

prof. dr hab. inż. JERZY OWCZAREK

Instytut Maszyn Elektrycznych

Politechnika Warszawska

Warszawa

## O MAGNESACH TRWAŁYCH PRODUKCJI ZSRR DO RÓŻNAYTYCH TYPÓW MASZYN

*Artykuł omawia podstawowe rodzaje magnesów trwałych produkcji radzieckiej oraz zawiera wskazówki o przydatności różnych rodzajów magnesów do różnych rodzajów maszyn elektrycznych.*

### 1. Wstęp

Znane zalety maszyn magnetoelektrycznych zarówno małych jak i większych mocy stanowią zachętę do rozwijania produkcji takich maszyn. O ich właściwościach w dużej mierze decydują zastosowane magnesy trwałe. Krajowa produkcja materiałów magnetycznie twardych jest ograniczona zarówno pod względem ilościowym, jak i asortymentowym. Ewentualna zmiana sytuacji w tej dziedzinie jest mało prawdopodobna w szybkim czasie. Należyty rozwój produkcji maszyn magnetoelektrycznych musi więc na razie z konieczności opierać się na imporcie materiałów magnetycznie twardych lub gotowych magnesów trwałych. W kraju są łatwiej dostępne katalogi firm zachodnich, i japońskich, wytwarzających materiały na magnesy trwałe, niż radzieckie. Ze względu na to, że korzystanie z tych ostatnich może okazać się wygodniejsze ekonomicznie, należałoby upowszechnić wśród potencjalnych użytkowników możliwie obszerną informację na temat magnesów trwałych produkowanych w ZSRR. Artykuł jest sygnałową informacją na ten temat, opracowaną na podstawie fragmentarycznych wiadomości spotykanych w literaturze.

### 2. Informacje o materiałach magnetycznie twardych

Produkowane w ZSRR materiały na magnesy trwałe można podzielić na następujące grupy: kobaltowe łane (ЮНДК), ceramiczne, ferrytowe, z zawartością ziem rzadkich (KC), z zawartością metali szlachetnych (w szczególności Pt), z deformowanych stopów (Fe-Co-V, Fe-Cr-Co). Składnikiem większości rodzajów materiałów jest kobalt, którego cena na międzynarodowym rynku bardzo szybko wzrasta (1970 — 2,2 \$ za funt, 1979 — 25 \$ za funt). Z tego względu wysiłki badawcze są skierowane na opracowywanie materiałów o możliwie małej zawartości kobaltu.

Koszty dla kilku materiałów zawierających kobalt w porównaniu do ferrytów barowych (ФБМ) i strontowych (ФСМ) ... (koszt ferrytu strontowego przyjęto za jednostkę odniesienia), zestawiono w tabl. 1.

Magnesy kobaltowe łane, opracowane jeszcze w 30 latach są stosowane dotychczas. Specjalne technologiczne wyposażenie pozwala masowo wytwarzać te magnesy z anizotropią krystaliczną — kolumnową i monokrystaliczną. Podnosi to energię magnetyczną prawie dwukrotnie w stosunku do stopów izotropowych. Również w USA i Japonii obserwowano szybki rozwój tych magnesów do lat 70, a potem poziom produkcji ustalił się w granicach 10 ... 12 tys. ton rocznie. Powodem był wspomniany ok. dziesięciokrotny wzrost cen kobaltu w ostatnich 10 latach.

W wyniku dążenia do obniżenia zawartości kobaltu w stopach magnetycznych zostały opracowane stopy typu Fe-Co-Cr. Pierwszy zawierający o 50% mniej kobaltu niż stop ЮНДК24 o charakterystykach nie gorszych od tego ostatniego; drugi — zawierający jedynie 8 ... 12% kobaltu zawartego we wspomnianym ЮНДК24 i mający tylko nieco gorsze niż on charakterystyki. Dla uzyskania możliwie najlepszych właściwości magnetycznych obydwa te stopy wymagają, podobnie jak dawniej opra-

cowane stopy Fe-Co-V (wikaloje), znacznego zgniotu na zimno podczas produkcji. Stąd ich nazwa "stopy deformowane". Stwarzało to określone trudności technologiczne, które jednak zostały już pokonane. Stopy Fe-Co-Cr mają znacznie korzystniejsze właściwości mechaniczne. Są one podatne na obróbkę skrawaniem, frezowanie, wiercenie, tłoczenie i kucie, podczas gdy stopy typu ЮНДК są bardzo twarde i kruche, wskutek czego wydatek po obróbce gotowych magnesów nie przekracza zazwyczaj 25 ... 30% liczby obrabianych odlewów. Koszt stopów Fe-Co-Cr jest również mniejszy niż stopu ЮНДК 24.

