

Magnetodielektryki w przemysłach radiotechnicznym i elektromaszynowym

Podstawą rozwoju społeczeństwa oraz wytwarzania dóbr materialnych jest zabezpieczenie energetyczne gospodarki narodowej oraz mechanizacja i automatyzacja procesów wytwórczych. Rozwiązanie tego problemu w znacznym stopniu zależy od osiągnięć w przemyśle radiotechnicznym i elektromaszynowym zarówno w zakresie specyfiki konstrukcji samych urządzeń jak i w zakresie stosowanych materiałów konstrukcyjnych. Wśród nich poczesne miejsce zajmują materiały magnetyczne.

Specyfika konstrukcji urządzeń oraz technologii ich produkcji związana jest z właściwościami fizyko-chemicznymi stosowanych materiałów. Z drugiej strony sama konstrukcja, jeśli ma być udana, stawia określone wymagania stosowanym materiałom. Tak więc podwyższenie jakości urządzeń można osiągnąć na drodze kompleksowego rozwiązywania zagadnień konstrukcyjnych, technologicznych i materiałowych, mając jednocześnie na uwadze ekonomiczną stronę zagadnienia.

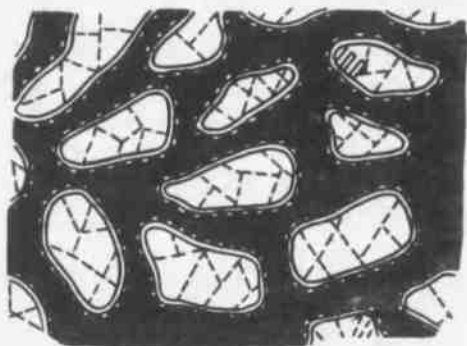
- Najszerzej w chwili obecnej stosowaną grupą materiałową w radio- i elektronice są:
- stale elektrotechniczne walcowane na gorąco marek $\exists 11 - \exists 43$ z początkową przenikalnością magnetyczną 300 - 800 Gs/Oe, maksymalną przenikalnością magnetyczną 5000 - 10000 Gs/Oe oraz z indukcyjnością nasycenia ok. 20000 Gs,
 - walcowane na zimno stale z małą teksturą marek $\exists 1100 - \exists 3200$
 - walcowane na zimno stale marek $\exists 310 - \exists 330$ z takimi samymi parametrami magnetycznymi lecz ze znacznie niższą stratnością [1-4].

Stale te, zwłaszcza walcowane na zimno, posiadające niższą stratność, w pewnym stopniu zabezpieczają wymagania przemysłu elektromaszynowego z punktu widzenia ich własności magnetycznych.

Jednak w szeregu przypadków własności wyżej wymienionych stali nie spełniają stawianych wymagań. Szczególnie dotyczy to zagadnień związanych z warunkami procesu technologicznego maszyn i problemów związanych ze zmianą własności rdzeni magnetycznych w procesie ich obróbki. Tak np. walcowana na zimno stal przy podwyższonych częstotliwościach posiada stosunkowo niską indukcyjność nasycenia /14-16 Gs/. Jest rzeczą naturalną, iż w celu zmniejszenia objętości rdzeni magnetycznych w urządzeniu pracującym przy zwiększonych częstotliwościach należy stosować materiał o podwyższonej podatności magnetycznej. W tym celu W.G. Bereżon i inni [5] zaproponowali zastosować stop 49 KFWI po wygrzaniu go w temperaturze 800°C i ochłodzeniu w polu magnetycznym.

