

И. А. Тимофеев

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ**



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2012 ЛАНЬ®





И. А. ТИМОФЕЕВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

*ДОПУЩЕНО
УМО вузов РФ по образованию
в области транспортных машин
и транспортно-технологических комплексов
в качестве учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по специальностям направлений
подготовки «Транспортные машины
и транспортно-технологические комплексы»
и «Эксплуатация наземного транспорта
и транспортного оборудования»*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2012



ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА

Издательство «Лань»



ББК 65.304я73

Т 41

Тимофеев И. А.

Т 41 Электротехнические материалы и изделия: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2012. — 272 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-1304-1

Изложены теоретические основы, технология производства и применение спеченных магнитомягких материалов для изготовления магнитных систем в электротехнических изделиях. Приведены физико-механические свойства различных по составу железокремнистых материалов, а также механические испытания магнитных систем. Описаны требования, предъявляемые к магнитным системам, их свойства и конструкции.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров в области техники и технологии, а также для аспирантов и преподавателей. Может быть полезно инженерам-электрикам, научным работникам в области производства электротехнических изделий.

ББК 65.304я73

Рецензенты:

П. А. АРСЕНЬЕВ — доктор технических наук, профессор кафедры физики электротехнических материалов и компонентов и автоматизированных электротехнических комплексов Московского энергетического института (технического университета); *Р. И. МАЛИНИНА* — доктор технических наук, профессор кафедры физического материаловедения Московского института стали и сплавов; *Н. Г. КОЛБАСНИКОВ* — доктор технических наук, профессор кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Обложка

Е. А. ВЛАСОВА

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2012

© И. А. Тимофеев, 2012

© Издательство «Лань»,

художественное оформление, 2012



*Светлой памяти
МИШИНА Дмитрия Дмитриевича посвящая*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка новых материалов, необходимых для решения различных электротехнических задач, совершенствование уже известных материалов с целью получения более высоких эксплуатационных характеристик электротехнических изделий являются важнейшими направлениями, определяющими развитие электротехники и электротехнической промышленности.

Магнитные материалы широко применяются в различных классах электротехнических изделий. Электромеханические характеристики этих материалов в значительной мере определяют эксплуатационные качества изделий, их механическую и электрическую износостойкость, надежность, рабочую температуру и т. д.

Современные методы формирования элементов изделий из магнитных материалов включают методы порошковой металлургии, которые применяются в основном для получения элементов конструкционных деталей, несущих механические нагрузки. В связи с использованием этих методов для изготовления рабочих элементов электротехнических конструкций (сердечников, роторов, статоров, магнитопроводов, магнитных шунтов и т. п.) потребовалось проведение комплекса физических и технологических исследований по получению магнитных материалов с повышенными магнитными характеристиками.

В народном хозяйстве накопился большой резерв экономического и технического потенциала, так как энергетические и другие ресурсы все еще используются недостаточно эффективно. Электротехнические изделия часто проекти-



руются без расчета размеров магнитных систем, рациональное использование электрической энергии не предусматривается, при этом велики отходы электротехнической стали и непроизводительный расход обмоточной меди, магнитные характеристики реальных изделий не учитываются.

Созданию новых материалов, инновационных технологий получения магнитных материалов, разработке современных изделий и посвящена настоящая работа. Как показали проведенные исследования, снижение трудоемкости операций при изготовлении магнитных элементов, сокращение себестоимости изделий, экономия магнитных материалов, высвобождение прокатного, штамповочного, металлорежущего станочного оборудования, широко используемого в современной технологии производства элементов магнитных цепей, — все эти задачи имеют практические решения.

Изделия, изготовленные по новому методу порошковой металлургии, найдут широкое применение во многих отраслях промышленности. Особое значение в наших условиях имеет организация исследования технологий магнитных материалов, налаживание инновационных процессов разработки и производства новых конструкций изделий.

Актуальность работы обусловлена следующими проблемами:

- требуется создание новых магнитных материалов, которые будут лучше существующих по своим свойствам (коэрцитивной силе, максимальной магнитной проницаемости, удельным потерям);
- необходимо развивать теоретические положения взаимодействия доменных границ со структурными дефектами, влияющими на магнитные свойства;
- эмпирические данные по специфике создания магнитных материалов методом порошковой металлургии в настоящее время отсутствуют.

Предлагаемая читателю работа восполняет некоторые пробелы, имеющие место в данной отрасли науки и техники.

Ввиду качественной перестройки высшей школы и задач повышения квалификации выпускаемых университетами специалистов изучение физической теории необ-

ходимо сочетать с практическим освоением технологии производства магнитных материалов.

Особое внимание в книге уделено физической сущности явлений, имеющих место в электротехнических материалах при их взаимодействии с электромагнитным полем; магнитным параметрам, характеризующим свойства электротехнических материалов; закономерностям, определяющим зависимость магнитных параметров от взаимодействия дислокационной и доменной структур.

В электротехнической и авиационной промышленности, приборостроении, радиопромышленности и других машиностроительных отраслях магнитомягкие материалы нашли широкое применение. В последние два-три десятилетия появились новые прогрессивные технологии получения и обработки электротехнических материалов, что повлекло за собой новый качественный скачок в исследовании магнитных материалов и возможность на их основе разработать новые виды электротехнических изделий.

Автор выражает глубокую благодарность действительному члену Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова, доктору физико-математических наук, профессору кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов и автоматизированных комплексов Московского энергетического института (технического университета) Е. Ф. Кустову за помощь в процессе работы над книгой, критические замечания и рекомендации.

Несомненную пользу в работе над книгой оказали автору советы и замечания доктора технических наук, профессора Р. И. Малининой (кафедра физического материаловедения Московского института стали и сплавов).

Особенно признателен автор доктору технических наук, профессору Н. Г. Колбасникову (кафедра пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета) за научную и дружескую поддержку.

Все замечания по книге следует направлять по адресу: 192029, Санкт-Петербург, Общественный переулок, 5, ООО Издательство «Лань».

И. А. Тимофеев



1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАГНИТОПРОВОДОВ

1.1. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СПЛАВА КРЕМНИЯ С ЖЕЛЕЗОМ

Исследованию процессов изготовления деталей методом порошковой металлургии, являющимся одним из новых прогрессивных технологий, посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых и специалистов-практиков. Вопросы теории и технологии, связанные с формообразованием и спеканием порошковых и гранулированных материалов, рассматриваются в работах Г. И. Аксенова, А. Б. Альтмана, Р. А. Андриевского, В. А. Анциферова, М. Ю. Бальшина, С. В. Белова, Б. А. Борок, Г. А. Виноградова, П. А. Витязя, Я. Е. Гегузина, Ю. Г. Дорофеева, С. С. Ермакова, В. Н. Еременко, Г. М. Ждановича, В. А. Ивенсена, В. П. Каташинского, О. А. Катруса, С. С. Кипарисова, М. С. Ковальченко, А. Г. Косторнова, Г. С. Креймера, Ю. В. Левинского, Г. А. Либенсона, Е. Б. Ложечникова, Н. В. Манукяна, Г. А. Меерсона, Н. Н. Павлова, В. Е. Перельмана, Я. Б. Пинеса, И. Д. Радомысльского, В. С. Раковского, А. И. Рудского, О. В. Романа, Г. В. Самсонова, В. М. Сегала, В. В. Скорохода, А. В. Степаненко, И. М. Федорченко, И. Н. Францевича, Айзенкольба, Джеймса, Джонса, Кучинского, Ленеля, Ояне, Ристича, Хауснера и др.

В значительной мере теоретические положения физики и металловедения, электрических машин и аппаратов базируются на результатах работ современных отечественных и зарубежных ученых, в число которых вошли Г. Н. Алек-

сандров, П. А. Арсеньев, В. Г. Баженов, А. М. Балбашов, О. А. Банных, К. А. Боярчук, Г. А. Бугаев, Б. К. Буль, А. М. Глезер, Ю. Н. Драгошанский, Ю. В. Зайцев, Ю. М. Иньков, А. В. Иванов-Смоленский, Г. С. Кандаурова, Н. Г. Колбасников, И. П. Копылов, В. М. Кондратов, В. Д. Кочетков, В. А. Кузнецов, П. А. Курбатов, И. О. Леушин, А. С. Лилеев, М. А. Любчик, Л. А. Макриденко, Р. И. Малинина, В. М. Матюнин, Б. М. Могутнов, В. А. Нестерин, А. Г. Никитенко, Н. И. Носкова, Ю. А. Осипьян, А. Г. Пастушенков, И. И. Пеккер, Ю. К. Розанов, С. В. Серебрянников, Г. П. Станулевич, В. М. Строев, В. П. Чапарин, В. А. Жаринов, Е. Н. Шефтель, В. Н. Шоффа, Д. Браун, Р. С. Теббль, Т. Нозава, Т. Ямамото и др.

Труды этих ученых и специалистов в основном определили направление и характер теоретических и практических разработок, выполненных в настоящей книге.

Диаграмма состояния характеризует взаимодействие химических веществ в условиях равновесия, кристаллическую структуру веществ и природу химической связи. Известно, что магнитные свойства магнетиков в значительной степени определяются кристаллической структурой сплавов и соединений. Исследование диаграммы фазового равновесия проведено в ряде работ [52; 88; 94; 107]. Кривая температуры плавления железокремнистых сплавов при повышении содержания кремния (Si) сначала снижается, затем возрастает. Железокремнистые сплавы магнитны при содержании Si до 33% (см. рис. 1.1).

Сплавы, содержащие до 15% Si, представляют собой твердый раствор кремния в α -железе (Fe). При 25% (атомных) в сплаве происходит полное упорядочение с образованием сверхструктуры Fe_3Si . При температуре выше 1103 К появляются α^1 -, α^{11} - и η -фазы. Последняя тождественна соединению Fe_5Si_3 (23% Si) и стабильна только в интервале температур 1098...1303 К. Фазе α^{11} , как полагают, соответствует формула $Fe_{11}Si_5$.

Сплавы, содержащие 15...33% Si, имеют две точки Кюри: первую (363...393 К) и вторую (723...813 К). Нижняя точка Кюри приписывается сплавам с небольшим количеством η -фазы, присутствующей в неравновесном

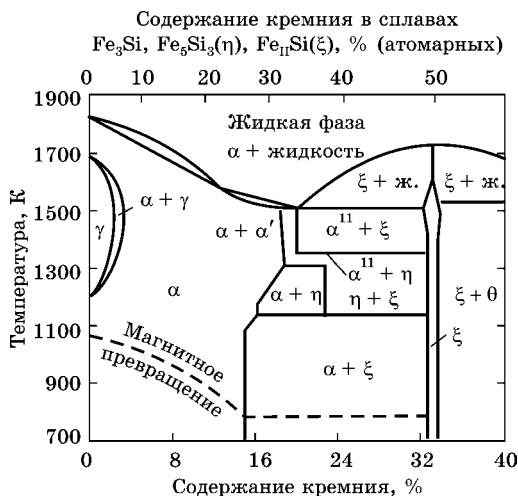


Рис. 1.1

Диаграмма фазового равновесия железокремнистых сплавов

состоянии. Фаза ϵ немагнитна. У чистых сплавов, содержащих более 2,5% Si, в области твердых растворов отсутствует γ -фаза. Однако присутствие нескольких сотых процента углерода может расширить $\alpha + \gamma$ -область и сдвинуть границу между $\alpha + \gamma$ - и α -областями к 5% Si. Поэтому в наиболее часто применяемых в промышленности сплавах, которые содержат до 5% Si, лишь незначительная часть кристаллитов превращается в γ -фазу при температурах выше 1073 К. По этой причине обычный отжиг проводится ниже данной температуры. При наличии 0,1% углерода граница $\alpha + \gamma$ -области распространяется до 7...8% Si.

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛИТКОВОГО СПЛАВА КРЕМНИЯ С ЖЕЛЕЗОМ

Изучение железокремнистых сплавов, начатое Хадфилдом [226], выявило ряд их интересных свойств. В 1882 г. Хадфилд обратил внимание на твердость случайно полученного сплава, содержащего свыше 1,5% Si. Затем появились сообщения других авторов, в том числе Баррета, Гумлиха, Иенсена, о магнитных свойствах этих спла-

вов [204; 224; 227]. В дальнейшем свойства железокремнистых сплавов изучались многими исследователями на монокристаллических и поликристаллических образцах, полученных методом порошковой металлургии. В таблице 1.1 показаны значения магнитных характеристик, полученных на железокремнистом сплаве.

Результаты, полученные в лабораторных условиях, показывают, что кремнистое железо с содержанием 6,3... 6,5%

Таблица 1.1

**Магнитные свойства лабораторных образцов
железокремнистых сплавов**

Исследователь	Год	Si, %	Магнитная проницаемость μ , Гн/м	Потери при магнитной индукции $B = 1 \text{ Т}$, Вт/кг	Примечание
Баррет и др.	1902	2,9	45	26,9	—
Гумлих	1909	3,9	61	18,6	—
Иенсен	1915	3,4	630	7,2	—
Чиоффи	1932	4,0	160	12,7	Магнитная постоянная $\mu_0 = 40 \text{ Гн/м}$
Рудер	1934	4,2	—	10,5	Монокристалл
Госс	1934	3,0	180	9,8	$\mu = 80 \text{ Гн/м}$ при 5...1,6 Т
Иенсен	1936	3,0	830	8,6	
Вильямс	1937	3,8	14 000	17,4	Монокристалл
Вутби	1942	6,3	5000	6,75	Термомагнитная обработка
Гоертс	1951	6,5	38 000	11,80	Монокристалл
Для сравнения: электротехническая сталь	1950	3,0	500	3,75	Текстурованная

Si является перспективным магнитомягким материалом с повышенной проницаемостью и малыми потерями на перемагничивание. Сплав железа с кремнием представляет собой твердый раствор замещения. Эффективный диаметр атомов кремния меньше диаметра атомов железа, поэтому постоянная решетки с увеличением содержания кремния уменьшается. При содержании 5% Si начинается упорядочение сплава. Полное упорядочение может быть достигнуто при содержании в железокремнистом сплаве 14,35% Si. Снижение плотности сплава (кг/м^3) в зависимости от содержания кремния можно вычислить по формуле Гумлиха [224]:

$$\gamma = (7,8740 - 0,0622p) \cdot 10^3, \quad (1.1)$$

где p — содержание кремния, % (по массе).