Tablica 1

|     | Materiał   | $H_c$ [kA/m] | Masa Co na<br>1 kA m [g] | Koszt względny |        |
|-----|------------|--------------|--------------------------|----------------|--------|
|     |            |              |                          | 1 kg wstadu    | 1 kA m |
| 1.  | ФСК        | 240          | —                        | 1,0            | 1,0    |
| 2.  | ФБМ        | 210          | —                        | 0,9            | 1,03   |
| 3.  | ЮНДК15     | 48           | 3,125                    | 3,30           | 16,5   |
| 4.  | ЮН 4ДК24   | 48           | 5,0                      | 4,44           | 22,2   |
| 5.  | ЮНДК35ТБ   | 110          | 3,18                     | 6,83           | 14,9   |
| 6.  | ЮН14ДК2ББА | 58           | 4,31                     | 5,0            | 20,7   |
| 7.  | ЮНДК35ТББА | 110          | 3,18                     | 6,97           | 15,3   |
| 8.  | ЮНДК35ТББА | 115          | 3,04                     | 8,33           | 17,4   |
| 9.  | Fe-Co-Cr   | 40           | 3,75                     | 3,72           | 22,3   |
| 10. | KC 3/      | 560          | 7,9                      | 105,00         | 39,4   |

Nowa rodzina magnesów są materiały kobaltowe z zawartością metali ziem rzadkich typu KC, o koercjach  $H_c$ , o rząd większych niż materiały kobaltowe lane anizotropowe, przy wartościach  $B_r = 0,8 \dots 0,9$  T i energii  $BH_{\max}$  160 do 240 T·kA/m. Magnesy te są produkowane metodą metalurgii proszków z zastosowaniem prasowania zarówno proszowego jak i izostaticznego, z następnym spiekaniem i wyżarzaniem. Można je również otrzymywać przez prasowanie proszków stopowych z organicznymi lepiszczami fenolowymi, epoksydowymi lub innymi polimerami. Łatwo w tym przypadku otrzymywać skomplikowane kształty przy dokładnie zachowanych wymiarach i braku konieczności obróbki mechanicznej, jednak wszystkie parametry magnetyczne ulegają pewnemu pogorszeniu [2]. Wadą magnesów z zawartością metali ziem rzadkich jest duży koszt jednostki zawartej w nich energii magnetycznej. Prace badawcze w dziedzinie tych magnesów koncentrują się na zwiększaniu energii przez podnoszenie  $B_r$ , i zmniejszeniu kosztów zarówno materiałów wyjściowych, jak i przede wszystkim, technologii produkcji, w szczególności przez zastosowanie metody otrzymywania magnesów drogą bezpośredniej redukcji tlenków metali ziem rzadkich.

W wyrobach wykorzystujących magnesy trwałe znaczną rolę odgrywają magnesy ceramiczne produkowane technologią proszkową. Są one mechanicznie bardziej wytrzymałe od lanych. Nie biorąc pod uwagę nieco gorszych właściwości magnetycznych rozwój ich produkcji i zastosowań jest ekonomiczny. Szczególne miejsce zajmują magnesy ferrytowe, a wśród nich strontowe, których zastosowanie i produkcja szybko rosną (w ZSRR). Przez uzyskanie strukturalnej anizotropowości podczas produkcji tych magnesów osiąga się energię  $BH_{\max}$  do 32 T·kA/m przy  $H_c \geq 240$  kA/m. Magneszy ferrytowe (poz. 1 i 2 tablicy) mają najniższy koszt jednostkowy energii magnetycznej. Ich zalety ekonomiczne potwierdza fakt, że w USA w 1960 roku wyprodukowano takich magnesów na sumę 4 mln \$, w 1970r. 70 mln \$ a w 1985r. planuje się na 115 mln \$.

Zaostrzenie wymagań co do właściwości magnesów trwałych zostało spowodowane w ostatnich latach tym, że są one obecnie stosowane nie tylko do mikromaszyn, gdzie koszt odgrywał mniejszą rolę. Obecnie nie rzadkie są przypadki, że w urządzeniach średniej mocy, w których magnesy trwałe są korzystne ze względu na zalety jakościowe ich masa dochodzi do 30% masy całego urządzenia. Przykładowo przewiduje się, że w najbliższym dziesięcioleciu w USA 70% silników o mocy do 100 kW będzie o wzbudzeniu magnesami trwałymi.

### 3. Uwagi o stosowaniu omówionych materiałów magnetycznych

Przy ilościowym wzroście stosowania magnesów trwałych w przemyśle, poza potrzebą rozwiązywania zadań obniżenia kosztów ich produkcji, ważne jest również odpowiednie projektowanie urządzeń z tymi magnesami. Przede wszystkim dla optymalnego wykorzystania deficytowych i drogich składników materiałów magnetycznych należy przy projektowaniu unikać tych materiałów, w których zawartość kobaltu na jednostkę energii jest większa. Nie należy stosować izotropowych ferrytów, gdyż anizotropowe mają dwukrotnie większą energię. Przy małych szczelinach warto stosować magnesy kobaltowe lane ze stopów podanych w tabl. 1. poz. 5, 7 i 8, które kosztem dwukrotnego względem ЮНДК-5 (lub 18) zwiększenia zawartości kobaltu zapewniają pięciokrotnie większą energię. Jednak stosunkowo niewielka wartość  $H_c$  wynosząca 50 ... 100 kA/m dyskwalifikuje je w przypadku znacznych natężeń pól rozmagnesowujących. Dlatego zakres ich zastosowania ogranicza się do maszyn małej mocy, hamulców histerezyowych, sprzęgieł magnetycznych i innych układów o niewielkich szczelinach.