W czasie wytwarzania rdzeni magnetycznych ze stali elektrotechnicznych, właściwości magnetyczne rdzeni w niskich polach pogarszają się w wyniku odkształceń plastycznych o 10 - 15% [6, 7]. Konieczna dla stabilizacji własności obróbka cieplna tych materiałów powoduje obniżenie indukcyjności stali walcowanych na zimno [8]. Nasylenie rdzeni magnetycznych wytwarzanych z taśm stalowych walcowanych na zimno, lakiem lub innym wypełniaczem, zalewanie pakietów metalami kolorowymi prowadzi do powstania mechanicznych naprężeń wewnętrznych i obniżenia indukcyjności magnetycznej rdzenia magnetycznego o 9 - 14% [9, 10]. Wydzielanie się ciepła i wnikanie cząsteczek materiału ściernego do permalloyowego rdzenia magnetycznego w trakcie obróbki mechanicznej powierzchni pakietów statorów, toroidów, i rotorów ujemnie odbija się na ich charakterystykach magnetycznych [11]. Zastosowanie ferromagnetycznych stopów metali w zakresach dużych i bardzo dużych częstotliwości jest utrudnione ze względu na ich wysokie stratności elektryczne. Wszystkie przedstawione przykłady wskazują na konieczność znalezienia i zastosowania w przemyśle elektromaszynowym nowych materiałów.

Materiałami zastępczymi dla stali elektromaszynowych mogą być w szeregu przypadków magnetodielektryki stanowiące mieszaninę rozdrobnionego ferromagnetyka, którego cząsteczki są oddzielone wzajemnie zarówno w sensie elektrycznym jak i magnetycznym mechanicznie zaś powiązane przy pomocy dielektryka /rys. 1/.



Rys. 1. Schemat wielowarstwowej izolacji ferromagnetyka

magnetodielektryków. Różnica polega tylko na tym, że składnik dielektryczny w ferrytach stanowią magnetycznie i elektrycznie obojętne jony tlenu z oktetem elektronów na zewnętrznej powłoce $/S^2q^{\vee}/$, zaś składnik ferromagnetyczny stanowią trójwartościowe jony żelaza $/d^5/$ i aktywne magnetycznie jony metalu określającego ferryt [14, 15]. Wymieszanie składników następuje w skali jonowej dzięki strukturze krystalicznej ferrytów.

Magnetodielektryki niskokoercyjne znajdują szerokie zastosowanie jako ekrany magnetyczne - materiały pochłaniające pole centymetrowe [16]. Stosuje się je dla otrzymania rdzeni wykorzystywanych w wysoko częstotliwościowej i wielokanałowej telefonii, w radiotechnice w cewkach filtrów kwarcowych oraz w aparaturze pracującej przy częstotliwościach tonalnych [12].

Tego typu zmiana jest możliwa dzięki zbliżonej wielkości pierwotnej przenikalności magnetycznej stali krzemowych i nowoczesnych przemysłowych materiałów magnetodielektrycznych [11, 12, 13]. Poza tym magnetodielektryki charakteryzują się dostatecznie dużą stabilnością własności magnetycznych i wysoką wartością oporności właściwej co pozwala na wykorzystywanie ich w polach średniej i wysokiej częstotliwości przy obniżeniu strat cieplnych.

W szeregu przypadków, no przykład przy wykonywaniu rdzeni magnetycznych, transformatorów, zamiast stali można stosować ferryty, które ze względów strukturalnych mają własności analogiczne do

Magnetodielektryki stosuje się przy wykonywaniu wewnętrznej osłony kombinowanych ekranów elementów automatyki [13]. Można nimi zamienić taśmy stalowe wykorzystywane dla zwiększenia strumieni rozpraszania w celu zwiększenia induktywności układu [21].

Szerokie zastosowanie znajdują magnetodielektryki przy konstruowaniu urządzeń elektrycznych jako kliny magnetyczne, wypełniacze itd. Umożliwia to w szeregu przypadków uproszczenie technologii i wprowadzenie szeregu pożytecznych udoskonaleń konstrukcyjnych. Technologia magnetodielektryków pozwala, aby po ułożeniu sztywnych sekcji rdzeni magnetycznych lub cewek wypełnić pod ciśnieniem magnetodielektrykiem zarówno szczelinę, jak i wszystkie nieszczelności między tuleją izolującą a szczeliną. Proces ten można zmechanizować i zautomatyzować [13]. Takie kliny magnetyczne posiadające dostatecznie wysoką wytrzymałość mechaniczną i oporność właściwą $9 \cdot 10^{-8} \text{ om cm}$, umożliwiają zwiększenie sprawności urządzenia o 2,5%, polepszenie $\cos \varphi$ o 0,02 - 0,08 oraz mają szereg innych zalet w porównaniu z klinami drewnianymi [7, 8].