Легирование железа с кремнием приводит к увеличению удельного электрического сопротивления сплава. Зависимость удельного электрического сопротивления от процентного содержания кремния определяется следующим соотношением:

$$\rho = (0,10 + 0,12/7) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}. \quad (1.2)$$

Отрицательное действие кремния на магнитные свойства сводится к снижению магнитной индукции насыщения. По данным Меськина [84], магнитная индукция насыщения снижается на 0,048 Т на каждый процент кремния:

$$B_{\max} = (2,160 - 0,048p). \quad (1.3)$$

Такое изменение наблюдается при содержании кремния до 14%. При дальнейшем увеличении доли кремния индукция насыщения уменьшается, а при 33% ферромагнитные свойства сплава исчезают.

Температура Кюри, как и индукция насыщения, с увеличением доли кремния, по данным Фаллота [216], снижается. До содержания 6,5% кремния она снижается с 1053 до 983 К.

Карр [211] исследовал зависимость констант магнито-стрикции λ_{100} , λ_{111} от содержания кремния (табл. 1.2).

Таблица 1.2

**Зависимость констант магнитострикции
от содержания кремния**

Константа магнитострикции	Содержание кремния, % (по массе)						
	1,5	3,0	4,0	5,0	6,0	6,5	7,0
λ_{100}	$27 \cdot 10$	$26 \cdot 10$	$22 \cdot 10$	$17 \cdot 10$	$2 \cdot 10$	0	$-5 \cdot 10$
λ_{111}	$-7 \cdot 10$	$-5 \cdot 10$	$-2 \cdot 10$	0	$2 \cdot 10$	$3 \cdot 10$	$3,5 \cdot 1$

При тех же изменениях содержания кремния постоянная магнитной анизотропии K_{\parallel} , по данным Тарасова [245], уменьшается почти линейно с $42,5 \cdot 10^3$ до $16 \cdot 10^3$ Дж/м³. Учитывая, что постоянная магнитной анизотропии неуклонно падает, а коэрцитивная сила связана определенным соотношением с постоянной анизотропии ($H_c \approx K_{\parallel}$), можно объяснить наблюдаемое снижение коэрцитивной силы с увеличением доли кремния.

При содержании Si, равном 6,5%, имеет место наибольшее значение магнитной проницаемости, что обусловлено двумя причинами: близким к нулю значением магнитострикции и малым значением постоянной анизотропии.

1.3. СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ЖЕЛЕЗНОГО ПОРОШКА

Для магнитопроводов применение технологии порошковой металлургии обусловлено главным образом экономическими соображениями. Изготовление из порошков магнитопроводящих деталей, особенно сложной формы (плюсных наконечников, шунтов, экранов и т. п.), более рентабельно по сравнению с обычными способами производства (литьем, штампованием, резанием). Например, по данным, приведенным в работе [154], затраты на производство магнитопроводов штампованием обходятся в 2 и более раз дороже, чем на изготовление способом спекания (см. табл. 1.3).

Изделия из штампованного железного порошка (спеченного железа) имеют сравнительно малую максимальную магнитную проницаемость ($13,8 \dots 31$ Гн/м) и большую коэрцитивную силу ($126,4 \dots 244,9$ А/м) [7]. Кроме того, спеченное железо, изготовленное из разных исходных порошков, имеет большой разброс по магнитным свойствам (см. табл. 1.4).



Таблица 1.3

**Сравнительные технико-экономические
показатели производства 1 т изделий
из железного порошка и электротехнической стали**

Показатель	Методы изготовления деталей	
	Механическая обработка	Порошковая металлургия
Удельные сопряженные капитальные вложения, тыс. руб.	3,1	2,0
Материалоемкость, т	2,3	1,05
Себестоимость, тыс. руб.	2,3	0,9
Коэффициент использования материала	0,3...0,5	0,95
Число переходов (технологических операций), шт.	30...40	4...6
Экономия литых металлов, т	—	1,5
Выработка на одного рабочего, т	2,5	5,0
Высвобождение рабочих, чел.	—	0,19
Высвобождение металлорежущих станков, шт.	—	0,08
Срок службы изделий, год	1,0	1,5...10
Экономическая эффективность, тыс. руб.	—	1,0...4,2

Таблица 1.4

**Магнитные свойства материалов,
спеченных из разных исходных порошков***

Железный порошок	Плотность изделия, кг/м ³	Максимальная магнитная проницаемость μ_{max} , Гн/м	Напряженность H , А/м, при индукции $B = 1$ Тл	B , Тл, при $H = 3160$ А/м	Остаточная индукция B_r после намагничивания до 1 Тл	Коэффициент сыла H_c после намагничивания до $B = 1$ Тл
Электролитический	6820	31	308,1	1,27	0,93	126,4
Обезуглероженная измельченная стальная дробь	6690	21,5	1106	1,1	0,9	158

Продолжение табл. 1.4

Железный порошок	Плотность изделия, кг/м ³	Максимальная магнитная проницаемость μ_{\max} , Гн/м	Напряженность H , А/м, при индукции $\beta = 1$ Тл	B , Тл, при $H = 3160$ А/м	Остаточная индукция B_r после намагничивания до 1 Тл	Коэффициент β после намагничивания до $B = 1$ Тл
Восстановленная в водороде измельченная окалина	6200	13,4	2370	1,03	0,85	244,9
Восстановленный в водороде оксид железа из скрапа	6010	13,8	3160	1	0,83	229,1
Малокремнистое железо (полюсное)	7850	60	158	1,56	0,9	59,25
Для сравнения Ст. 10	7850	13	395	1,62	0,65	158

Примечание. * *Lenel, F. Metals Technology.* — 1945. — 1 TP, 1788. — P. 13–19.

Таблица 1.5

Магнитные свойства образцов из спеченного железного порошка (после однократного прессования и спекания)*

Железный порошок	Магнитная постоянная μ_0 , Гн/м	μ_{\max} , Гн/м	B , Тл, при H , А/м					A/m	B_r , Тл	Плотность, кг/м ³
			7,9	79	790	7900	11 850			
Карбонильный*	20	240	0,0805	1,28	1,52	1,75	1,83	11,14	0,62	7895**
Электронический**	4,5	154	0,01	1,23	1,54	1,77	1,84	23,7	0,9	7850

Примечания. * Содержание: 0,0026% С; 0,0028% O₂; остальное Fe.

** Содержание: 0,0051% С; 0,015% O₂; остальное Fe.



В той же работе показано, что значительно более высокие свойства удается получить при спекании магнитомягких материалов из особо чистых металлических порошков при высоких температурах и длительной выдержке (железного порошка с содержанием 99,96% Fe, никелевого — 99,92% Ni и т. п. при температуре спекания 1573 К с выдержкой до 24 ч) [7]. При этих условиях можно получить магнитные материалы с высокой плотностью и хорошими магнитными свойствами (см. табл. 1.5).

Для увеличения плотности магнитомягкого материала на основе железа была проведена работа по получению железного порошка с присадкой фосфора [199]. Легирование железа фосфором рассматривается обычно как средство интенсификации процесса спекания, позволяющее несколько снизить электрические потери и повысить электрическое сопротивление. Для этого использовался водный раствор диаммония фосфата $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, при разложении которого в процессе термической обработки порошка образуется фосфор. Образцы, изготовленные с содержанием фосфора 0,1...1,5% при давлении прессования 800 МПа и кратковременно спеченные при температуре 1423 К в водороде, уплотняются до 6950 кг/м³ (табл. 1.6).

Присадка фосфора к кремнистому железу с 4,5% Si увеличивает магнитную индукцию на 5...8% при снижении потерь на 8...10% [120; 154]. На магнитные свойства

Таблица 1.6

Свойства образцов, спеченных из железофосфорного материала

Содержание фосфора, %	μ_{max} , Гн/м	H_c , А/м	B, T при $H = 10 \text{ А/м}$	Плотность, кг/м ³
0,1	17	197,5	1,00	5500
0,2	18	197,5	1,00	6500
0,3	20	158,0	1,00	6600
0,4	22	142,2	1,00	6600
0,6	26	118,5	1,20	6800
0,8	33,5	118,5	1,35	6800
1,0	36	118,5	1,40	6900
1,5	16	173,8	1,05	6950

железифосфорных материалов влияет не только режим прессования и спекания, но и состав исходных порошков, состав защитной среды спекания и т. д. Свойства изделий, спеченных в водороде при температуре 1173 К за 2 ч и вторично при 1523 К в течение 4 ч, значительно выше, чем спеченных при температуре 1443 К за время 4 ч в конвертированном газе [178]. Следовательно, использование чистых порошков и сильных восстановительных сред позволяет повысить свойства железифосфорных сплавов.

1.4. СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАГНИТОМЯГКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА КРЕМНИЯ С ЖЕЛЕЗОМ

Введение кремния повышает удельное электрическое сопротивление сталей и тем самым понижает вихревые токи пропорционально росту удельного электрического сопротивления. Применение магнитопроводов из спеченных цельнопрессованных материалов в устройствах переменного тока затруднено из-за больших удельных потерь в них по сравнению с пакетированными магнитопроводами из электротехнической стали, так как потери на вихревые токи растут пропорционально квадрату толщины листа. Попытки получить магнитопроводы из порошковых железокремнистых материалов с плоскими диэлектрическими прослойками пока не увенчались успехом [172].

Повышение доли кремния увеличивает хрупкость материала (листы с содержанием 2% Si допускают 10 перегибов на 180°, а материал с 4,5% Si разрушается уже после первого перегиба), поэтому сплавы с 6,3...6,5% Si не нашли широкого применения в технике. Ввиду малой технологичности листового кремнистого железа с практической точки зрения представляют интерес данные о свойствах спеченных магнитомягких материалов из кремнистого железа.

В таблице 1.7 указаны характеристики лабораторных образцов из спеченных магнитомягких материалов [138; 139; 140; 141; 199]. Для сравнения в таблице также приведены характеристики электротехнической кремнистой

Таблица 1.7

Свойства спеченных магнитомягких материалов

Материал	Магнитное поле	Магнитная индукция Тл, при напряженности, А/м						Удельные потери, Вт/кг	
		80	160	400	800	1200	1600	при $B = 0,5$ Т, $f = 50$ Гц	при $B = 1$ Т, $f = 50$ Гц
Fe _с	=	0,2	0,71	1,16	1,32	1,38	1,43	—	—
Fe _н	~	0,03	0,11	0,37	0,64	0,81	0,93	5	21
Fe + + 6,5% Si	=	0,42	0,83	1,05	1,16	1,18	1,21	—	—
Fe + + 6,5% Si	~	0,23	0,48	0,83	1,10	1,17	1,2	1,7	9,5
Fe + 6,5% Si + + 0,06% В	=	0,96	1,04	1,12	1,18	1,2	—	—	—
Fe + 6,5% Si + + 0,06% В	~	0,36	0,59	0,91	1,17	1,22	—	1,2	8,6
Fe + 6,5% Si + + 0,06% В	=	1	1,05	1,11	1,17	1,19	1,21	—	—
После ТМО Fe + 6,5% Si + + 0,06% В	=	0,38	0,59	0,89	1,15	1,18	1,19	1	9,5
	~								
После ТМО Fe + 6,5% Si (жидкофазное спекание)	=	0,87	0,96	1,32	1,51	1,54	1,56	—	—
	~								
Fe + 6,5% Si	=								
	~	0,29	0,6	1,03	1,12	1,17	1,22	1,2	6,5
Э11	=								
	~	0,30	0,94	1,1	1,31	1,38	1,41	2,1	5,8
Э330	=								
	~	1,08	1,15	1,53	1,70	1,75	1,8	0,33	0,96

Примечание. = — постоянное магнитное поле; ~ — переменное магнитное поле (50 Гц).

стали по ГОСТ 21427.1-83. Видно, что свойства образцов из спеченных магнитомягких материалов по ряду параметров хуже, чем у образцов из электротехнической стали с 1...4% Si. Однако если характеристики электротех-

нической стали практически достигли верхнего предела и трудно надеяться на резкое их повышение, то для изделий из спеченных магнитомягких материалов существует большой резерв по совершенствованию характеристик. В этом направлении уже сделаны первые шаги. Стремясь улучшить свойства изделий из спеченных магнитомягких материалов, исследователи изменяют состав образцов, давление, условия спекания и т. д.

Металлографические исследования железокремнистых сплавов [135], спеченных при температуре 1573 К в течение 20 ч, показали, что, как правило, в структуре сплавов преобладают мелкие поры от $1 \cdot 10^{-6}$ до $40 \cdot 10^{-6}$ м овальной формы. Количество пор при повышении доли кремния в сплаве увеличивается. Исключение составляет сплав, содержащий 6,5% кремния, с более крупными (до $100 \cdot 10^{-6}$) порами сферической формы, причем в меньшем количестве, чем сплавы с большим и меньшим содержанием кремния. Диаметр зерен сплава изменяется в зависимости от содержания кремния по кривой с выраженным максимумом, соответствующим 6,5% Si. Рентгеноструктурным и металлографическим исследованием, проведенным с целью определения фазового состава сплавов с 6...8% Si, установлено, что эти сплавы представляют собой твердый раствор кремния в α -железе.

Попытки улучшения магнитных свойств спеченных железокремнистых сплавов описаны в работах [135; 140; 154; 199], где исследовалась роль циклического и жидкофазного спекания, термомагнитной обработки (ТМО) и влияние присадки бора и фосфора. Измерения в постоянных полях показали, что магнитные характеристики образцов, полученных при циклическом режиме спекания, уступают характеристикам образцов, полученных при обычном изотермическом режиме [136]. Сравнение микроструктуры образцов, спеченных при изотермическом и циклическом режимах, показало, что в первом случае образцы более однородны по диаметру зерен и содержат поры с менее развитой поверхностью.