W układach o dużych reluktancjach obwodu i dużych polach rozmagnesowujących, a umiarkowanych wymaganiach co do minimalizacji masy i stabilności termicznej jest wskazane stosowanie anizotropowych ferrytów baru i strontu, tanich i o stosunkowo dużej energii jednostkowej. Na przykład: maszyny synchroniczne i prądu stałego, w tym napędowe do obrabiarek, szczególnie sterowanych numerycznie, poza tym zawieszania i separatory magnetyczne. Ostatnio, te magnesy wypierają magnesy kobaltowe lane w urządzeniach powszechnego użytku (wyposażenie samochodów, głośniki, zamki, zabawki itp.). W maszynach elektrycznych małej mocy powszechnego użytku produkowanych masowo, silnikach indukcyjnych i aparatach o dużych obciążeniach dynamicznych lub wymagających magnesów o skomplikowanych kształtach są stosowane obecnie z powodzeniem magnesy z Fe-Co-Cr.

Magnesy z zawartością kobaltu i ziem rzadkich wykazują zalety we wszystkich dziedzinach zastosowań od urządzeń mikrominiaturowych do urządzeń transportowych na zawieszaniu magnetycznym. O ich zastosowaniu powinien decydować każdorazowo skrupulatny rachunek ekonomiczny.

Stosowanie magnesów z zawartością metali szlachetnych powinno w najbliższym czasie zaniknąć, gdyż mogą być one całkowicie zastępowane przez magnesy zawierające metale ziem rzadkich.

Prace w dziedzinie orientowanej krystalizacji doprowadziły do stworzenia magnesów o dużych wartościach  $B_r$  (1,4 T), szczególnie efektywnych w układach o małych szczelinach i nieznacznych polach rozmagnesowujących (mikromaszyny, silniki skokowe). Magnesy z ЮНДК35T5 (wraz z odmianą БК3Т) są stosowane do turbowzbudnic i generatorów o mocach w zakresie 30 ... 1000 kW.

Monokrystaliczne magnesy pozwoliły dwukrotnie zwiększyć moc z jednostki objętości mikromaszyn o magnesach polikrystalicznych. Cylindryczne wirniki z czterobiegunową strukturą zapewniają ten sam wynik przy jednoczesnym znacznym uproszczeniu technologii produkcji.

Anizotropowe magnesy ferrytowe barowe i strontowe dzięki dużej reluktancji nieteksturowanej części pozwalają znacznie uprościć konstrukcje zarówno samych magnesów jak i układów magnetycznych. Na przykład stojan wielobiegunowej maszyny można otrzymać przez naklejenie magnesów wzdłuż wewnętrznego obwodu stojana i namagnesowania ich później wielobiegunowo. Takie magnesy wytrzymujące oddziaływanie znacznych pól rozmagnesowujących bez zauważalnego obniżenia wartości  $B_r$ .

mogą być ustawiane przeciwsobnie, czyli zapewnić pracę "na odpychanie", czyli zawieszenie magnetyczne.

Wielkowymiarowe anizotropowe magnesy ferrytowe barowe zastosowane w obwodzie wzbudzenia silników wykonawczych prądu stałego, o zwiększonym momencie obrotowym dla obrabierek sterowanych numerycznie, mają w porównaniu z analogicznymi silnikami o wzbudzeniu elektromagnetycznym szereg zalet, jak: mniejsze wymiary i masy, wyższą sprawność, mniejsze koszty, większą odporność na przeciążenia (do dziesięciokrotnych), lepsze właściwości dynamiczne. Można oczekiwać masowego stosowania takich magnesów w urządzeniach gospodarstwa domowego, jak odkurzacze, wideo, magnetofony, magnetofony kasetowe, kamery filmowe itp.

Unikalne właściwości magnesów z zawartością metali ziem rzadkich rokują wielkie, nie zbadane dotychczas możliwości zbudowania urządzeń elektrycznych o zasadniczo nowych właściwościach. Wskazują na to wyniki uzyskane z pierwszych, dalece nie optymalnych, egzemplarzy maszyn z tymi magnesami. Na przykład trzy bloki magnesów o ogólnej masie 2 kg umieszczone w wirniku reluktancyjnej maszyny synchronicznej spowodowały zwiększenie jej mocy z 30 do 50 kW, przy jednoczesnym znacznym wzroście sprawności i polepszeniu innych charakterystyk maszyny. Silnik elektryczny z wirnikiem cylindrycznym o czterobiegunowej strukturze z  $\text{SmCo}_5$  osiągnął moc właściwą na jednostkę objętości (z uwzględnieniem sterującego komutatora) 2600 W/dm<sup>3</sup>.