Wydłużenie aktywnej części urządzenia do obszaru czołowych połączeń dzięki zastosowaniu magnetodielektryków umożliwia zwiększenie jej całkowitej przewodności magnetycznej choć jednocześnie komplikuje częściową zmianę uzwojenia.

W mikroukładach bardzo pracochłonne jest nawijanie. Dla ułatwienia tej operacji główny stalowy pakiet można tłoczyć bez szczelin, a zębaty obszar rdzenia całkowicie lub częściowo wypełniać magnetodielektrykiem po nałożeniu uzwojenia. Wpływa to także na oszczędność miedzi dzięki uproszczeniu połączeń czołowych. W mikroukładach z małymi strumieniami magnetycznymi dla uproszczenia technologii w zasadzie można całkowicie zamienić stal magnetodielektrykiem. Umieszczone w formie uzwojenie zalewa się magnetodielektrykiem, następnie przeprowadza się proces polimeryzacji zapewniający przy odpowiednim wyborze wypełniacza - wymaganą wytrzymałość konstrukcji.

Dzięki zastosowaniu magnetodielektryków przy konstrukcji "płaskich" maszyn możemy uniknąć wszelkich powierzchniowych nierówności pakietów, a także wykonać konstrukcje zawierające w sobie kilka płaskich par "stator - rotor".

Wyżej opisane przykłady świadczą o szerokich perspektywach zastosowania magnetodielektryków w przemyśle radiotechnicznym i elektromaszynowym oraz o potrzebie rozwijania prac badawczych w tym kierunku. Zasadniczym problemem jest odpowiedź na pytanie, jakie układy magnetodielektryków należy badać, tj. jakie składniki ferromagnetyczne i dielektryczne oraz w jakich warunkach procesu technologicznego dadzą najlepszy efekt techniczny i ekonomiczny.

Jako składniki ferromagnetyczne w produkcji magnetodielektryków stosuje się proszek żelaza karbonylnowego, sproszkowane żelazo elektrolityczne, alsifor, magnetyt, ferryty, permalloy i techniczne sproszkowane żelazo otrzymane metodą redukcji.

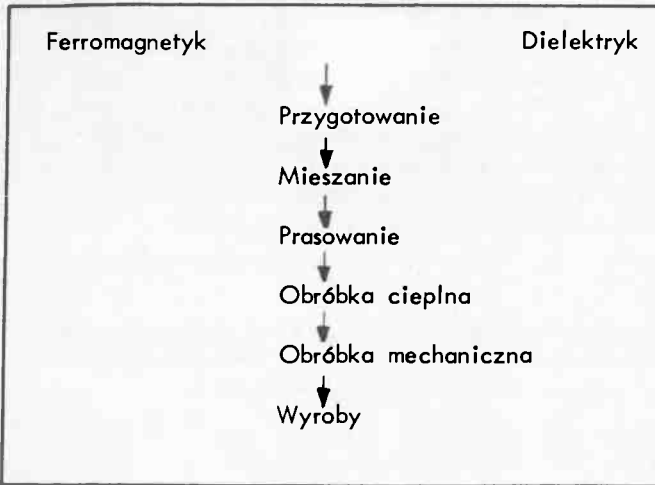
Jako składniki dielektryczne zazwyczaj stosuje się ciekłe szkło, bakelit, szelak, żywice epoksydowe poliestrowe i inne.

Technologia wytwarzania wyrobów z magnetodielektryków /rys. 2/ składa się z następujących zasadniczych operacji:

- przygotowania proszku ferromagnetycznego,
- wymieszania z dielektrykiem,

- prasowania prefabrykatu,
- obróbki termicznej dla polimeryzacji i wyżarzania odprężającego,
- obróbki mechanicznej.