Для активации процессов спекания и получения сплавов с низкой пористостью в практике порошковой

металлургии широко используется спекание в присутствии жидкой фазы. Возможность жидкофазного спекания применительно к железокремнистым сплавам изучена в работе [136]. Исследовано спекание железокремнистых сплавов с 6,5% Si при различных количествах жидкой фазы. Образцы для спекания без жидкой фазы прессовались из расплавленного порошка сплава с 6,5% Si. Жидкую фазу в количестве 7...32,5% массы получали смешиванием в необходимых пропорциях порошков железа и ферросилиция различного состава — 20, 57, 75% Si, остальное — Fe (табл. 1.8). Образцы прессовали при давлении 1500 МПа и спекали при температуре 1523 К в течение 5 ч в атмосфере диссоциированного аммиака. Пористость спеченных образцов из смесей, содержащих большое количество легкоплавкой лигатуры Fe–Si, и образцов из легированного порошка с 6,5% Si оказалась очень высокой. Это объясняется повышенным содержанием в исходных смесях твердых и хрупких порошков ферросилиция. В процессе спекания образцы росли, увеличивались в объеме, вследствие чего имели в окончательном виде низкие значения магнитной индукции и проницаемости. Пористость образцов с малым содержанием лигатуры была сравнительно высокой, однако из-за неравномерного распределения кремния по всему объему магнитные свойства получались низкими. Металлографические исследования образцов, спеченных в присутствии жидкой фазы, показали наличие в сплаве продуктов окисления.

Таблица 1.8

**Состав порошковых смесей
для получения сплавов 6,5% Si жидкофазным спеканием**

Количество жидкой фазы, %	Состав смеси			
	Fe + 57% Si	Fe + 75% Si	Fe + 20% Si	Порошок железа
7	5	4,86	—	90,14
11	11,4	—	—	88,6
15	9	—	6	85
20	6,4	—	13,6	80
25	3,8	—	21,2	75
32,5	—	—	32,5	67,5

В случае применения более чистого железного порошка, полученного восстановлением оксида железа марки ЧДА, и крупнодисперсной фракции лигатуры Fe–Si (20% кремния, остальное — железо) с частицами диаметром около $0,15 \cdot 10^{-3}$ м образцы, спеченные в присутствии жидкой фазы, имели существенно лучшие свойства по сравнению с аналогичными образцами предыдущей партии: $B_{100} = 1,51$ Т, $\mu_{\max} = 3440$ Гн/м, $H_c = 72$ А/м.

Спеченные магнитомягкие материалы имеют некоторые особенности по сравнению с литыми: повышенную пористость, мелкозернистость. Однако часто свойства как спеченных, так и литых магнитных материалов находятся в одинаковой зависимости от химического состава и термомагнитной обработки. Ввиду полезного влияния ТМО на свойства некоторых литых магнитных материалов на основе железокремнистого сплава [179] интересны работы по изучению возможности применения ТМО к спеченным магнитомягким материалам в целях повышения их магнитных характеристик [135; 140], в частности магнитопроводам кольцевой формы, содержащим 6,5% кремния, 0,06% бора и остальное — железо [140]. Образцы изготавливались при следующем режиме: удельное давление прессования 800 МПа, температура спекания 1523...1553 К со скоростью охлаждения 120 К/ч. Значение максимальной магнитной проницаемости после обычной обработки составило 900 Гн/м. После ТМО в магнитном поле с напряженностью 400 А/м при температуре 983 К и выдержкой 9,6 мин с последующим охлаждением при скорости 120 К/ч максимальная проницаемость $\mu_{\max} = 147 \cdot 10^2$ Гн/м. Вместе с тем было установлено, что ТМО целесообразно лишь для работающих в условиях постоянного тока цельнопрессованных магнитопроводов из сплава 93,5% Fe и 6,5% Si, максимальная магнитная проницаемость которых не ниже 760×10^2 Гн/м. При меньших значениях проницаемости эффективность ТМО незначительна. Испытание образцов в условиях переменного тока показало, что их магнитные свойства и удельные потери практически не зависят от ТМО, при этом уровень магнитных характеристик

образцов в переменных полях иногда ниже, чем в постоянных полях (см. табл. 1.7, 1.9).

Влияние небольших присадок бора на магнитные характеристики спеченных магнитомягких изделий из сплава кремнистого железа в переменных полях частоты 50 Гц изучено в работе [140]. Бор вводился в виде лигатуры Fe–B (3,9% В и 96,1% Fe) в количествах 0,01...0,15%. Оптимальное содержание бора составляет 0,06%. При этой концентрации увеличивается максимальная амплитудная проницаемость материала, удельные потери снижаются на

Таблица 1.9

Зависимость полных удельных потерь от магнитной индукции спеченного материала на основе системы Fe–Si–B (6,5% Si; 0,06% В, остальное Fe) от ТМО

Индукция, Тл	Полные удельные потери, Вт/кг		Индукция, Тл	Полные удельные потери, Вт/кг	
	до ТМО	после ТМО		до ТМО	после ТМО
0,4	0,7	0,5	0,9	6,4	7,1
0,5	1,2	1	1	8,6	9,5
0,8	4,65	5			

Таблица 1.10

Уравнения, связывающие величины уплотнения порошка с давлением прессования

№	Уравнение	Обозначения	Авторы
1	$z(l/\beta - l) = -\lg p = \lg p_m$	z, m — константы; $\beta = \gamma/d$ — относительная плотность; γ — плотность спрессованного материала; d — плотность материала; p — давление прессования; p_m — давление, соответствующее $\beta = 1$; K, k — константы; β_0 — относительное уплотнение свободно насыпанного порошка; γ_n — насыпная масса; $n = 4$ — для частиц 5 мкм; $n = 3$ — для частиц 20...300 мкм; $n = 2$ — для частиц 300...1000 мкм; σ_T — предел текучести материала порошка; C — коэффициент; A — константа; f_i — коэффициент контактного трения	М. Ю. Бальшин [15]
2	$m \lg B = -\lg p + \lg p_m$		К. Конопицкий [14]
3	$K \lg \beta = p + k \lg \beta_0$		Ж. Смит [56]
4	$\gamma = K p^{1/3} = \gamma_n$		С. Агте, М. Петерлик [48]
5	$\gamma = K p^{1/4} = \gamma_n$		А. Н. Николаев [171]
6	$p_{11} = C \sigma_m \text{Pln}[\beta(l - \beta)]$		Г. М. Жданович [58]
7	$p_0 = p_k [1 + (1/2)A\beta]$ $\frac{(\beta_0^n - \beta^n)}{\beta^n (\beta_0^n - 1)}$ $n = f(\sigma_T \sigma_B, p_k, f_i, \beta_0)$		

30...40%. Положительное влияние бора связано, по-видимому, с его свойствами раскислителя.

С постепенным увеличением содержания кремния общие удельные потери снижаются, достигая минимума при 6,5% Si, а затем растут; индукция же насыщения при этом постоянно уменьшается.

Магнитные характеристики образцов определяются глубиной проникновения Z в них переменного магнитного поля. Это связано с действием вихревых токов, препятствующих проникновению поля. Для эффективного использования материала магнитопровода в переменных полях необходимо, чтобы выполнялось соотношение $h \leq 2Z$, где h — толщина образца или изделия.

В работах [15; 35; 58; 170; 171; 214] рассмотрены процессы прессования металлических порошков, выяснены количественные зависимости плотности прессовки от давления прессования (табл. 1.10). При реальном прессовании изделий давление подбирается таким образом, чтобы остановиться на стадии достижения плотной упаковки частиц. Дальнейшее увеличение давления нецелесообразно, так как достигаемое при этом уплотнение невелико.

Работы М. Ю. Бальшина заложили основы контактной теории прессования металлических порошков. Однако приведенные в таблице 1.10 основные уравнения 1...5 пригодны лишь для небольших интервалов давления. Теоретически эти зависимости выведены в основном для случаев, когда уплотнение происходит за счет деформации частиц, т. е. без учета уплотнения за счет скольжения частиц порошка. Уравнение (6) недостаточно обосновано, так как коэффициент контактного трения между частицами порошка равен 0,58. Кроме того, это уравнение не имеет физического смысла при начальном и критическом краевых условиях прессования, так как $p_n = 0$ лишь при $P = 0,5$, тогда как для большей части металлических порошков $\beta < 0,5$, а при $\beta \rightarrow 1$ $p_n \rightarrow \infty$, но в действительности $p_n \rightarrow p_k$. Кроме того, при выводе уравнения (6) за начальную площадь сечения образца принята площадь его «металлического» сечения, а за конечную — площадь сечения пор, лежащих в плоскости, перпендикулярной направлению

приложения давления. Таким образом, в процессе уплотнения площадь «металлического» сечения возрастает, а площадь пор уменьшается.

Г. М. Жданович [58] теоретически и экспериментально доказал, что простой и достаточно точной интерполяционной формулой уравнения прессования является уравнение (7) (см. табл. 1.10). Это уравнение учитывает реальный процесс прессования с учетом затрат давления на преодоление сил внешнего трения прессовки о стенки пресс-формы.

В работе [139] экспериментально установлена зависимость магнитных характеристик кольцевых образцов из различных материалов от их размеров (наружного и внутреннего диаметров образцов и их толщины). Показано, что при намагничивании переменным полем магнитные свойства зависят от геометрических параметров.

Комплексные исследования магнитных, электрических, механических свойств и структуры порошковых материалов системы Fe–Si в концентрационной области кремния 0...12% (вес.) приведены в работе [159]. Были определены концентрационные границы образования неупорядоченного раствора кремния в α -железе — 0...6,5%, упорядоченного раствора, что подтверждается близким к нулю значением магнитострикции — 7...10% и началом образования силицида Fe_3Si — более 10%. Образцы, содержащие 7...10% Si, имели следующие оптимальные магнитные, электрические и механические свойства: $H_c \leq 90$ А/м, $B_s \sim 1,2$ Т, $\rho \geq 130 \cdot 10^8$ Ом·м, HR 5/100 ≥ 100 .

При этом прессование производили при односторонней нагрузке 700 МПа, с последующим спеканием в вакууме при 1423 К в первой и второй партиях и при 1573 К в третьей партии образцов.

По данным [154] изучено влияние технологического цикла (прессование — спекание — допрессовка — отжиг) на магнитные свойства магнитопроводов. При такой обработке индукция увеличилась на 15...30%, а коэрцитивная сила уменьшилась на 25% по сравнению с однократным прессованием. В работе также использовалось спекание токами высокой частоты (ТВЧ). Спекание ТВЧ в

течение 15 с при 1473 К дало такие же результаты, как и спекание в печи при 1323 К в течение 1 ч. Образцы после спекания ТВЧ имели ферритную структуру.

В работе [119] исследовались процессы уплотнения и изменения межчастичных контактов при твердофазном спекании порошковых тел. В частности, определена зависимость электрической проводимости ρ от пористости θ образцов. Эти данные имеют ценность, так как металло-керамические магнитопроводы являются пористыми телами, а пористость, повышая удельное сопротивление материала, может сократить потери на перемагничивание.

1.5. КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В современной физике твердого тела принята классификация дефектов по количеству микроскопических измерений (линейных), которые имеют эти дефекты. Различают следующие типы нарушений кристаллической структуры:

- точечные дефекты — вакансии, междоузельные атомы и их комбинации;
- линейные дефекты — дислокации;
- двухмерные дефекты — границы между зернами одной фазы и зернами различных фаз, а также внешние поверхности.

Теоретически и экспериментально доказано, что равновесная концентрация точечных дефектов в твердых телах при нормальных условиях незначительна, поэтому влиянием точечных дефектов на магнитные свойства в первом приближении (по сравнению с вкладом, вносимым в изменение магнитных свойств одно-, двух- и трехмерными дефектами) можно пренебречь. Влияние двухмерных дефектов на свойства магнитных материалов разнообразно и может зависеть от многих факторов. Однако если толщина образцов в процессе исследования не меняется и превышает размеры доменов, то зависимостью магнитных свойств от внешних поверхностей можно пренебречь.



Влияние внутренних поверхностей — межзеренных и субзеренных границ — на магнитные свойства в значительной мере может быть учтено посредством влияния дислокации на эти свойства.

Рассмотрим подробнее влияние дислокации на коэрцитивную силу и проницаемость магнитных материалов.

1.6. ВЛИЯНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ НА СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дислокации — это одномерные дефекты в кристаллической решетке, измерение которых имеет макроскопический размер.

Магнитные заряды, возникающие из-за неоднородности спонтанной намагниченности, а также упругие напряжения вблизи дислокаций оказывают существенное влияние на процессы смещения доменных границ и процессы вращения спонтанной намагниченности, которыми определяются свойства магнитных материалов.

Благодаря существованию упругого поля около дислокации и магнитострикции возникает дополнительная магнитоупругая анизотропия, которая при больших значениях констант магнитострикции λ_{100} и λ_{111} может существенно влиять на восприимчивость и коэрцитивную силу ферромагнетика. Энергия магнитоупругой анизотропии для материала с кубической решеткой может быть записана следующим образом [92]:

$$E_{\sigma} = -\frac{3}{2}\lambda_{100}(\sigma_{xx}\alpha^2 + \sigma_{yy}\beta^2 + \sigma_{zz}\gamma^2) + 2\lambda_{111}(\sigma_{xy}\alpha\beta + \sigma_{yz}\beta\gamma + \sigma_{xz}\alpha\gamma),$$

где λ_{100} , λ_{111} — магнитострикционные константы; α , β , γ — направляющие косинусы углов спонтанной намагниченности относительно трех осей легкого намагничивания; σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{xz} — компоненты тензора упругого поля.

Влияние дислокационной структуры на магнитные свойства материалов зависит от типа дислокаций (краевые, винтовые), их ориентации и вектора Бюргерса.

Влияние дислокаций на свойства магнитных материалов обусловлено главным образом магнитоупругим взаи-

модействием. Е. Кондорским [155] впервые была развита общая теория структурно-чувствительных свойств, обусловленных магнитоупругим взаимодействием в магнитных материалах.

В работе Ф. Вицены впервые показано влияние плотности дислокаций на коэрцитивную силу ферромагнетика [249]. При переходе междоменной границы через дислокацию магнитоупругая энергия доменов и междоменных границ существенно меняется. Этим взаимодействием междоменной границы с дефектами кристаллической решетки и обусловлено влияние дефектов на восприимчивость и коэрцитивную силу. Вицена получил выражение, связывающее коэрцитивную силу с плотностью дислокаций:

$$H_c = \frac{N^{1/2} \delta^{1/2}}{2I_s L^{3/2} \sin \omega} \left| \frac{\Delta E}{\Delta X} \right| \left| \ln \frac{L}{\delta} \right|^{1/2}, \quad (1.4)$$

где N — плотность дислокаций; L — средний линейный размер домена; δ — ширина междоменной границы; I_s — спонтанная намагниченность насыщения; ΔX — изменение расстояния; E — изменение магнитоупругой энергии при переходе через дислокацию; ω — угол между нормалью к границе скольжения и ее плоскостью.