Można bez przesady stwierdzić, że maszyny elektryczne o wzbudzeniu magnesami z zawartością metali ziem rzadkich będą trzy lub pięciokrotnie lepsze od analogicznych maszyn ze wzbudzeniem elektromagnetycznym jeżeli chodzi o moce uzyskiwane z jednostki objętości nie wspominając już o innych decydujących zaletach, jak pewność ruchu, prostota obsługi, lepsza sprawność itd. Szczególnie atrakcyjnych wyników można oczekiwać przy zastosowaniu magnesów z zawartością metali ziem rzadkich, w układach z dużymi szczelinami, układach otwartych i układach przeciwsobnych pracujących na odpychanie (łożyska magnetyczne, transport na zawieszaniu magnetycznym i inne).

W ZSRR według danych z 1981 r, w ostatnich latach uruchomiono szereg wysokowydajnych elektrotermicznych agregatów do odlewania i obróbki termicznej trwałych magnesów, o szczególnie wysokich parametrach eksploatacyjnych. Pozwalają one otrzymać odlewy o orientowanej krystalicznej (w tym i monokrystalicznej) strukturze. Na przykład agregat "Krystalizator 101" pozwala otrzymywać odlewy o orientowanej krystalizacji, o długości do 500 mm i średnicy 100 mm. "Krystalizator 202" — odlewy orientowanej krzywoliniowo krystalizacji, "Krystalizator 301", "-303" i "-306" są przeznaczone do obróbki termicznej magnesów w polu magnetycznym, zgodnie z założonym programem, przy czym proces przebiega w próżni lub w atmosferze obojętnej. Stosowanie tych agregatów umożliwia otrzymywanie wysokogatunkowych materiałów magnetycznych i wyrobów o minimalnych nadłatkach technologicznych od półtora do dwóch razy obniżających pracochłonność wykonywania gotowych magnesów.

Przemysłowa eksploatacja opracowanych agregatów pokazała, że ich zastosowanie zapewnia znaczne zwiększenie wydajności produkcji i polepszenie jakości produkowanych magnesów.

#### 4. Materiały magnetyczne twarde produkowane w ZSRR

##### 4.1. Oznaczenia

W artykule stosuje się radzieckie oznaczenia materiałów magnetycznych (tabl.2.)

Litery na końcu oznaczenia:

A - polepszone właściwości magnetyczne

H - obróbka termiczna w polu magnetycznym

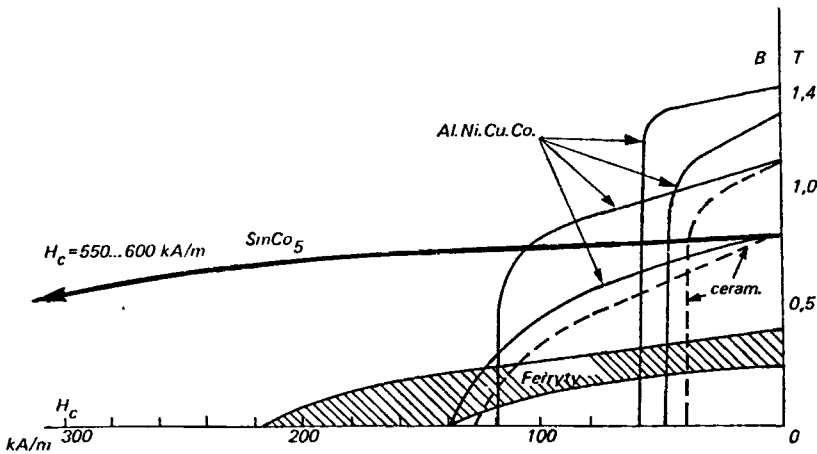
Liczbę:  
w środku oznaczenia — % poprzedzającego elementu  
na początku oznaczenia — % następującego elementu

Tabela 2

| Pierwiastek | Oznaczenie | Pierwiastek | Oznaczenie |
|-------------|------------|-------------|------------|
| Niob Nb     | Б          | Nikiel Ni   | Н          |
| Wolfram W   | В          | Bor B       | Р          |
| Mangan Mn   | Г          | Krzem Si    | С          |
| Miedź Cu    | Д          | Tytan Ti    | Т          |
| Kobalt Co   | К          | Wanad V     | Ф          |
| Beryl Be    | П          | Chrom Cr    | Х          |
| Molibden Mo | М          | Glin Al     | Ю          |

Uwaga:  
Spotykane są odstępstwa od powyższej zasady oznaczania. Są one podane przy omawianiu poszczególnych grup materiałów.

#### 4.2. Orientacyjne zakresy przebiegów krzywych odmagnewowania poszczególnych grup materiałów magnetycznych twardych produkowanych w ZSRR



Rys. 1. Orientacyjne charakterystyki odmagnewowania.

