dla wyrobienia poglądu o poziomie technicznym silników z magnezami z samaru i kobaltu można porównać wartość momentu silnika przy zahamowanym wirniku przypadającą na jednostkę masy, tj. wskaźnik $\frac{M_N}{G}$ tych silników i silnika prądu stałego serii Pb o zbliżonym momencie. Przy uwzględnieniu faktu znamionowania momentu silników serii Pb przy prędkości obrotowej $n_N \neq 0$, wskaźniki wynoszą odpowiednio: 0,62 i 0,23.

W pracy [7] podano dane 4 silników wykonanych z magnezami SmCo_5 o momencie ciągłym przy zahamowanym wirniku od 0,28 do 0,95 Nm. Dla tych silników wskaźnik $\frac{M_N}{G}$ jest jeszcze większy i zawiera się w przedziale od 0,74 do 1,4. Oczywiście są także zalety silników z magnezami trwałymi związane ze zwiększoną przeciążalnością momentem, zwiększoną sprawnością, dużym zakresem regulacji prędkości obrotowej, uproszczeniem układu zasilania.

5. Uwagi końcowe

Należy oczekiwać dalszej poprawy własności magnetycznych i mechanicznych materiałów magnetycznych z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu. Przewiduje się, że dla magnezów trwałych typu SmCo_5 z dodatkiem prazeodymu i dla magnezów typu $\text{Sm}_2(\text{CoFe})_{17}$ osiągnie się wartość energii właściwej ponad 400 kJ/m^3 . Jest to wartość energii 10-krotnie większa od wartości energii właściwej magnezów typu Alnico.

Dzięki zastosowaniu nowych materiałów magnetycznych w maszynach elektrycznych możliwe będą: miniaturyzacja maszyn, zwiększenie ich przeciążalności, zwiększenie sprawności. W przypadku silników zasilanych z baterii istotną zaletą będzie pobór prądu o małym natężeniu.

Zastosowanie magnezów z pierwiastków ziem rzadkich i kobaltu w maszynach elektrycznych prowadzić będzie nie tylko do podniesienia osiągnięć maszyn, ale umożliwi także udoskonalenie ich konstrukcji.

LITERATURA

- [1] Paladino A.E. i inni: Rare earth-cobalt permanent magnet technology. Golde Schmidt informiert ... 4/75. Essen, Mannheim, Schöppenstedt.
- [2] Hitachi Permanent Magnets. Hitachi Metals, Ltd. Katalog.
- [3] Mildrum H.F., Iden D.J.: Magnetic and physical properties of commercially available rare earth permanent magnets. Golde Schmidt informiert ... 4/75. Essen, Mannheim, Schöppenstedt.

- [4] Cedighian S.: Die magnetischen Werkstoffe. VDI - Verlag, Düsseldorf 1973.
- [5] Ross I.N.: Rare earth-cobalt magnets. Electrical Review, vol. 198, nr 20, maj 1976.
- [6] Noodleman S.: Cobalt-rare earth magnets for dc machines. Goldschmidt informiert ... 4/75. Essen, Mannheim, Schöppenstedt.
- [7] Lynch R.: The development of samarium cobalt permanent magnet dc servomotors. IEE Conference Publication nr 136/1976.
- [8] Dobney S.J.: Permanent magnet materials. Electrical Review, vol. 199, nr 7, sierpień 1976.

ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ ИЗ РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ И КОБАЛЬТА

Р е з ю м е

Представлено свойства постоянных магнитов из редких земель и кобальта, обсуждено некоторые проблемы связанные с их изготовлением и употреблением в электрических машинах.

RARE EARTH - COBALT PERMANENT MAGNETS

S u m m a r y

The properties of rare earth-cobalt magnets have been given. Some problems relating to their manufacture and application in electrical machines have been discussed.