В работах А. Зеегера и др., в отличие от работ Вицены, учитывается анизотропия магнитострикции и применяется представление о взаимодействии дислокаций с упругими полями в среде по Пичу — Колеру [243]. Рассчитаны силы, действующие на 180-градусную границу, и рассмотрено действие большого числа дефектов на доменную границу. Коэрцитивная сила, обусловленная движением 180-градусной границы:

$$H = \frac{I}{2I_s L_1 L_3 \cos \varphi} F_{\max}. \quad (1.5)$$

Начальная восприимчивость:

$$\chi_0 = 4 \cos^2 \varphi I I_s \frac{L_1 L_2}{L_3} \left(\frac{dF}{dz_{H=0}} \right)^{-1}, \quad (1.6)$$

где L_1, L_2, L_3 — линейные размеры доменов; φ — угол между напряженностью поля и намагниченностью доменов. Усреднение проводится по всем границам.

Наиболее систематическое сопоставление экспериментальных данных с дислокационной теорией восприимчивости и коэрцитивной силы, развитой А. Зеегером и др., было проведено Д. Накамуры [233], Г. Тройбле [247; 248], Г. Бильгером [209; 210] и др.

В опытах Д. Накамуры применялось кремнистое железо следующего состава: 4,03% кремния, 0,08% углерода, 0,07% марганца, 0,02% фосфора, 0,26% хрома, 0,31% меди, 0,007% серы, 0,31% никеля. Монокристаллы, выращенные по методу Бриджмена, получались диаметром $3 \cdot 10^{-3}$ м, длиной $(20 \dots 25) \cdot 10^{-2}$ м, ориентация $\langle 100 \rangle$ с точностью в один градус, что проверялось методом обратных отражений Лауэ. Наличие субзерен проверялось по расщеплению пятен Лауэ при определении их ориентации. Для наблюдения субструктуры поверхности полировались механически и электролитически в хромофосфорном электролите. Затем образцы отжигались в вакууме при 1273 К в течение 2 ч. Для оптического наблюдения субзерен применялось электролитическое травление при 323 К в течение 2...4 ч при плотности тока $(0,02 \dots 0,05) \cdot 10^4$ А/м². Для изучения разориентации субзерен использовался метод рентгеновской дифракции Берга — Баррета. Было установлено, что размер субзерен возрастает при уменьшении скорости выращивания, а их форма нерегулярна по сравнению с субзернами в кристаллах чистых металлов, у которых они имеют вид удлинённых зерен. Кривые намагничивания, изучавшиеся на баллистической установке при комнатной температуре, показали, что образец становится мягче в магнитном отношении при уменьшении скорости выращивания. Субструктура оказывает наиболее сильное воздействие на проницаемость, коэрцитивную силу и остаточную индукцию. Магнитная проницаемость и остаточная намагниченность снижаются при увеличении роста субзерен, а коэрцитивная сила при этом возрастает в несколько раз. При подстановке экспериментальных данных в формулу Д. Накамуры наблюдается качественное согласие с экспериментом, несмотря на то что структура, наблюдавшаяся им, состоит из субзерен, имеющих большие размеры, чем субзерна, рассматриваемые Ф. Виценой.

Остаточная намагниченность зависит от роста доменов обратной намагниченности. Зарождение и рост обратной намагниченности на железокремнистых монокристаллах изучали Л. Бейтс и Д. Мартин [206]. Поверхностные ямки немагнитных включений, по их данным, могут быть центрами зародышей перемагничивания, и появление зародышей может происходить до того, как напряженность поля уменьшилась до нуля.

Г. Бильгер и Г. Тройбле [209; 210; 248] исследовали температурную зависимость коэрцитивной силы кристалла железа. Для изучения влияния дислокаций на коэрцитивную силу образцы изготавливались из чистейшего карбонильного железа, получаемого многократной переплавкой и зонной очисткой. Приводятся результаты измерений коэрцитивной силы недеформированного и пластически деформированного на 24,6% монокристалла железа. Г. Тройбле и Г. Бильгер [209] анализируют полученные экспериментальные результаты на основе представлений, развитых А. Зеегером с коллегами. Сила взаимодействия междоменной границы с дислокацией, по А. Зеегеру, характеризуется следующим выражением:

$$F = \left(\pm \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \pi b \delta \lambda_{100} (C_1 - C_2), \quad (1.7)$$

где δ — ширина междоменной границы; b — вектор Бюргера; λ_{100} — магнитострикционная константа для направления $\langle 100 \rangle$; C_1, C_2 — упругие модули кристаллической решетки.

Этими авторами коэрцитивная сила при температурах, больших 873 К, вычисляется без достаточного обоснования по формуле

$$H_c = \frac{3}{5} \frac{\lambda_{100} \tau}{I_s} \approx \frac{\lambda_{100} G}{I_s}, \quad (1.8)$$

где τ — упругое напряжение в материале; G — упругий модуль сдвига.

Предложенная формула коэрцитивной силы для недеформированных образцов железа также не вполне оправдана, так как в ней не учитывается магнитоупругая анизотропия. Рассчитанная коэрцитивная сила даже качественно



не согласуется с экспериментально наблюдаемой кривой, которая имеет слабо выраженный, но явно наблюдаемый максимум.

Исследованию влияния дислокаций на коэрцитивную силу деформированных монокристаллов кремнистого железа посвящены работы В. Г. Лившица и Е. И. Кривососовой [156...158; 161], где показано, что усредненное значение коэрцитивной силы кремнистого железа пропорционально пластическому удлинению в степени $1/4$. Эта зависимость находится в качественном согласии с теорией Вицены [249] и расчетами Малека [230]. Эти ученые обнаружили, что в результате пластической деформации анизотропия коэрцитивной силы изменяется. При отжиге наклепанных образцов кремнистого железа плотность дислокаций, наблюдаемая методом ямок травления, и коэрцитивная сила уменьшаются, а их анизотропия восстанавливается.

С. Полукарова [238] показала, что в исходном состоянии исследованные образцы после отжига преимущественно имеют винтовые дислокации с вектором Бюргерса $\langle 100 \rangle$. В работе А. И. Мицека и В. Н. Пушкаря [90] также указывается, что в отожженном состоянии дислокационная структура кремнистого железа с 3% Si характеризуется в основном винтовыми дислокациями с вектором Бюргерса $\langle 100 \rangle$. В этом случае коэрцитивная сила должна удовлетворять следующему выражению:

$$H_c(T) = \frac{a_0 C_3 \lambda_{111} \delta^{1/2}}{2I_s \sqrt{L_1 L_2}} \sqrt{3ND \ln \frac{L_1}{\delta}}. \quad (1.9)$$

Соответственно магнитная восприимчивость:

$$\chi_0 = \frac{2I_s^2 \delta^{1/2}}{C_3^3 \lambda_{111} a_0 L_1} \sqrt{\frac{L_2 L_3}{3ND}}, \quad (1.10)$$

где a_0 — параметр кристаллической решетки; C_3 — модуль упругости; λ_{111} — константа магнитострикции; δ — ширина междоменной границы; N — плотность дислокации; D — ширина доменов.

В этой работе экспериментально снята температурная зависимость коэрцитивной силы от константы магнито-

стрикции λ_{111} . Установлено, что при нагревании коэрцитивная сила уменьшается, поскольку этот параметр обладает большей чувствительностью к температуре, чем остальные. Пластически деформированные образцы имеют большую плотность дислокаций, чем те, которые расположены в плоскости $\langle 100 \rangle$ с вектором Бюргера $1/2a \langle 111 \rangle$ [92]. Для таких образцов вычислены H_c и χ_a по следующим формулам:

$$H_c = \frac{a_0 \delta^{1/2} \sqrt{\left[\frac{1}{4} (C_1 - C_2)^2 \lambda_{100}^2 + \frac{1}{3} C_3^2 \lambda_{111} \right]} ND \ln \frac{L_1}{2\delta}}{I_s \sqrt{L_2 L_3}}; \quad (1.11)$$

$$\chi_0 = \frac{2\delta^{1/2} I_s \sqrt{L_2 L_3}}{a_0 L_1 \sqrt{\left[\frac{1}{6} (C_1 - C_2)^2 \lambda_{100}^2 + \frac{2}{3} C_3^2 \lambda_{111} \right]} ND}, \quad (1.12)$$

где C_1, C_2, C_3 — модули упругости; $\lambda_{100}, \lambda_{111}$ — константы магнитострикции.

Зависимость H_c и χ_0 от температуры будет определяться температурной зависимостью λ_{100} , т. е. при нагревании H_c должна возрастать, а χ_0 уменьшаться, что и наблюдается экспериментально.

В работе [92] исследовалось влияние дислокационной структуры на свойства кремнистого железа с 3% Si. Отмечено, что после высокотемпературного отжига при 1573...1623 К плотность дислокаций уменьшается с 10^{12} до 10^{11} дисл/м², при этом коэрцитивная сила монокристаллических образцов резко сокращается с 11,85 до 5,53 А/м. Эти данные позволяют сделать вывод о существенном влиянии дислокационной структуры на свойства отожженного кремнистого железа.

1.7. ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА СПЛАВА КРЕМНИЯ С ЖЕЛЕЗОМ

Впервые теоретическое обоснование гипотезы областей самопроизвольной намагниченности дали Я. И. Френкель и Я. Г. Дорфман [218]. Учитывая конкуренцию между обменными силами и размагничивающим



действием поверхности, они установили, что линейные размеры доменов L связаны с размерами образца l по следующей формуле:

$$L \sim \sqrt{l}. \quad (1.13)$$

Строгую количественную теорию доменов построили Л. Д. Ландау и Е. М. Лившиц [229]. Они исходили из существования в ферромагнитном образце энергий — обменной, анизотропии и магнитной. При воздействии лишь обменных сил на фоне размагничивающего действия поверхности магнитные моменты всех атомов ориентируются параллельно одному и тому же направлению, соответствующему минимальному размагничивающему фактору. Учет анизотропии требует, чтобы упорядочение происходило по осям легкого намагничивания. В то же время минимуму магнитной энергии удовлетворяет такое распределение I_s , при котором вообще отсутствует размагничивающее поле. Эти условия выполняются, если ферромагнетик разобьется на домены так, что результирующая намагниченность образца будет равна нулю, т. е.

$$\sum I_s V_i = 0, \quad (1.14)$$

где V_i — объем i -й области.

При этом появляется энергия, связанная с существованием границ между доменами. Но такое состояние естественно для ферромагнитного образца, следовательно, энергия границ меньше, чем энергия размагничивающего поля. Исходя из этих соображений, Л. Д. Ландау и Е. М. Лившиц [229] предложили замкнутую структуру доменов. В случае одноосного ферромагнетика области имеют форму плоскопараллельных слоев с поверхностями, параллельными оси легкого намагничивания. Вблизи поверхности домены для уменьшения эффекта размагничивания даже ценой увеличения энергии анизотропии принимают форму трехгранных призм, в которых намагниченность направлена перпендикулярно оси легкого намагничивания. Структура Ландау — Лившица имеет замкнутый характер.

Полная энергия кристалла, обладающего структурой Ландау — Лившица, состоит из двух частей — энергии

магнитокристаллической анизотропии замыкающих доменов и энергии доменных границ:

$$E_{\text{л. л}} = KD/2 + \gamma L/D, \quad (1.15)$$

где K — константа анизотропии.

Минимум $E_{\text{л. л}}$ достигается при

$$D = \sqrt{2\gamma KL/I_s}, \quad (1.16)$$

и равен:

$$E_{\text{л. л. min}} = \sqrt{2\gamma KL}. \quad (1.17)$$

В специальной литературе приводится множество работ, касающихся исследований магнитных доменов, например в [62; 246] рассмотрены виды доменов и их границы, взаимодействие границ с дефектами-включениями и свойства ферромагнетиков. В других источниках даны полные и глубокие представления о поведении доменных границ в реальных ферромагнетиках, содержащих неоднородности и дислокации (и о влиянии последних на движение границ) и обладающих существенным магнитным гистерезисом [92; 247].

В работах [6; 11; 31; 32; 53; 59; 101; 206] разбираются вопросы теории доменной структуры и процессов технического намагничивания, рассматриваются теории образования порошковых фигур [222].

Многочисленные испытания показывают, что увеличение числа основных полосовых 180-градусных доменов текстурованного сплава Fe–3% Si, полученное, например, предварительным размагничиванием образца в поле повышенной частоты или введением дополнительных зародышей перемагничивания, приводит к уменьшению магнитных потерь, сужению петли магнитного гистерезиса и соответственно к снижению коэрцитивной силы [152; 220; 235; 236; 244; 251; 252]. Аналогичный эффект наблюдается при воздействии внешних одноосных упругих растяжений сплава Fe–3% Si [151]. Однако происходит и обратное — рост коэрцитивной силы с увеличением площади доменных границ, но только при увеличении плотности замыкающих каплевидных доменов, препятствующих смещению основных 180-градусных границ [220].

Появление неоднородной намагниченности и зарождение доменов показано на дефектах типа полос скольжения [201], на межзеренных границах [153], на царапинах [50], на малоугловых субграницах (границах блоков и двойников) [147; 148], вблизи локальных дефектов-включений [144...150; 200], на микроконцентраторах напряжений [169], на шероховатости поверхности и пустотах [147] и на дислокациях [167].

Значительный интерес представляют публикации Гудинафа, в которых дается дальнейшая разработка количественной теории зародышей перемагничивания и образования порошковых фигур [222]. Работы Нееля [234] посвящены теории доменной структуры тонких ферромагнитных пленок и мелких частиц. Работа Морриша и Ватта [232] касается весьма актуального вопроса определения критических размеров однодоменных частиц.

В работах [101; 124; 212; 220; 237; 248; 253] приведены материалы по экспериментальному изучению методом порошковых фигур и исследованию электронно-микроскопическим методом доменной структуры в магнитомягких ферромагнитных материалах: железе и кремнистом железе. Уильямс, Бозорт и Шокли изучили и объяснили появление порошковых фигур на монокристаллах кремнистого железа с содержанием 3,8% Si после проведения высокотемпературного отжига при 1573 К в атмосфере чистого водорода [250]. Пакстон и Нилан обнаружили на текстурованном кремнистом железе с 3,25% Si после отжига при 1453 К пять основных типов доменных структур: стенки, клинья, ромбики, кружева и мозаику, установили связь между этими фигурами и их кристаллографической ориентацией [237]. Содержание остальных работ также охватывает широкий круг вопросов: образование зародышей перемагничивания [206]; влияние упругих и пластических напряжений (прокатка, полировка) на доменную структуру [29; 104; 105]; связь кривых намагничивания с доменной структурой [159]; зависимость доменной структуры от кристаллографической ориентации образцов [154; 131].