- ЮНДК(ТБ) → Al, Ni, Cu, Co (Ti, Nb)
- - - ММК → ceramiczne
- ▨ БА, ФК, СА → ferryty-barowy, kobaltowy, strontowy
- ← КС → SmCo5 — z zawartością metali grupy ziem rzadkich
- КФ, ГН, НЮ → stopy deformowane Fe, Co, V; Fe, Ni, Mn; Al, Ni, Fe o prostokątnych charakterystykach odmagnewowania w zakresie  $H_c = 17...32$  kA;  $B_r = 0,8...1,4$  T nie są pokazane na rysunku zestawieniowym

#### 4.3. Stopy lane ЮНДК(ТБ)→Al, Ni, Cu, Co (Ti, Nb)

Oznaczenia

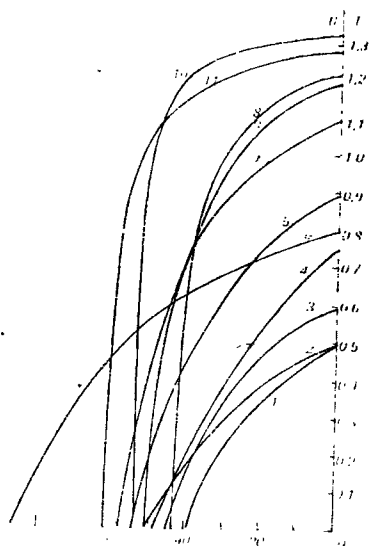
Litery początkowe: Ю→Al; Н→Ni; Д→Cu; К→Co; Т→Ti (tytan); Б→Nb(niobi).

Cyfry w środku oznaczenia-zawartość % poprzedzającego pierwiastka.

Litery na końcu: А – ulepszone właściwości magnetyczne; И – obróbka izotermiczna w polu magnetycznym.

| Lp. | Oznaczenie<br>(marka stopu) | (BH) <sub>max</sub> | H <sub>c</sub> | B <sub>r</sub> | H <sub>d</sub> | B <sub>d</sub> | Wykres |
|-----|-----------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|
|     |                             | T·kA/m              | kA/m           | T              | kA/m           | T              |        |
| 1   | ЮНД 4                       | 7,2                 | 40             | 0,50           | 24             | 0,30           | +      |
| 2   | ЮНД 12                      | 8,8                 | 52             | 0,50           | 30             | 0,29           | +      |
| 3   | ЮНД 8                       | 10,4                | 44             | 0,60           | 28             | 0,37           | +      |
| 4   | ЮНДК 15                     | 12,0                | 48             | 0,75           | 28             | 0,43           | +      |
| 5   | ЮНДК 18                     | 19,4                | 55             | 0,9            | 34             | 0,57           | +      |
| 6   | ЮНДК 35Т5                   | 28,0                | 87             | 0,8            | 56             | 0,50           | +      |
| 7   | ЮНДК 24Т2                   | 29,6                | 58             | 1,10           | 38             | 0,77           | +      |
| 8   | ЮНДК 24                     | 32,0                | 44             | 1,23           | 34             | 0,95           | +      |
| 9   | ЮНДК 24Б                    | 32,0                | 51             | 1,20           | 37             | 0,85           | +      |
| 10  | ЮНДК 25А                    | 52,8                | 54             | 1,33           | 46             | 1,14           | +      |
| 11  | ЮНДК 25БА                   | 52,8                | 62             | 1,28           | 50             | 1,05           | +      |

H<sub>d</sub>, B<sub>d</sub> – współrzędne punktu określające maksimum iloczynu energetycznego (H<sub>d</sub> · B<sub>d</sub>)<sub>max</sub>  
 Parametry podane w tablicy 3 są gwarantowane przez ГОСТ 9575-60.

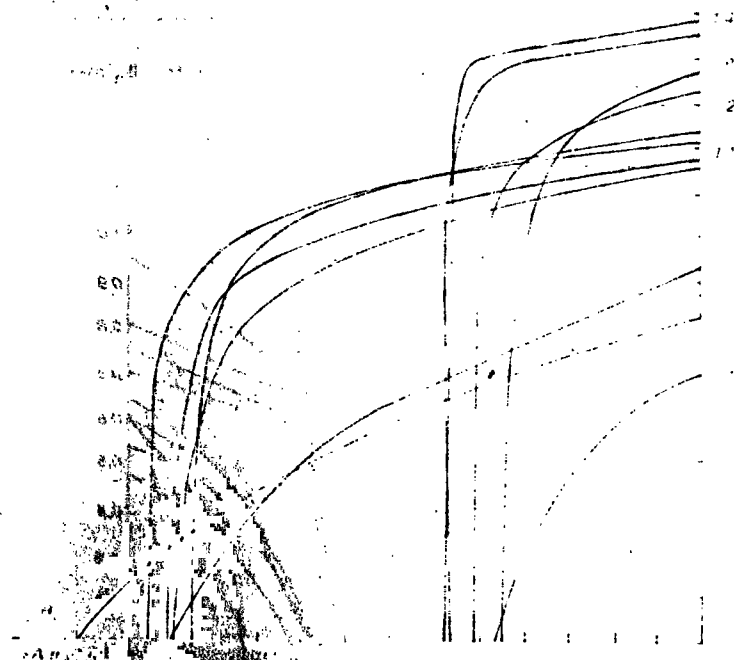


Rys. 2. Charakterystyki od magnesowania wg tabl. 3. Liczby na wykresach odnoszą się do lp. materiału wymienionego w tablicy.