Ponieważ o własnościach magnetodielektryka decydują własności magnetyczne składnika ferromagnetycznego, rzeczą bardzo ważną jest właściwe przygotowanie proszków



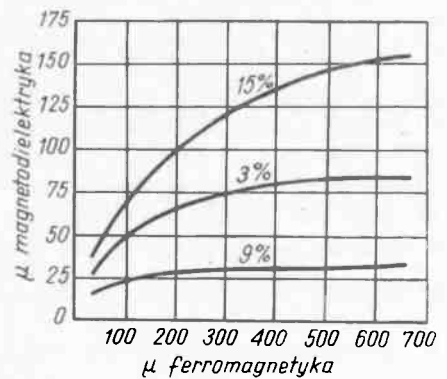
Rys. 2. Technologiczny schemat procesu otrzymywania magneto-dielektryka

ferromagnetycznych. Przygotowanie to polega na nadaniu cząsteczkom kształtu kulistego poprzez obróbkę w młynach kulowych i redukujące wygrzewanie w celu usunięcia tlenu, węgla i innych szkodliwych zanieczyszczeń.

Zmieszanie ferromagnetyka z suchym dielektrykiem można przeprowadzić w zwykłych mieszalnikach. Dla ciekłego dielektryka jednak wymagane są mieszalniki z podgrzewaniem. W tym przypadku możliwe jest - poprzez kolejne przemywanie ferromagnetyka w magnetodielektryku i polimeryzację - otrzymywanie wielowarstwowych struktur dielektrycznych na powierzchni cząsteczek, co zapewnia odpowiednią wytrzymałość warstwy, jej jednorodność i dobrą izolację elektryczną.

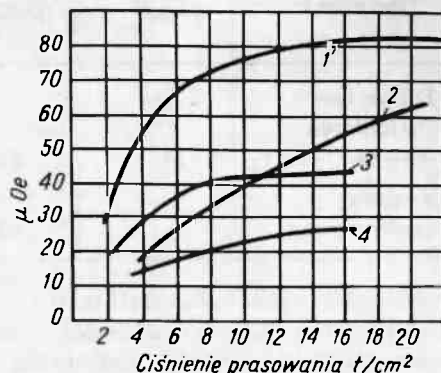
Zawartość składnika dielektrycznego ma silny wpływ na przenikalność magnetyczną magnetodielektryka /rys. 3/ i nie powinna być większa niż 10% objętości.

W czasie prasowania należy unikać naruszenia ciągłości warstwy izolacyjnej. Uda się to osiągnąć poprzez odpowiednie dobranie ciśnienia prasowania, kulistości cząstek ferromagnetyka oraz dobranie odpowiednich dielektrycznych substancji wiążących. Przekroczenie ciśnienia prasowania powyżej



Rys. 3. Zależność efektywnej przenikalności magnetycznej magnetodielektryka od zawartości składowej dielektrycznej

10^4 kG/cm^2 celowe jest jedynie w przypadku kruchego ferromagnetyka [4.] Przy niższych ciśnieniach prasowania nie osiąga się efektywnych wielkości przenikalności magnetycznej magnetodielektryka /rys.4/.



Rys. 4. Zależność przenikalności magnetycznej magnetodielektryka od ciśnienia prasowania. 1 - pressperm; 2 - alsifer; 3 - wyżarzony proszek żelaza elektrolitycznego; 4 - niewyżarzony proszek żelaza elektrolitycznego

Temperaturę spiekania wyrobów określa temperatura polimeryzacji dielektryka i jego wytrzymałość termiczna.