Коэрцитивная сила зависит в основном (при прочих равных условиях) от размеров и состава включений, кристаллической текстуры, внутренних напряжений. Например, в работе [214] для железа показана зависимость изменения коэрцитивной силы от диаметра включений углерода. Для малых размеров включений коэрцитивная сила железа невелика. При увеличении размеров включений, когда они становятся равны ширине междоменной границы (120 нм), имеет место экстремальное значение коэрцитивной силы, равное 159 А/м. При дальнейшем росте размера включений коэрцитивная сила несколько уменьшается.

По данным работ [44; 168], наиболее значительное отрицательное воздействие на магнитные свойства оказывают азотосодержащие включения. Они увеличивают магнитоупругую энергию, в результате чего коэрцитивная сила возрастает с 35 до 87 А/м.

В работе [52] показано увеличение коэрцитивной силы для горячекатаных сталей в зависимости от кристаллической текстуры. Например, для стали 1514 (Э43А) при изменении угла от 0 до 90° коэрцитивная сила увеличивается с 20 до 26 А/м.

В последнее время выявлено, что в окрестности спин-переориентированного фазового перехода на дефектах зарождаются магнитные неоднородности типа 0-градусных доменных границ, которые бывают двух типов, различающихся по структуре. Их найденные области устойчивы, а структура и свойства могут влиять на магнитные характеристики [145].

Кроме того, интересны изученные в последнее время особенности смещения 180-градусных доменных границ полосовой доменной структуры на отдельных циклах переметалливания монокристалльных образцов Fe–3% Si при невысоких индукциях ($B < 1,3$ Т) во вращающемся магнитном поле с частотой 50 Гц. Установлен характер изменения положения доменных границ на поверхности образца, определены скорости их смещения при различных значениях индукции, которые могут быть использованы для определения магнитных потерь монокристаллов [81].

1.8. ВЫВОДЫ ПО ОБЗОРУ ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный обзор показывает, что к настоящему времени осуществлено значительное количество экспериментальных работ, касающихся изготовления и магнитных свойств спеченных магнитомягких материалов на основе кремнистого железа с повышенным содержанием кремния. Однако эти работы разрознены и не поддаются систематизации ввиду отсутствия общей направленности исследований. Авторы стараются получить как можно более высокие магнитные характеристики. В то же время существует учение о дефектах (несовершенствах) кристаллического строения металлов, давно завоевавшее прочные позиции как один из ведущих разделов теоретического металловедения. Поэтому, вероятно, уже сейчас можно объяснить полученные экспериментальные данные на основе новых достижений физики твердого тела и, в частности, на основе учета реальной, содержащей большое количество дефектов структуры спеченных магнитомягких материалов.

Как известно, структурно-чувствительные свойства магнитомягких материалов в значительной степени определяются процессами смещения междоменных границ [52; 92; 105]. В противовес идеальному магнитомягким монокристаллам, где движение доменных границ происходит свободно, в реальных магнитомягких материалах смещениям границ препятствуют дефекты кристаллической решетки. Явлением взаимодействия доменных границ с дефектами кристаллической решетки в основном обусловлены магнитный гистерезис и магнитное последствие. При этом доминирующую роль играют дислокации — важнейший источник внутренних напряжений. Общее выражение магнитоупругой энергии, характеризующей взаимодействие междоменных границ с дислокациями, может быть записано в следующем виде [92]:

$$E_{\sigma} = \int U_{ik} \sigma_{ik}^D dV, \quad (1.18)$$

где U_{ik} — тензор магнитоупругой деформации, обусловленный разориентацией намагниченности (спинов)

внутри междоменной границы; σ_{ik} — тензор упругих напряжений в кристаллической решетке, обусловленный дислокациями; V — объем ферромагнетика.

В магнитомягких материалах значение магнитоупругой энергии должно быть минимальным, поэтому зацепление доменных границ за дислокации незначительно. Перемагничивание осуществляется при малой напряженности магнитного поля, поэтому коэрцитивная сила уменьшается, магнитная проницаемость возрастает, потери сокращаются. В связи с тем, что тензор магнитоупругой энергии зависит от констант магнитострикции, для выполнения вышеуказанного условия, как следует из формулы (1.18), необходимо, во-первых, чтобы константы магнитострикции были близки к нулю, и, во-вторых, чтобы плотность дислокации в материале была сведена к минимуму. Одним из наиболее дешевых материалов с константами магнитострикции, близкими к нулю, является сплав железа с 6,5% Si. Хорошо и то, что у этого сплава малое значение постоянной магнитной анизотропии. Прокатывать такой сплав в листы практически невозможно из-за его повышенной хрупкости, но применение его для магнитопроводов при использовании технологически нового, недавно разработанного способа изготовления вполне оправданно.

С учетом того что магнитопроводы из спеченного магнитомягкого материала имеют низкие характеристики, в данной работе были поставлены следующие основные задачи:

- разработать методы формирования плотности дислокации, позволяющие управлять магнитными характеристиками;
- исследовать термические режимы обработки спеченных магнитомягких материалов в целях поиска новых технологических вариантов с низкими значениями коэрцитивной силы и изготовления на этой основе магнитных систем для реле, трансформаторов, приборов и т. п.;
- разработать магнитопровод для систем переменного тока, позволяющий уменьшить удельные потери;

- сконструировать и изготовить установку для измерения удельных электрических потерь спеченных магнитомягких материалов;
- исследовать зависимости свойств спеченных магнитомягких материалов от технологического процесса и выявить резервы экономии обмоточной меди;
- исследовать распределение магнитной индукции в магнитопроводе и разработать спеченный магнитомягкий магнитопровод с оптимальными геометрическими соотношениями для электромагнитов с внешним притягиваемымся якорем клапанного типа;
- разработать оптимальную форму втягивающей катушки для электромагнитов с внешним притягиваемымся якорем клапанного типа;
- создать конструкцию нового магнитного дозатора для изготовления серийных магнитопроводов;
- исследовать технические возможности элементов магнитных систем, изготовленных методом горячекатаной стали (МГС) для создания новых электротехнических устройств на основе порошковых магнитопроводов;
- произвести анализ существующей формулы расчета удельных магнитных потерь и вывести математически реальную формулу расчета для применения на практике;
- для расширения функциональных возможностей магнитопроводов разработать новые классы магнитных систем;
- определить прочность спеченных магнитных материалов на основе всесторонних механических испытаний;
- математически вывести реальную формулу расчета коэрцитивной силы и максимальной магнитной проницаемости на основе учета взаимодействия доменных границ с плотностью дислокаций и концентрацией доменов.

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. При каком процентном содержании кремния ферромагнитные свойства сплава Fe–Si полностью исчезают?
2. Сколько точек Кюри имеет сплав Fe–Si, содержащий кремний в пределах 15...33%?



3. Вычислить по формуле Гумлиха, на сколько необходимо увеличить содержание кремния в сплаве Fe–Si, чтобы его плотность уменьшилась вдвое.
4. На чем основано объяснение, что при оптимальном содержании кремния в сплаве Fe–Si, равном 6,5%, имеет место наибольшее значение магнитной проницаемости?
5. Вычислить примерную скорость движения 180-градусной доменной границы для сплава Fe–Si по формуле $V = \sqrt{2E/m}$, где $E \approx 5,35 \cdot 10^{16}$ Дж, $m \approx 3,7 \cdot 10^{-20}$ кг.
6. Как изменяется параметр постоянной решетки сплава Fe–Si с увеличением содержания кремния?
7. Вычислить по формуле Меськина, чему будет равна максимальная магнитная индукция насыщения сплава Fe–Si при оптимальном содержании кремния 6,5%.
8. Какое влияние оказывают примеси на магнитные свойства сплава Fe–Si?
9. Как учитываются аллотропические превращения сплава Fe–Si при определении режима его термической обработки?
10. Сколько типов доменных структур обнаружено на текстурированном сплаве Fe–Si, содержащем 3,25% Si?

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наиболее распространенным магнитомягким материалом является чистое железо. Его магнитные характеристики зависят от чистоты и качества изготовления. Для производства образцов магнитопроводов методом порошковой металлургии и их аттестации использовались железные порошки различных марок. Для определения влияния химического состава порошков и изменения гранулометрического состава на магнитные характеристики магнитопроводов были использованы промышленные порошки, выпускаемые ОАО «Северсталь», АО «Тулачермет» и Сулинским металлургическим заводом (СМЗ).

Порошки классифицируются по следующим признакам:

- по способу изготовления — на восстановленные (В) и распыленные (Р);
- по химическому составу — на марки ПЖВ1, ПЖВ2, ПЖВ3, ПЖВ4, ПЖВ5, ПЖР1, ПЖР3, ПЖР5;
- по насыпной плотности — на 22, 24, 26, 28, 30.

Качество порошка железа регламентирует ГОСТ 9849-86. Согласно этому ГОСТ железные порошки получают методом восстановления и распыления расплава водой высокого давления или сжатым воздухом. Химический состав восьми марок порошков приведен в таблице 2.1, гранулометрический — в таблице 2.2.

Выбор различных составов порошков был обоснован тем, что на характеристики магнитных материалов влияют свойства исходных порошков: химический состав, насыпная плотность, содержание лигатур, а также вредных

Таблица 2.1

Химический состав порошков на основе железа

Марка	Массовая доля, %, не более						
	C	Si	Mn	S	P	Потери массы при прокаливании в водороде	Остаток, не растворимый в соляной кислоте
ПЖВ1	0,02	0,08	0,10	0,015	0,015	0,15	0,20
ПЖВ2	0,02	0,10	0,35	0,02	0,02	0,25	0,30
ПЖВ3	0,05	0,15	0,40	0,02	0,02	0,50	0,40
ПЖВ4	0,10	0,15	0,45	0,03	0,03	1,1	0,50
ПЖВ5	0,25	0,25	0,45	0,05	0,05	2,0	—
ПЖР1	0,02	0,05	0,15	0,02	0,02	0,20	0,25
ПЖР3	0,05	0,08	0,20	0,02	0,02	0,50	0,30
ПЖР5	0,10	0,10	0,30	0,03	0,03	1,6	—

Примечание. Не растворимый в соляной кислоте остаток определяют по требованию потребителя.

Таблица 2.2

Гранулометрический состав порошков на основе железа

Способ изготовления порошка	Класс крупности	Выход фракции, %, при размере частиц, мм								
		0,630...0,450	0,450...0,315	0,315...0,250	0,250...0,200	0,200...0,160	0,160...0,100	0,100...0,071	0,071...0,045	Менее 0,045
Восстановление	450	—	10...30		Остальное		10...25	0...20		
	160	—	—	—	0...10		10...30	20...40	20...40	10...30
	71	—	—	—	—	—	—	0...10	Остальное	50...80
Распыление	450	0...5	Остальное				10...30		0...10	
	315	—	0...10	5...20	Остальное		3...50		0...10	
	200	—	—	—	0...1,5	0...15	Остальное		10...25	

Примечание. Порошок с гранулометрическим составом, не указанным в таблице, изготавливают по согласованию с заказчиком.

примесей — углерода или других элементов. Для повышения качества железных порошков на СМЗ применяют восстановительный отжиг в конвейерных печах в водороде при 1070...1170 К с последующим дроблением, измельчением и рассевом. Для легирования железа употребляют поликристаллический порошок кремния марки КПС-1 (ТУ 48-4-319-84). Кроме того, в работе использовался порошок, полученный из готового слитка железа с 6,5% кремния со значительным содержанием примесей: 0,36% углерода, 0,4% марганца, 0,035% серы, 0,02% фосфора. Гранулометрический состав порошков и лигатур проверялся согласно ГОСТ 18318-83.

2.2. ПРЕСС-ФОРМЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Стали, применяемые для изготовления пресс-форм, должны обладать высокими механическими свойствами, хорошей сопротивляемостью истиранию, незначительным коэффициентом линейного расширения, а также иметь минимальную деформацию при термической обработке. Поэтому основные детали пресс-форм производятся в основном из термически обрабатываемых легированных и углеродистых сталей. Некоторые детали изготовленных пресс-форм приведены на рисунке 2.1.

Для больших партий деталей матрицы были выполнены из инструментальных легированных сталей марок Х12М, ХВГ, 9ХС, 5ХВГС и др. В целях повышения эксплуатационной стойкости основных рабочих деталей их

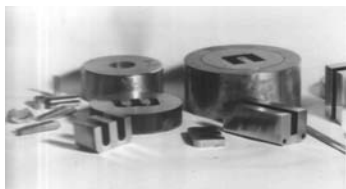


Рис. 2.1
Детали пресс-форм для изготовления различных магнитопроводов

подвергали цементации или закалке до твердости, равной 48...56 по шкале Роквелла. Были изготовлены матрицы из быстрорежущих сталей Р9 и Р18. Наибольшей износостойкостью и максимальной производительностью обладают матрицы, изготовленные из твердых сплавов: ВК4,

ВК6, ВК8, ВК10. Пуансоны несложной формы и небольших размеров были изготовлены из углеродистой инструментальной стали марок У7, У8А, У10; для пуансонов сложной формы были применены инструментальные легированные стали марок Х12М, ХГ, 9ХС, ХВГ, 8ХФ, Х18М. Для улучшения заполняемости полости ферромагнитным порошком матрицы пресс-форм были произведены из стали марок Х18Н9Т, 40Х18Н10Т. Обоймы для всех пресс-форм были изготовлены из стали марки Ст. 3.

При проектировании пресс-форм учитывались следующие основные требования: стабилизация плотности прессуемых изделий (авт. свид. № 1098801); формирование прессуемых изделий заданного качества, форм и размеров; легкое извлечение прессуемых изделий.

2.3. МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Технология получения образцов исследуемых материалов в целом включает следующие основные операции: подготовку и приготовление шихты, ее отжиг, прессование, спекание и отжиг образцов в защитно-восстановительной среде.

2.3.1. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ШИХТЫ

Необходимый состав шихты готовился смешиванием железного порошка (ГОСТ 9849) с поликристаллическим порошком кремния КПС-1 (ТУ 48-4-319-84); в других случаях — измельчением сплава кремния с железом (Fe + 6,5% Si).