Tablica 4

| Lp. | Oznaczenie<br>(marka stopu) | $(BH)_{\max}$ | $H_c$       | $B_r$       | $H_d$                                              | $B_d$ | Wy-<br>kres |
|-----|-----------------------------|---------------|-------------|-------------|----------------------------------------------------|-------|-------------|
|     |                             | T · kA/m      | kA          | T           | kA                                                 | T     |             |
| 1   | ЮНДЗС                       | 9,7 - 11,6    | 44 - 48     | 0,58 - 0,63 | —                                                  | —     | +           |
| 2   | ЮНДК 18С                    | 32 - 40       | 43,7 - 46,0 | 1,23 - 1,32 | —                                                  | —     | +           |
| 3   | ЮНДК 35Т5И                  | 36 - 40       | 112 - 124   | 0,80 - 0,85 | —                                                  | —     | —           |
| 4   | ЮНДК 38Т7И                  | 32 - 40       | 137 - 147   | 0,68 - 0,76 | —                                                  | —     | +           |
| 5   | ЮНДК 35Т5А                  | 56 - 64       | 107 - 119   | 1,0 - 1,1   | —                                                  | —     | —           |
| 6   | ЮНДК 35Т5БА                 | 64 - 84       | 111 - 127   | 1,0 - 1,1   | —                                                  | —     | +           |
| 7   | ЮНДК 24Б                    | 44            | 52          | 1,23        | 41,6                                               | 1,06  | +           |
| 8   | ЮНДК 35Т5                   | 37,6          | 120         | 0,83        | 73,6                                               | 0,51  | +           |
| 9   | ЮНДК 25БА(1)                | 64            | 56          | 1,35        | 52,8                                               | 1,20  | +           |
| 10  | ЮНДК 25БА(2)                | 68            | 58,4        | 1,38        | 53,6                                               | 1,27  | +           |
| 11  | ЮНДК 35Т5БА(1)              | 72            | 120         | 1,06        | 92,0                                               | 0,79  | —           |
| 12  | ЮНДК 35Т5БА(2)              | 80            | 120         | 1,08        | 104                                                | 0,80  | +           |
| 13  | ЮНДК 35Т5БА(3)              | 88            | 115         | 1,14        | 97,6                                               | 0,90  | +           |
| 14  | ЮНДК 35Т5БА(4)              | 96            | 125         | 1,12        | 108,8                                              | 0,88  | +           |
| 15  | ЮНДК 40Т7                   | 40            | 144 - 155   | 0,7 - 0,8   | kostki, cylindry, optymalna<br>masa 0,05 - 0,08 kg |       |             |
| 16  | ЮНДК 40Т8                   | 36 - 40       | 155 - 160   | 0,7 - 0,75  |                                                    |       |             |

Parametry wg WT i wyników pomiarów.



Rys. 3. Charakterystyki od magnesowania wg tabl. 4. Liczby na wykresach odnoszą się do lp. materiału wymienionego w tabelicy.

#### 4.4. Stopy metaliczno-ceramiczne

Oznaczenia

Litery MMK : magnes metalo-ceramiczny

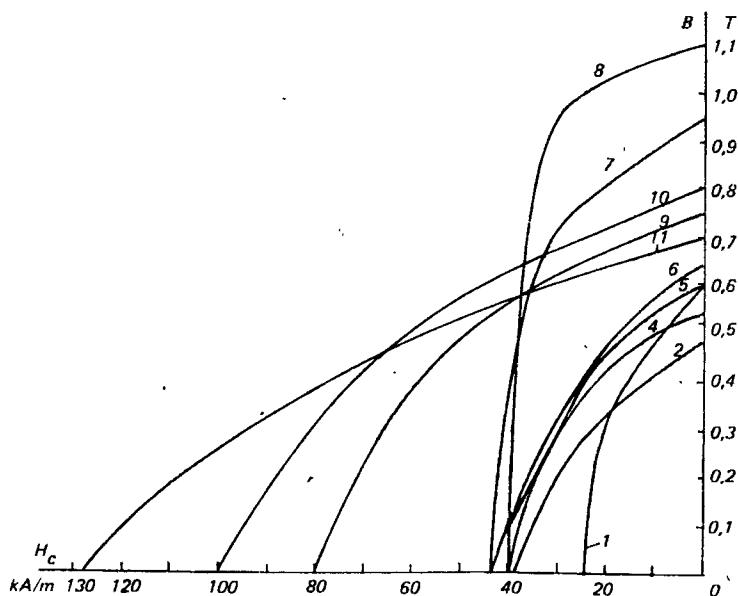
Cyfra : liczba porządkowa stopu

Tablica

| Lp. | Oznaczenie<br>(marka stopu) | (BH) <sub>max</sub> | H <sub>c</sub> | B <sub>r</sub> | H <sub>d</sub> | B <sub>d</sub> | W<br>kr |
|-----|-----------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
|     |                             | T·kA/m              | kA/m           | T              | kA/m           | T              |         |
| 1   | MMK 1                       | 6,0                 | 24             | 0,60           | 17             | 0,35           | +       |
| 2   | MMK 2                       | 7,0                 | 39             | 0,48           | 23             | 0,30           | +       |
| 3   | MMK 3                       | 8,0                 | 44             | 0,52           | 27             | 0,30           | —       |
| 4   | MMK 4                       | 9,0                 | 40             | 0,55           | 30             | 0,30           | +       |
| 5   | MMK 5                       | 9,4                 | 44             | 0,60           | 27             | 0,35           | +       |
| 6   | MMK 6                       | 10                  | 44             | 0,65           | 28             | 0,40           | +       |
| 7   | MMK 7                       | 21                  | 44             | 0,95           | 35             | 0,60           | +       |
| 8   | MMK 8                       | 28                  | 40             | 1,10           | 35             | 0,80           | +       |
| 9   | MMK 9                       | 24                  | 80             | 0,75           | 54             | 0,45           | +       |
| 10  | MMK 10                      | 30                  | 100            | 0,80           | 57             | 0,53           | +       |
| 11  | MMK 11                      | 32                  | 128            | 0,70           | 80             | 0,40           | +       |