WŁASNOŚCI MAGNETODIELEKTRYKÓW O CAŁKOWICIE ODIZOLOWANYCH CZĄSTKACH FERROMAGNETYCZNYCH

Tablica 1

| Ferromagnetyk | Rozmiary ziarna μm | Przenikalność dielektryczna Gs/Oe | Opór właściwy $\text{om} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ |
|------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|
| Żelazo karbonylowe | 3-20 | 15-60 | 0,1 |
| Żelazo elektrolityczne | 5-25 | 8-150 | 7-78 |
| Permalloy | 5-25 | 75-85 | 0,05-0,25 |
| Permalloy molibdenowy | 40-80 | 125 | 0,4-0,5 |
| Permalloy molibdenowy | 5-35 | 26 | 0,4-0,5 |
| Alsifer | 40-100 | 10-60 | 0,8 |

Analiza danych zamieszczonych w tablicy 1 wykazuje, że najwyższą przenikalność magnetyczną mają magnetodielektryki na bazie molibdenowego permalloy'u i elektrolitycznego żelaza.

Biorąc pod uwagę specyfikę technologii [12] i cenę ferromagnetyków należy uznać za bardziej celowe stosowanie żelaza elektrolitycznego. Ponieważ w przemyśle elektromaszynowym w szeregu przypadków od magnetodielektryków nie wymaga się przenikalności magnetycznej większej niż rzędu 20 Gs/Oe, jako składową ferromagnetyczną można stosować przemysłowe sproszkowane żelazo PŻ po dodatkowym redukującym wygrzewaniu. Jest to bardziej ekonomiczne niż stosowanie innych ferromagnetyków [13]. Jednak zastosowanie tego lub innego ferromagnetyka powinno być uwarunkowane zarówno względami ekonomicznymi jak i technologicznymi.

Jako dielektryczny materiał wiążący można polecać, ze względu na perspektywiczne właściwości, żywice epoksydowe, polietylen lub polichlorek winylu /tablica 2/. Dostatecznie dobre rezultaty dają mieszaniny na bazie żywicy epoksydowej [19].

| Dielektryk | Gęstość g/cm ³ | Wytrzymałość termiczna °C | Wytrzyma- łość elektry- czna kV/mm | Opór właś- ciwy om.cm | Tangens kąta strat- ności |
|-----------------------|------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------|---------------------------------|
| Polietylen | 0,9 | | 40 | | |
| Polichlorek winylu | 1,4 | 65-80 | | 10 ¹⁴ | 0,01-0,02 |
| Żywica epoksydowa | | 60-70 | 20-26 | 10 ¹⁴ | 0,001-0,002 |

Analogiczne do badań stali teksturowych perspektywicznymi w przypadku magnetodi-elektryków są badania możliwości wykorzystania "teksturowych" magnetodi-elektryków. Ferromagnetyczny proszek poddaje się w tym przypadku wstępnemu walcowaniu lub obróbce w wirowych młynach a proces polimeryzacji przeprowadza się w polu magnetycznym dla stworzenia tekstury magnetycznej. Tego typu materiały powinny zabezpieczać względnie wysoką przenikalność magnetyczną wzdłuż tekstury przy jednoczesnej wysokiej oporności właściwej w kierunku poprzecznym tekstury. Jednak zagadnienie to jest jeszcze dyskusyjne i wymaga szeregu badań.

Podobnie interesującym, lecz nadal dyskusyjnym zagadnieniem jest zastosowanie mieszanin magnetycznie miękkich i magnetycznie twardych ferromagnetyków. W szczególności problem ten dotyczy ferrytów posiadających wystarczające własności magnetyczne /tablica 3/ i wysoką elektryczną oporność właściwą, co nie wymaga dużego dodatku lepiszcza/ dielektrycznego przy osiągnięciu dostatecznie wysokiej plastyczności materiału.