Измельчение кремнистого железа (6,5% Si) из слитка является одной из важнейших операций в процессе изготовления магнитопроводов. Предварительное дробление и измельчение слитка из кремнистого железа до размеров частиц $(300...500) \cdot 10^{-6}$ м производили вручную в чугунной ступке. Дальнейшее тонкое измельчение порошка до размеров частиц около $(20...70) \cdot 10^{-6}$ м производили на планетарной центробежной мельнице типа М36Л. На этой мельнице барабаны закреплены в обоймах, расположенных по периферии диска, и вращение осуществляется

вокруг общей вертикальной оси. Мелющими телами в этом устройстве служат стальные шарики. Для минимизации времени измельчения до 300...600 с эмпирически были подобраны шарики трех различных диаметров: $3,2 \cdot 10^{-3}$ м, $5,5 \cdot 10^{-3}$ и $8 \cdot 10^{-3}$ м. Общее соотношение этих шариков в барабане составляет соответственно 17%, 33 и 50%. Кроме того, для уменьшения окисления порошка, улучшения прессуемости и предотвращения образования конгломератов порошка измельчение производили в дистиллированной воде, спирте или эфире. При приготовлении отдельных компонентов размол кремнистого железа и кристаллического кремния производили отдельно. Готовый порошок смешивали с порошком железа в пропорции, необходимой для получения 6,5% Si в спеченных образцах.

2.3.2. ДОЗИРОВАНИЕ ПОРОШКОВОЙ ШИХТЫ

Известно, что дозирование порошкообразных материалов производится в специальных дозирующих устройствах. Для изготовления слоистых магнитопроводов создан соответствующий дозатор (авт. свид. № 708165). Меха-

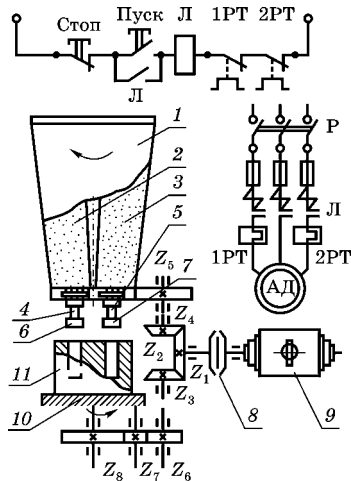


Рис. 2.2

Кинематическая схема дозирующего устройства для порошковой шихты

нические свойства дозируемого материала постоянны, так как в бункер поступает материал, состоящий из частиц определенного размера: от $20 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$ м. Дозатор предназначен для изготовления сложных магнитопроводов, имеющих различные геометрические формы: цилиндрические, усеченно-конические, кольцевые, параболаидальные, подковообразные, эллиптические, тороидальные и т. п. Кроме того, такой дозатор позволяет производить слоистые магнито-

провода. Обычные дозаторы применяются для изготовления цельных магнитопроводов одного типа, а в нашем случае дозирующее устройство является унифицированной конструкцией для изготовления широкого и сложного класса магнитопроводов.

На рисунке 2.2 приведен общий вид предложенного дозирующего устройства для одновременной подачи ферросодержащей порошковой шихты и изоляционной порошковой шихты в пресс-форму. Рядом показана электрическая схема управления главным приводом этого устройства.

Устройство состоит из объемного дозатора 1, содержащего две камеры, одна из которых заполняется ферросодержащей шихтой 2, вторая — изоляционной шихтой 3. Каждая камера имеет устройство для выхода шихты: выходное устройство 4 для ферросодержащей шихты, выходное устройство 5 для изоляционной шихты. Для настройки на различные типы магнитопроводов выходные устройства 4 и 5 могут перемещаться по радиусу основания дозатора. Для регулирования дозы шихты на выходе выходных устройств установлены радиальные изменяющиеся электромагнитные шторки 6 и 7.

Объемный дозатор через двухступенчатый редуктор (содержащий цилиндрическое зубчатое колесо Z_4 и цилиндрическую шестеренку Z_5 , а также коническое колесо Z_1 и коническую шестеренку Z_2) и двустороннюю конусную фрикционную муфту 8 соединен с электродвигателем 9. Весовая головка 10, на которую установлена пресс-форма 11, через трехступенчатый редуктор (содержащий цилиндрическое зубчатое колесо Z_6 , паразитную шестеренку Z_7 и цилиндрическую шестеренку Z_8 , а также коническое колесо Z_1 и коническую шестеренку Z_3) и двустороннюю конусную фрикционную муфту 8 соединена с тем же электродвигателем 9.

Объемный дозатор имеет следующее передаточное отношение:

$$i_{1-5} = Z_1/Z_2 \cdot Z_2/Z_4 \cdot Z_4/Z_5 = Z_1/Z_5. \quad (2.1)$$

Весовая головка имеет следующее передаточное отношение:

$$i_{1-8} = Z_1/Z_3 \cdot Z_3/Z_6 \cdot Z_6/Z_7 \cdot Z_7/Z_8 = Z_1/Z_8. \quad (2.2)$$



Количество зубьев ведомого и ведущего колес рассчитывается таким образом, чтобы передаточные отношения объемного дозатора и весовой головки были одинаковыми, т. е. $i_{1-5} = i_{1-8}$.

Выходные отверстия регулируются электромагнитными шторками. Например, для изоляционного слоя необходимо отрегулировать выходное отверстие так, чтобы иметь интенсивность потока, близкую к аэрозольному напылению.

Дозирующее устройство работает следующим образом. Для пуска электродвигателя (AD) 9 необходимо включить рубильник Р и затем нажать кнопку «Пуск». При этом включается контактор Л и замыкает своими главными контактами статор электродвигателя, подключая его к сети. Весовая головка 10 и дозирующее устройство кинематически соединены через редуктор и начинают вращаться синхронно в противоположных направлениях, каждая с угловой скоростью 0,3...0,8 об/с. Включается электромагнитный механизм, и одновременно открываются шторки 6 и 7, заранее настроенные на определенную интенсивность потока шихты. Начинается одновременное заполнение пресс-формы равномерными слоями по винтовой линии шихтой ферросодержащего и изоляционного материалов. Высота заполнения пресс-формы определяется с помощью шторки, действующей по заранее настроенной выдержке времени. Как только доза порошка достигает заданного уровня, весовая головка опускается и замыкает контакты, которые подают сигнал на закрытие электромагнитных шторок (на рисунке эти элементы не показаны). Шторки срабатывают, объемный дозатор 1 отводится в сторону, и производится прессование. Отключение двигателя осуществляется нажатием кнопки «Стоп». При этом главные контакты контактора Л отключают электродвигатель от сети. Для защиты двигателя от перегрузки в схеме предусмотрены тепловые реле 1РТ и 2РТ.

Это устройство служит также для непрерывной подачи порошковой шихты. Для изготовления многоходовой слоистой магнитной системы достаточно предусмотреть большее число камер в конструкции дозирующего устройства.



2.3.3. ФОРМИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВОЙ ШИХТЫ

Из приготовленной шихты прессовали как цельноспрессованные, так и слоистые магнитопроводы. Образцы магнитопроводов были следующих типов (в зависимости от назначения):

- кольцевые размером $34 \times 25 \times 5 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 2.3) для исследования магнитных измерений;
- П-, Ш-, Т-, Б- и С-образные магнитопроводы для систем переменного тока;
- магнитопроводы для электромагнитов постоянного тока с внешним притягивающимся якорем.

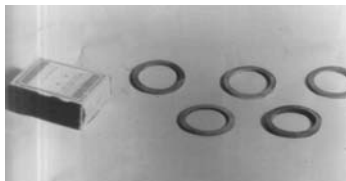


Рис. 2.3
Образцы магнитопроводов из спеченных материалов для измерения магнитных характеристик

Для производства кольцевых магнитопроводов использовался гидравлический пресс типа П-472, позволяющий получать давление до 940 МПа. Для изготовления остальных магнитопроводов применялся гидравлический пресс колонного типа 2ПП-500, позволяющий получать давление до 5000 МПа на всю контактную поверхность. Магнитопроводы для электромагнитов постоянного тока производятся методом изостатического формования в толсто-стенных эластичных оболочках.

Для контроля функционирования прессы разработана электронная схема (авт. свид. № 1028511).

Формование различных вариантов полых сердечников производили на магнитно-импульсной установке типа МИУ-80/10.

2.3.4. СУШКА ПРЕССОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

При влажном прессовании для удаления оставшейся воды из спрессованных изделий производили сушку. Для этого их укладывали ровными рядами на поддоны, помещали в вакуумный сушильный шкаф ВШ-0.035 А и выдерживали при температуре $373 \dots 393$ К в вакууме 13,3 Па (10^{-1} мм рт. ст.) в течение $(108 \dots 144) \cdot 10^2$ с.

2.3.5. СПЕКАНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Метод спекания является неотъемлемой частью физико-технологического способа изготовления спеченных материалов, который представляет собой нагрев спрессованного изделия до определенной температуры с последующей выдержкой и охлаждением. Спекание увеличивает прочность магнитопровода, скрепляя частицы порошка, из которых состоит магнитопровод. В данной работе для упрощения технологии изготовления магнитопроводов совместили спекание и термомагнитную обработку. В этих целях использовали вакуумную электропечь сопротивления типа СШВЛ-0.6.2/16М01, предназначенную для термической обработки (отжига, спекания, плавки) при температуре 1873 К в вакууме $0,065 \cdot 10^{-2}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.).

2.3.6. ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Образцы монокристаллов диаметром $8 \cdot 10^{-3}$ и $15 \cdot 10^{-3}$ м, длиной до $30 \cdot 10^{-3}$ м выращивались методом зонной плавки (методом Бриджмена) на установках типа «Кристалл-ДМ» и «Кристалл-Е». Кристаллизация производилась в алундовых тиглях с конусным дном при скоростях $(0,6 \dots 14) \cdot 10^{-6}$ м/с в атмосфере инертного газа или вакуума $0,065 \cdot 10^{-2}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.).

2.4. ДИАГНОСТИКА ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

2.4.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОРИСТОСТИ

Вначале определяется объем. Объем изделий сложной формы устанавливают методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде. Для этой цели образец взвешивают на воздухе (m_1), после чего поверхность образца покрывают тонкой пленкой (цапун-лак, парафин) для защиты от попадания в поры воды и вновь взвешивают на воздухе (m_2) и затем в жидкости (m_3). Если плотность при обычном определении равна $\gamma_1 = m_1/V$, то при гидростатическом определении объема она составляет



$$\gamma_1 = \frac{m_1}{V} = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \gamma_{ж}, \quad (2.3)$$

где $\gamma_{ж}$ — плотность вытесненной жидкости.

Затем пористость определяют по следующей формуле:

$$\Pi = \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right) 100\%, \quad (2.4)$$

где γ_2 — плотность тела в компактном состоянии.

2.4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

Для качественного изготовления магнитных систем необходимо контролировать влажность порошковой смеси. С этой целью применялся влагомер типа САФ-2. Действие датчика влажности основано на замедлении быстрых нейтронов, излучаемых от источника сплава Pu + Be (плутоний + бериллий), ядрами атомов водорода влаги. Чем больше влаги содержится в приготовленной порошковой смеси, тем большая часть нейтронов замедляется. Замедленные рабочей смесью тепловые нейтроны регистрируются двумя газоразрядными счетчиками в виде импульсов несамостоятельного разряда. Частота импульсов пропорциональна плотности облака тепловых нейтронов, которая, в свою очередь, пропорциональна влажности.

2.4.3. ОЦЕНКА ФОРМУЕМОСТИ

Испытаниями установлено, что гранулометрический состав и влажность смеси определяют ее формуемость, от которой зависит качество прессуемых изделий. В связи с этим разработано и создано устройство (рис. 2.4) для регулирования формуемости смеси (авт. свид. № 1110538).

Порошковая смесь, поступающая в приемный лоток, под действием вибрации группируется в комочки различного размера в зависимости от гранулометрического состава смеси и содержания в ней влаги. Сигналы со сдвигом фаз



Рис. 2.4
Устройство для регулирования формуемости смеси

под электрическим углом, равным $\pi/2 \pm 2\pi l$, вырабатываемые в блоке управления, поступают в электромагнитные вибраторы, которые, вибрируя, создают бегущую волну. Сформированные комочки перемещаются в сторону щели треугольной формы. Масса, сгруппированная в комочки малого размера, проходит через вершину щели и, падая, ударяет по магнитострикционному индикатору, вызывая в схеме сигнал малой амплитуды. Другая масса, сгруппированная в комочки большего размера, проходит дальше от вершины щели и, падая и ударяя по магнитострикционному индикатору, вызывает в схеме сигнал большей амплитуды. В зависимости от величины сигнала автоматически в большей или в меньшей мере открывается однооборотный вентиль, и вода пропускается в увлажнительное устройство. Тем самым с помощью сравнивающего устройства устанавливается оптимальная формуемость смеси через задатчик, относительный параметр которого установлен заранее.

2.4.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

подавляющее большинство магнитомягких материалов используется для работы в переменных магнитных полях. Определение магнитных характеристик основано на индукционном методе измерений и регламентируется ГОСТ 12119.

Магнитные измерения производились методом амперметра-вольтметра (в качестве амперметра применялся электронный вольтмиллиамперметр Ф-563, в качестве вольтметра — электронный вольтметр Ф-534). При необходимости результаты измерений контролировались феррометром Ц-50 и ферротестером ТР-9801/А. Магнитные свойства при перемагничивании с частотой от 50 до 2000 Гц исследовались с помощью звукового генератора ГЗ-34 и двух электронных вольтметров Ф-564. Измерение и контроль магнитной индукции в воздушном зазоре осуществлялись тесламетром типа Ф-4354/1 с датчиком Холла, для более точных измерений использовался миллитесламетр ЭМУ2-20.

При определении магнитных характеристик магнитомягких материалов в постоянных магнитных полях при-

менялся баллистический метод согласно ГОСТ 15058 [105; 132]. Этот метод позволяет проводить исследования на образцах замкнутой формы (кольцо, тороид, квадрат). Исследование кривых намагничивания проводилось на кольцевых образцах размером $\varnothing 34 \times \varnothing 25 \times 5 \cdot 10^{-3}$ м. Перед измерениями на образцы навивалась лента из изоляционного материала — лакошелка, затем наносилась измерительная обмотка $W_1 = 100$ в и поверх нее равномерно по всей окружности — намагничивающая обмотка $W_2 = 200$ в, каждая из которых выполнена из провода диаметром $2 \cdot 10^{-4}$ м.