H<sub>d</sub>, B<sub>d</sub> — współrzędne punktu określające maksimum iloczynu energetycznego (H<sub>d</sub> · B<sub>d</sub>)<sub>max</sub>

Parametry podane w tablicy są gwarantowane przez ГОСТ — 13596—68



Rys. 4. Charakterystyki odmagnesowania wg tabl. 5. Liczby na wykresach odnoszą się do lp. materiału wymienionego w tablicy



# 1.5. Ferryty magnetyczne twarde

## Oznaczenia

Cyfra na początku : zaokrąglone wartości  $(BH)_{max}$  w  $MOe \cdot Gs$

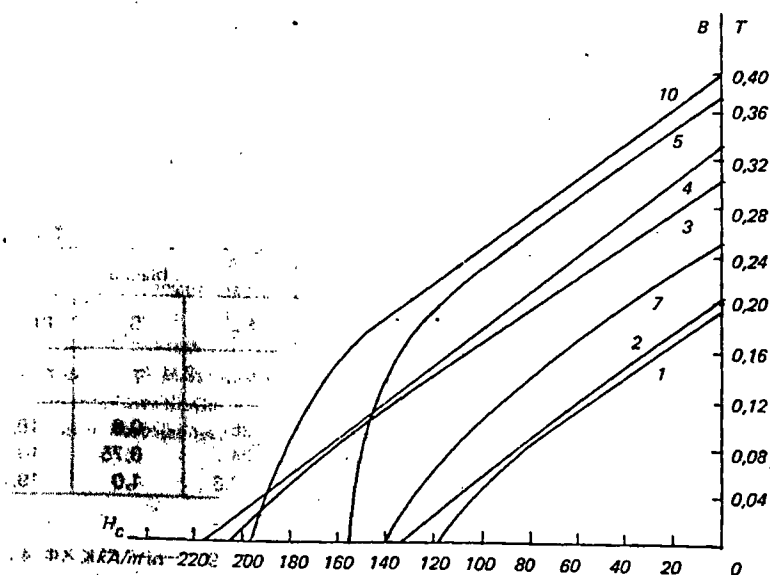
Pierwsza litera : B ferryt barowy; C — ferryt strontowy

Druga litera : A — anizotropowy; H izotropowy

Wyjątek :  $\Phi K$  ferryty kobaltowe

Tablica 6

| Lp. | Oznaczenie<br>(marka stopu) | $(BH)_{max}$ | $H_c$      | $B_r$        | Wykres |
|-----|-----------------------------|--------------|------------|--------------|--------|
|     |                             | T-kA/m       | kA/m       | T            |        |
| 1   | 0,7 BH                      | 5,58 — 6,36  | 111 — 127  | 0,18 — 0,21  | +      |
| 2   | 1 BH                        | 6,36 — 8,76  | 127 — 143  | 0,19 — 0,22  | +      |
| 3   | 2 BA 1                      | 14,3 — 19,9  | 195 — 239  | 0,28 — 0,33  | +      |
| 4   | 2 BA                        | 15,9 — 13,1  | 183 — 230  | 0,30 — 0,35  | +      |
| 5   | 3 BA                        | 23,9 — 27,9  | 127 — 183  | 0,35 — 0,40  | +      |
| 6   | 3 BA 1                      | 23,1 — 25,5  | $\geq 264$ | $\geq 0,375$ | —      |
| 7   | 1,5 $\Phi K$                | 11,1 — 13,5  | 127 — 151  | 0,24 — 0,27  | +      |
| 8   | 2 $\Phi K$                  | 14,3 — 17,5  | 127 — 160  | 0,28 — 0,32  | —      |
| 9   | 3 CA                        | 20,7 — 26,2  | 240 — 270  | 0,34 — 0,38  | —      |
| 10  | 3,5 CA                      | 27,8 — 31,8  | 160 — 230  | 0,38 — 0,41  | +      |



Rys. 5. Charakterystyki od magnesowania wg tabl. 6. Liczby na wykresach odnoszą się do lp. materiału wymienionego w tablicy.

#### 4.6. Stopy deformowane Fe, Co, V; Al, Ni, Fe; Fe, Ni, Mn

Oznaczenia

Litery : K — kobalt, Ю — aluminium, М — molibden, Н — nikiel, Т — tytan, Ф — wanad, А — utleniony.

Cyfry: na początku % następującego pierwiastka; w środku lub na końcu % poprzedzającego pierwiastka; pozostałe % — Fe — żelazo nieoznaczone.