WŁASNOŚCI NIEKTÓRYCH FERRYTÓW PRZEMYSŁOWYCH [14, 20]

Tablica 3

| Ferryt | Przenikalność magnetyczna | | Indukcja w sta- nie nasycenia Gs | Opór właściwy om.cm |
|-----------|---------------------------|---------------------|--|------------------------|
| | początkowa Gs/Oe | maksymalna Gs/Oe | | |
| 2000 HH | 1800-2400 | 7000 | 2600 | 10 ³ |
| 600 HH | 500-800 | 1600 | 2750 | 10 ⁴ |
| 6000 HM | 4800-6200 | 10000 | 3550 | 10 ¹ |
| 4000 HM | 3500-4800 | 7000 | 4000 | 5·10 ¹ |
| 2000 HM I | 1700-2500 | 3500 | 3400 | 5·10 ² |
| 1500 HM 3 | 1200-1800 | 3000 | 3800 | 2·10 ³ |
| 60 BQ | 51-72 | 177 | 2450 | 6,6·10 ⁸ |

Na podstawie powyższego można wyciągnąć jednoznaczny wniosek, że magnetodi-elektryki na trwałe wchodzić w zakres materiałów konstrukcyjnych w przemyśle radio-technicznym i elektromaszynowym. Perspektywność ich zastosowań w tej dziedzinie staje się coraz bardziej oczywista.

Dla dalszego rozszerzenia wykorzystania materiałów typu magnetodielektryków należy rozszerzyć badania nad udoskonaleniem technologii produkcji urządzeń, nad próbowaniem szeregu magnetodielektryków o rozmaitych składowych ferromagnetycznych i dielektrycznych, nad poszukiwaniem nowych magnetodielektryków i doskonaleniem technologii ich otrzymywania w oparciu o doświadczenia technologii metalo-ceramiki oraz badania w zakresie poszerzenia możliwości zastosowań w tej dziedzinie materiałów ferrytowych. Pozwoli to produkować urządzenia o podwyższonej mocy przy jednocześnie zmniejszonych kosztach wytwarzania.

Literatura

1. Рейнбот: Технология и применение магнитных материалов, Госэнергоиздат, М. - Л., 1963.
2. А.Н. Никитский, М.М.Иванов, Л.В.Миронов: Электротехника, 9, 54, 1969.
3. Р.П.Акимов, К.Ф.Досев: Электротехника, 9, 53, 1965.
4. И.К.Панина: Электротехника, 8, 49, 1969.
5. Е.Г. Берензон, И.К.Панина, Г.В.Пшечемкова, А.Д.Скоков: Электротехника, 9, 54, 1969.
6. И.Я.Эйнгорн: Электротехника, 5, 39, 1965.
7. Ю.В.Гаминцев: Электротехника, 5, 11, 1966.
8. К.К.Намиатов, Н.Н.Профатилова: Электротехника, 8, 30, 1966.
9. Е.И.Кисель: Вестник электропромышленности, 3, 47, 1960.
10. М.Л.Заславский: Электротехника, 4, 37, 1966.
11. Ю.Г.Шнайдер, А.К. Монаков: Электротехника, 10, 12, 1966.
12. Г.В.Самсонов, С.Я.Плоткин: Производство железного порошка, Металлургияиздат, М., 1957.
13. В.А.Троицкий: Магнитодиелектрики в конструкции электрических машин, Изд. "Наука", Уз.ССР, Ташкент, 1965.
14. Л.И.Рабкин, С.А.Соскин, Б.Ш.Эпштейн: Технологии ферритов, Госэнергоиздат, М. - Л., 1962.
15. В.А.Горбачик, Г.В.Самсонов: Неорганические материалы, III № 3, 560, 1967.
16. Л.И.Рабкин: Высокочастотные ферромагнетики, физматгиз, М., 1960.
17. В.Б.Алексеевский, Ю.С.Чатинян, Л.К.Галстин, Л.В.Алчурусян: Электротехника, 9, 10, 1965.
18. Л.И.Родик, А.И.Яковлев: Электротехника, 11, 7, 1968.
19. А.К.Варденбург и др.: Электротехника, 4, 53, 1966.
20. Л.И.Рабкин, С.А.Соскин, Б.Ш.Эпштейн: Ферриты, "Энергия", Л., 1968.
21. Немецкий патент № 623701, К 21 с, 72, 1936.