Испытания магнитотвердых материалов проводились согласно ГОСТ 13601, а определение магнитной индукции, магнитной энергии и напряженности магнитного поля для любой точки размагничивающей части кривой гистерезисного цикла производили на установке У-5022.

Распределение магнитного потока вдоль длины сердечника магнитопровода постоянного тока изучали с помощью милливеберметра типа М1119. Для этого в местах определения магнитного потока наматывали измерительные датчики на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м друг от друга ($W_{\text{изм}} = 4$ в). Отклонение подвижной части прибора пропорционально магнитному потоку, пересекающему витки измерительной катушки, и числу витков катушки. Измерение производят по величине максимального отброса стрелки прибора.

2.4.5. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ УДЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ

Имеется большое число аппаратов для измерения удельных потерь ваттметровым методом, но они крайне неудобны из-за нерационального расхода материалов для контроля, аттестации и исследования. Например, согласно ГОСТ 12119 двухобмоточный аппарат Эпштейна требует для измерения 5 или 10 кг полос исследуемого материала (в зависимости от величины аппарата); кроме того, необходимо иметь специальный генератор.

Для предварительного определения удельных магнитных потерь разработан малогабаритный аппарат

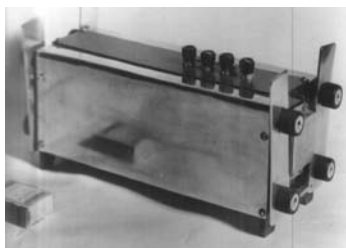


Рис. 2.5
Устройство для измерения
удельных потерь в спеченных
магнитомягких полосах

(рис. 2.5). Этот аппарат применяется в комплекте с измерительными приборами: электронным ваттметром Ф-585, звуковым генератором ГЗ-34, электронным вольтметром Ф-564 и электронным милливольтметром ВЗ-38.

Измеряемые полосы из спеченного материала общей массой 0,13 кг вставляются в параллельные гнезда, которые одновременно являются каркасами катушек. Образец состоит из двух пакетов полос, прижимаемых к ярму с помощью специальных захватов и закрепляемых винтами. На двух каркасах расположены одновременно две катушки: намагничивающая $W_n = 850$ в и измерительная $W_{изм} = 800$ в (каждая обмотка выполнена из провода диаметром $45 \cdot 10^{-5}$ м), причем измерительная катушка находится ближе к испытываемому образцу. На панели аппарата есть клеммы для намагничивающей и измерительных обмоток, которые одновременно служат для подсоединения монтажных проводов схемы.

Размеры измеряемых образцов:

- длина полосы — 0,3 м;
- ширина полосы — 0,03 м;
- толщина полосы — $0,35 \cdot 10^{-3}$, $0,5 \cdot 10^{-3}$ м;
- количество полос в пакете — 1...3 шт.

Испытания показали, что погрешность измерений этим аппаратом для индукции 1,0...1,5 Т составляет не более 3...4%.

2.5. ДИАГНОСТИКА МИКРОСТРУКТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Для наблюдения и изучения микроструктуры применялся растровый электронный микроскоп типа BS-613 с ускоряющим напряжением 100 КВ как для исследования массивных образцов, так и для тонких пленок — на просвет. Размеры исследуемых образцов, как правило, не

превышали $(12...15) \cdot 10^{-3}$ м в диаметре и $(7...10) \cdot 10^{-3}$ м в толщину. Металлографические исследования и регистрацию дефектов проводили на микроскопах типа МИМ-8 и «Неофот-32». Для выявления микроструктуры требовалось приготовить шлифы.

2.5.1. ПОДГОТОВКА ШЛИФОВ ДЛЯ ПРЯМОГО НАБЛЮДЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ

Полировка поверхностей образцов и подбор реактивов — наиболее ответственная часть металлографического исследования. Подготовка качественных шлифов, представляет собой значительные трудности в связи со сложностью выявления точечных дефектов (вакансий, межузельных атомов) и наличием пор. Для выявления картины распределения дислокаций в различных сечениях образцов их разрезают в поперечном и продольном направлениях, электрополируют и травят. Чтобы избежать поверхностного деформированного слоя, появляющегося при механической резке и полировке, резку производят на электроэрозионном станке с последующей электрополировкой. Вначале образцы шлифовались на наждачной бумаге, затем на пастах убывающих номеров от $20 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ м путем притира на плоских стеклянных пластинках. После этого производилась механическая полировка на пастах от $5 \cdot 10^{-6}$ до $0,3 \cdot 10^{-6}$ м с помощью батиста при применении последовательно следующих алмазных паст: АСМ 5/3, АСМ 3/2, АСМ 2/1, АСМ 1/0,3. Травление шлифов в целях выявления зерен проводят в реактиве следующего состава:

2,4% FeCl_2 + 1,9% HCl + 95,7% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (этанола).

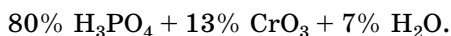
2.5.2. ВЫЯВЛЕНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ

Окончательное заключение о наличии того или иного дефекта делалось на основании прямого наблюдения, так как косвенные доказательства при всей их пользе и важности признать стопроцентными все же нельзя. Для выявления поля линий скольжения лучше всего применить

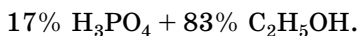


метод ямок травления. Этот метод достаточно прост, а главное — надежен и точен (при применении оптического микроскопа предел разрешающей способности ямок травления составляет $(0,1 \dots 0,6) \cdot 10^{-6}$ м), позволяет исследовать массивные образцы и определять как общую картину распределения дислокаций, так и детали. Выявление дислокационной структуры спеченных образцов после механической шлифовки и полировки на алмазных пастах убывающих номеров производят путем электрополировки и травления в химических реактивах.

Электрополировку шлифов проводят в реактиве следующего состава:



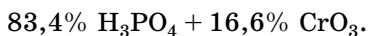
Травление шлифов проводят в реактиве следующего состава:



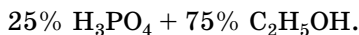
Электрополировка шлифов производилась в течение 20...40 с при плотности тока $1,1 \cdot 10^5$ А/м²; химическое травление — в течение 40...60 с.

Для выявления дислокационной структуры монокристаллов образцы после механической шлифовки и полировки на алмазных пастах убывающих номеров также подвергались электролитической полировке и травлению в химических реактивах.

Электрополировку шлифов проводят в реактиве следующего состава:



Травление шлифов проводят в реактиве следующего состава:



Электрополировка шлифов производилась в течение 30...50 с при плотности тока $1,2 \cdot 10^5$ А/м²; химическое травление — в течение 50...70 с. Далее образцы погружали в 50%-ный водный раствор хромового ангидрида на 300 с, после чего шлифы промывали в воде при температуре 303...308 К и высушивали в струе теплого воздуха.



2.5.3. ВЫЯВЛЕНИЕ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Экспериментальное доказательство существования магнитных доменов в ферромагнитных материалах можно получить в результате прямого наблюдения. Однако наблюдение доменной структуры хорошо известным методом полярного эффекта Керра производить невозможно. При изучении доменной структуры применялся метод порошковых осадков, для чего требовалось приготовить магнитный коллоид. Магнитные коллоиды, используемые в некоторых работах для выявления доменной структуры магнетиков, получают на основе рецепта, впервые предложенного Эльмором [6; 31].

2.6. ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

2.6.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СПЕЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Существующие методики испытания на сжатие литых и кованных металлов и сплавов, которые были применены для спеченных металлов, регламентированы ГОСТ 25503. Образцы для установления предела прочности на сжатие изготавливались прессованием, а потом спеканием круглого сечения с плоскими торцами диаметром $20 \cdot 10^{-3}$ м и высотой $40 \cdot 10^{-3}$ м. Предел прочности на сжатие определялся на разрывной машине модели 2055P-0,5, в которой предусмотрена запись диаграммы испытания в координатах «нагрузка — перемещение».

Толщина образца для испытания на растяжение составляла $6 \cdot 10^{-3}$ м с двумя переходными утолщениями на каждом конце (размеры образцов для испытаний на растяжение приведены в ГОСТ 18227). Испытания проводились на разрывной машине 2055P-0,5 со специальными приспособлениями.

Испытание на кручение проводилось на испытательной машине модели 2014МК-50 с наибольшим крутящим моментом 490 Н·м (50 кгс·м). Объектом испытания служили образцы цилиндрической формы с диаметром рабочей



части $10 \cdot 10^{-3}$ м и расчетной длиной $50 \cdot 10^{-3}$ м (шероховатость рабочей части поверхности составляла $R_a < 0,63$ мкм). Испытание проводилось согласно ГОСТ 3565.

Большое распространение в порошковой металлургии получило испытание спеченных металлов и сплавов на изгиб (ГОСТ 14019). Образец устанавливался на цилиндрические роликовые опоры, оси которых перпендикулярны продольной оси образца, и посередине прикладывалась сосредоточенная нагрузка. Испытания проводились до появления первой трещины в растянутой зоне образца с определением угла изгиба, до параллельности сторон и до соприкосновения сторон испытываемых образцов. Объектом испытания служили образцы прямоугольного сечения размером $10 \times 8 \times 55 \cdot 10^{-3}$ м. Расстояние между опорами при испытании составляло $40 \cdot 10^{-3}$ м.

Испытания на ударную вязкость проводились на маятниковом копре КМ-30, оборудованном шкалой, по которой отсчитывается энергия, затраченная на разрушение образца. Испытания на ударную вязкость согласно ГОСТ 9454 проводились на образцах прямоугольного сечения размером $10 \times 10 \times 10^{-3}$ м.

Весьма распространенный вид испытания — измерение твердости. Твердость порошковых материалов после спекания определялась на приборе ТПП-2 с расчетным диапазоном измерения $8 \dots 1500$ НВ и испытательной нагрузкой 10 Н (ГОСТ 2999). Метод Виккерса считается самым совершенным, поскольку он позволяет измерять твердость как мягких, так и самых твердых материалов.

2.6.2. ИСПЫТАНИЕ СПЕЧЕННЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Заключительным видом исследований магнитных систем является испытание на механическую износостойкость, регламентированное ГОСТ 2933. С этой целью образцы магнитных систем устанавливались на электрические аппараты (контакты, реле, магнитные пускатели, регуляторы и т. д.) и выявлялись предельные условия их функционирования.

Для определения механической износостойкости была разработана автоматическая схема, работающая в непрерывном режиме. Задание режима работы аппаратов производилось мультивибратором, позволяющим регулировать частоту срабатываний от 0,04 до 16 циклов/с и продолжительностью включения (ПВ) от 25 до 80%.

Испытание в зависимости от технических условий проводилось при следующих стабильных частотах: 0,3; 0,6, 1 и 2 цикла/с, при ПВ = 40%. Для этого на электрический аппарат подавалось номинальное напряжение согласно ГОСТ 11206. Число циклов срабатываний аппаратов регистрировалось электроимпульсным счетчиком типа БИС-62. В процессе испытаний контролировались изнашиваемые параметры магнитных систем и фиксировались возникшие дефекты. Испытание проводилось до поломки несменных деталей или до полного их износа.

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Какой марки порошок — ПЖВ1 или ПЖВ5 — по химическому составу является наихудшим для изготовления сердечника магнитной системы?
2. Какой марки порошок — ПЖВ5 или ПЖР5 — по химическому составу является наиболее предпочтительным для изготовления сердечника магнитной системы?
3. Какой элемент порошка из следующего ряда химических элементов: Fe, Mn, Ni, Si, S, C, Al, P, Cu, Mg — по магнитным свойствам является «ядом» для изготовления сердечника магнитной системы?
4. Вычислить насыпную плотность порошка по формуле

$$\rho = m_2 - m_1/V,$$

где $m_1 = 800$ г, $m_2 = 1350$ г, $V = 25$ см³.

5. Какой порошок на основе железа из следующего ряда насыпной плотности: 22, 24, 26, 28, 30 — является наилучшим для качества изделия магнитопровода?
6. Вычислить аддитивную плотность магнитомягкого сплава при прессовании смесей разнородных компонентов, содержащего 96,4% Fe, 5% Si и 0,4% C, по формуле

$$\gamma_c = \frac{100}{P_1/\gamma_1 + P_2/\gamma_2 + P_3/\gamma_3},$$

где P_1, P_2, P_3 — процентное содержание компонентов Fe, Si и C в порошковой смеси, составляющее соответственно 96,4%;



5 и 0,4%; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — удельные плотности компонентов Fe, Si и С в беспористом состоянии, равные соответственно 7,8 г/см³; 2,4 и 2,1 г/см³.

7. Какой марки сплав из следующего перечня: ХВГ, ВК6, У8А, 40Х18Н9Т, Р9, Ст. 3 — предпочтителен для улучшения заполняемости полости матрицы пресс-формы ферропорошком?
8. Вычислить навеску порошка для засыпки в пресс-форму по формуле

$$M = \gamma_c V (1 - \Pi/100) K_1 K_2,$$

где γ_c — удельная плотность порошковой смеси, соответствующая ее компактному (беспористому) состоянию 6,94 г/см³; V — объем готовой детали, 28,26 см³; Π — заданная пористость готовой детали, 7,5%; K_1, K_2 — коэффициенты, учитывающие потери порошка во время прессования ($K_1 = 1,005 \dots 1,09$) и спекания ($K_2 = 1,01 \dots 1,03$).

9. Какие типы магнитопроводов были изготовлены для изучения магнитных материалов?
10. Как влияет пластическая деформация на магнитные свойства сплава Fe-Si?

3 ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ (МПП), НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

3.1. СПЕКАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАГНИТОПРОВОДОВ

Применение сплава железа с 6,5% Si для прокатки в листы невозможно из-за его высокой хрупкости. Использование же сплава этого состава для изготовления магнитопроводов методом порошковой металлургии вполне оправдано экономически, однако они пока не обладают высокими магнитными свойствами [8]. Можно предположить, что режим стандартного спекания (при температуре 1070...1570 К) не обеспечивает необходимого снижения внутренних напряжений, поэтому целесообразно спекать материал при температуре, когда происходит интенсивная самодиффузия, способствующая перемещению дислокаций на большие расстояния и их исчезновению, а также такому их перераспределению, при котором накопленная упругая энергия уменьшается. Снижение внутренних напряжений при более низкой температуре, в частности при температуре движения вакансий, менее существенно.