Tablica 7

| Oznaczenie<br>(marka stopu) | druć           |                | taśma z.w.     |                |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                             | H <sub>c</sub> | B <sub>r</sub> | H <sub>c</sub> | B <sub>r</sub> |
|                             | kA/m           | T              | kA/m           | T              |
| 52 КФ 5                     | 4,0            | 1,4            | 4,0            | 1,4            |
| 52 КФ 7                     | 6,4            | 1,25           | 6,4            | 1,25           |
| 52 КФ 9                     | 9,6            | 1,15           | 9,6            | 1,15           |
| 52 КФ 11                    | 24             | 1,0            | 17,6           | 1,0            |
| 52 КФ 13                    | 28             | 0,85           | 24,0           | 0,75           |
| 52 КФА                      | 40             | 0,6            | 28,0           | 0,6            |
| Г12 НЗ                      | —              | —              | 15,2           | 0,75           |
| 52 КФТМ                     | 32             | 0,9            | blachy g.w.    |                |
| 20 НЮ                       | —              | —              | —              | —              |
| 22 НЮ                       | —              | —              | 12 — 14,4      | 0,8 — 0,7      |
| 25 НЮ                       | —              | —              | 17,6 — 20,8    | 0,8 — 0,7      |
|                             | —              | —              | 32,0 — 40,0    | 0,6 — 0,5      |

W tablicy: z.w. — zimno-walcowana  
g.w. — gorąco walcowana

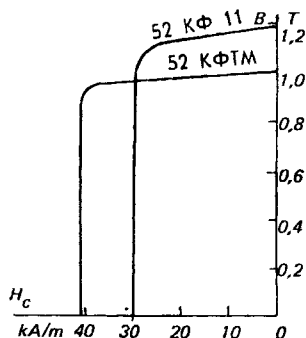
Ponadto w ЦНИИЧМ są produkowane wg WT:

Tablica 8

| Oznaczenie<br>(marka stopu) | druć           |                |                     | blacha         |                |                     |
|-----------------------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|---------------------|
|                             | H <sub>c</sub> | B <sub>r</sub> | (BH) <sub>max</sub> | H <sub>c</sub> | B <sub>r</sub> | (BH) <sub>max</sub> |
|                             | kA/m           | T              | T kA/m              | kA/m           | T              | T kA/m              |
| 52 КФА (52 КФ 13)           | 40             | 0,6            | 24                  | 26             | 0,6            | 18,4                |
| 52 КФБ                      | 26             | 0,85           | 24                  | 24             | 0,75           | 19,2                |
| 52 КФВ (52 КФ 11)           | 24             | 1,0            | 24                  | 17,6           | 1,0            | 19,2                |

Dla wirników silników hiserezowych są produkowane poza 52 КФ 5, 7 i 9 również 35КХФ 4, 6 i 8 (Х — chrom).

Charakterystyki stopów deformowanych zależą w bardzo dużym stopniu od reżimu obróbki termicznej oraz plastycznej (zgnioty na zimno do 90°).



Rys. 6. Przykładowe charakterystyki 52 KΦ 11 B<sub>1</sub>T i 52 KΦ TM przy obróbkach zapewniających maksymalne  $H_c$  i  $(BH)_{max}$

Otrzymanie materiału o charakterystykach wg rys.6 jest bardzo trudne i nie zawsze się udaje. Podobno istnieje stop FeCoV o 49% Co i 4%V, który po hartowaniu od temperatury 800°C, zgnio- cie przez walcowanie na zimno 95% i odpuszczaniu przy 600°C w ciągu 4 godzin wykazuje  $B_r = 1,7T$ ,  $H_c = 3,2 \text{ kA/m}$ , zaś  $BH_{max}$  występuje przy  $B_d = 1,5T$  i  $H_c = 2,9 \text{ kA/m}$ .

#### Literatura

- [1] N.A.Kelin: Efektwnost primienienija postojannyh magnitow w izdieljach elektrotechniki. Elektrotechnika, nr 11, 1981.
- [2] W.I.Jermolin i inni: Metalopłasticeskije postojannyje magnity na osnowie spławow  $SmCo_5$  i  $Sm(Co_{0,84}Cu_{0,16})_6$ . Elektrotechnika, nr 2, 1981.
- [3] E.I.Aniszczenko i inni: Issledowanije magnitnyh polej w wozdusznyh zazorach elektriceskich maszin s postojannyimi magnitami iz spława  $SmCo_5$ . Elektrotechnika, nr 9, 1977.
- [4] N.W.Porchaczewa, N.W.Szargin: Indukcionnoje oborudowanije dla proizwodstwa mnogopolus- nych rotorow mikrodwigatelej na osnowie postojannyh magnitow. Elektrotechnika, nr 7, 1981.
- [5] A.I.Ledowskij, A.M.Sugrobow: Magnitnoje pole w elektriceskich maszinach s postojannyimi ma- gnitami iz spława  $SmCo_5$ . Elektricesstwo, nr 7, 1982.
- [6] Ju.M.Piatin: Postojannyje magnity, sprawocznik, Energia, 1971.