В режиме перемагничивания для уменьшения вихревых токов необходимо создать соответствующую анизотропию электропроводности в магнитопроводе. В работе [203] с этой целью образцы изготавливались посредством засыпки в пресс-форму по винтовой линии порошков кремнистого железа и диэлектрика. Но при такой структуре образца силовые линии магнитного потока пересекают диэлектрический слой несколько раз, вследствие чего появляются размагничивающие поля, которые значительно уменьшают магнитную проницаемость тела. Этот недостаток можно сгладить, если прессовать магнитопроводы из

Таблица 3.1

**Потери на вихревые токи в спеченных
магнитомягких железокремнистых образцах с 6,29% Si**

Номер образца	Удельные потери на вихревые токи, Вт/кг			
	$P_{0,75/50}$	$P_{1/50}$	$P_{0,75/400}$	$P_{1/400}$
1 (с диэлектрическими прослойками)	0,27	0,46	17,2	28,8
2 (цельнопрессованный)	0,42	1,10	30,8	70,5

Примечание. В индексе к удельным потерям в числителе указана индукция, Т, в знаменателе — частота, Гц.

плоских чередующихся слоев ферромагнитного материала и диэлектрика.

В качестве исходного материала использовался слиток кремнистого железа с 6,29% Si и значительным содержанием посторонних примесей (0,36% С, 0,4% Mn, 0,02% Р, 0,035% S). Наиболее подходящим материалом для диэлектрических прослоек оказался магнитомягкий марганец-цинковый феррит. После высокотемпературного спекания образцы с ферритовыми прослойками не имели расслоений. Коэрцитивная сила образцов находилась в интервале 27,65... 35,55 А/м, максимальная магнитная проницаемость — в интервале 10 000...12 000 Гн/м. Для оценки целесообразности введения диэлектрических прослоек произведены измерения потерь энергии на вихревые токи в равновеликих образцах без диэлектрических прослоек (табл. 3.1).

Приведенные в работе магнитные свойства магнитопроводов из слоистых спеченных материалов с повышенной примесностью приближаются к свойствам аналогичных магнитопроводов из лучших электротехнических сталей, поэтому подобные магнитопроводы могут найти широкое техническое применение.

3.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ НА ДИСЛОКАЦИОННУЮ СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МПМ

Многочисленные исследования кремнистого железа, получаемого из слитков, показали, что дислокационная структура во многих случаях определяет магнитные свойства этого важнейшего магнитного материала

[164; 202]. Получение железокремнистых магнитопроводов методом спекания значительно расширяет возможности эффективного применения в промышленности магнитопроводов из кремнистого железа с 6,5% Si [92]. Как показали измерения магнитных характеристик, с повышением температуры спекания магнитная индукция в слабых полях увеличивается (рис. 3.1), а коэрцитивная сила в зависимости от времени и температуры спекания уменьшается (рис. 3.2). С увеличением температуры спекания от 1570 до 1670 К магнитная индукция в поле напряженностью 100 А/м увеличивается с 0,55 до 0,96 Т, а коэрцитивная сила уменьшается с 40 до 7,9 А/м, при этом пористость и размер зерна сохраняются почти неизменными.

В слабых полях намагничивание происходит посредством смещения доменных границ, при увеличении плотности дислокаций этот процесс затрудняется [92]. Измерения удельных потерь показали, что они неуклонно уменьшаются с ростом температуры спекания (см. рис. 3.3).

Убывание удельных потерь образцов на перемагничивание в 2,5 раза для частоты перемагничивания 50 Гц и в 3,6 раза для частоты перемагничивания 400 Гц с увеличением температуры спекания также связано с уменьшением

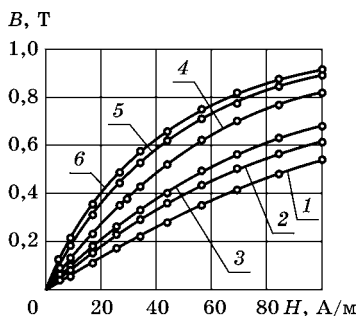


Рис. 3.1

Кривая намагничивания магнитопровода из спеченного магнитомягкого материала в зависимости от температуры спекания:

1 — 1570 К; 2 — 1590 К; 3 — 1610 К;
4 — 1630 К; 5 — 1650 К; 6 — 1670 К.

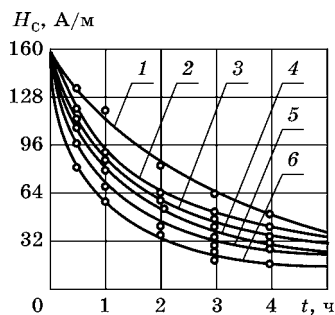


Рис. 3.2

Зависимость изменения коэрцитивной силы магнитопровода из спеченного магнитомягкого материала от времени спекания при различных температурах:

1 — 1570 К; 2 — 1590 К; 3 — 1610 К;
4 — 1630 К; 5 — 1650 К; 6 — 1670 К.

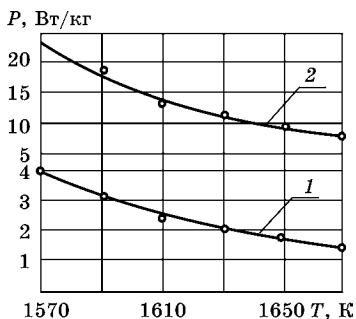


Рис. 3.3
Зависимость изменения удельных потерь магнитопровода из спеченного магнитомягкого материала от температуры спекания:

1 — магнитная индукция 1 Т, частота перемагничивания 50 Гц; 2 — магнитная индукция 1 Т, частота перемагничивания 400 Гц.

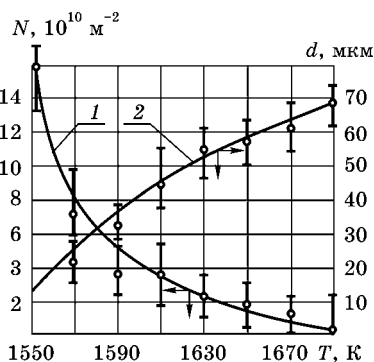


Рис. 3.4
Зависимость плотности дислокаций N и ширины доменов d от температуры спекания железокремнистого материала (6,5% Si):

1 — плотность дислокаций; 2 — ширина доменов.

плотности дислокаций. Подсчет плотности дислокаций показал, что при постепенном росте температуры спекания происходит интенсивная перестройка дислокационной структуры: плотность дислокаций значительно уменьшается (рис. 3.4). На этом же графике показано изменение ширины доменов в зависимости от температуры спекания: при температуре 1550...1690 К средняя плотность дислокаций снизилась с $16 \cdot 10^{10}$ до $0,7 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$. Эти данные показывают, что с уменьшением плотности дислокаций смещение доменных границ происходит свободно, дефекты кристаллического строения металлов этому не препятствуют, поэтому и магнитные характеристики с уменьшением плотности дислокаций повышаются в несколько раз. На рисунке 3.5 представлены микрофотографии дислокационной структуры образцов, спеченных при 1590...1650 К.

На рисунке 3.6 представлена доменная структура образцов, выявленных методом порошкового осадка. Следует отметить, что сплав, содержащий 6,5% Si, имеет константу кристаллической магнитной анизотропии 20 Дж/м^3 , поэтому наблюдение доменной структуры представляет неко-

торую трудность. Микрофотографии доменной и дислокационной структуры образцов, вырезанных из верхней части кристалла, представлены на рисунках 3.7 и 3.8 соответственно.

На микрофотографии (рис. 3.8) видно, что используемый химический травитель в пределах зерен выявляет не только отдельные дислокации, но и субзеренные границы. Ямки травления, характеризующие дислокационную структуру, выявлены избирательным травлением. Они выявляются только после неоднократной переполировки и химического травления; это связано с тем, что травление происходит на кристаллических дефектах, образуемых обычно полировкой поверхности при обработке. Ямки травления часто располагаются в виде цепочек по прямой или искривленной линии, а в некоторых случаях

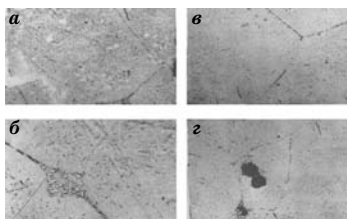


Рис. 3.5

Дислокационная структура магнитопровода из спеченного материала:

a — 1590 К; *б* — 1610 К; *в* — 1630 К; *г* — 1650 К. Увеличение $\times 700$.

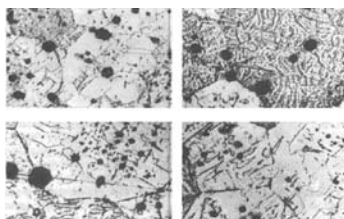


Рис. 3.6

Доменная структура магнитопровода из спеченного материала при температуре 1590 К в течение 1 ч. Увеличение $\times 350$

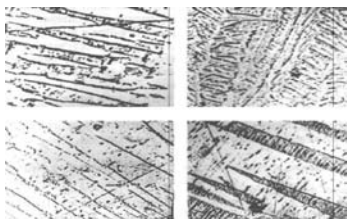


Рис. 3.7

Доменная структура монокристалла кремнистого железа (6,5% Si). Увеличение $\times 350$

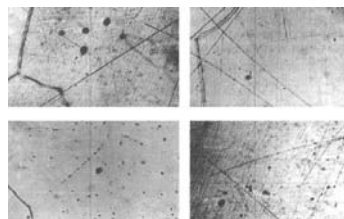


Рис. 3.8

Дислокационная структура монокристалла кремнистого железа (6,5% Si). Увеличение $\times 700$

образуют замкнутые петли и группы. Эти факты дают основание полагать, что выявленные ямки травления соответствуют дислокационной структуре исследуемых магнитопроводов.

Следует отметить, что в российской и зарубежной литературе не встречается упоминаний о выявлении дислокационной структуры на спеченных и кристаллических материалах этого состава. Это, очевидно, связано с трудностью ее выявления.

3.3. ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ СПЕКАНИЯ НА ДИСЛОКАЦИОННУЮ СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МПМ

Чтобы определить изменение магнитных характеристик, необходимо знать изменение плотности дислокаций в зависимости от времени спекания. Однако такие данные также отсутствуют для спеченных железокремнистых образцов с 6,5% Si, которые являются перспективным материалом для магнитопроводов, применяемых в электротехнической промышленности.

С увеличением времени спекания при температуре 1550...1570 К плотность дислокаций снижается (рис. 3.9). Подсчитано, что с возрастанием времени спекания от 0,1 до 4 ч средняя плотность дислокаций уменьшилась с $15,7 \cdot 10^{10}$ до $1,3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$. Кроме того, магнитная проницаемость μ также существенно изменяется с изменением времени спекания (рис. 3.10).

Например, образцы, спеченные в течение 0,1 ч и испытанные в переменном магнитном поле промышленной частоты 50 Гц, имеют максимальную магнитную проницаемость, равную 1730 Гн/м, тогда как образцы, спеченные в течение 4 ч, имеют максимальную магнитную проницаемость, равную 3500 Гн/м, т. е. максимальная проницаемость увеличилась более чем в 2 раза, хотя при этом первоначальная плотность образцов по сравнению с конечной плотностью возросла лишь с 6800 до 6880 кг/м³. Кривая зависимости плотности магнитопровода γ_m от времени спекания приведена на рисунке 3.11. При увеличении времени спекания до 0,5 ч плотность

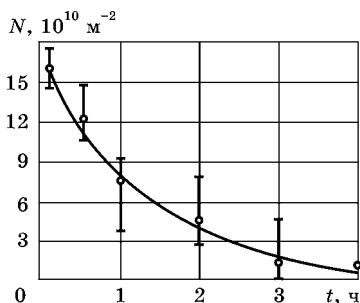


Рис. 3.9
Зависимость плотности дислокаций от времени спекания

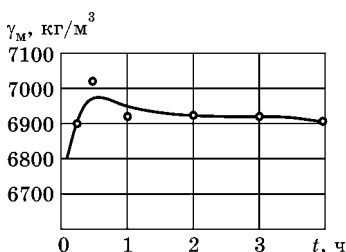


Рис. 3.11
Зависимость плотности магнитопровода от времени спекания

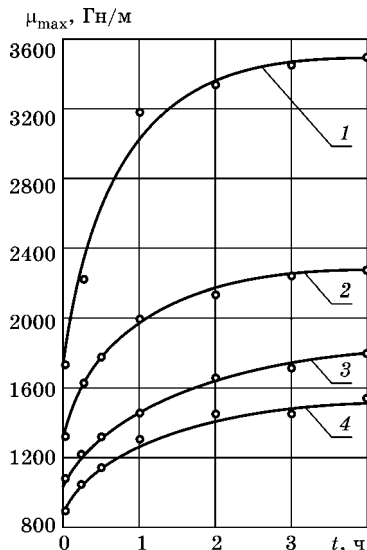


Рис. 3.10
Зависимость максимальной магнитной проницаемости магнитопровода от времени спекания для различных частот перемагничивания:
1 — 50 Гц; 2 — 400 Гц; 3 — 1000 Гц; 4 — 2000 Гц.

образцов возрастает. Однако при дальнейшем увеличении времени спекания плотность даже несколько уменьшается. Это, очевидно, связано с тем, что увеличение времени спекания приводит к некоторому восстановлению окислов.

Для других исследованных частот перемагничивания (400 Гц, 1000 и 2000 Гц) максимальная магнитная проницаемость также увеличивается, что свидетельствует о существенном влиянии дислокационной структуры на максимальную магнитную проницаемость магнитопровода из спеченного железокремнистого материала (рис. 3.10).

Испытания показали, что с увеличением времени спекания плотность дислокаций уменьшается, следовательно, и потери сокращаются (см. рис. 3.12). Изменение удельных потерь и их значения при условии надежной изоляции

между слоями зависят также от толщины слоев магнитопровода. Так, например, для магнитопровода с толщиной слоев $0,2 \cdot 10^{-3}$ м с увеличением времени спекания от 0,5 до 4 ч удельные потери для магнитной индукции 1 Т и частоты перемагничивания 50 Гц снизились от 1,2 до 0,5 Вт/кг (рис. 3.12), т. е. удельные потери в 10 раз ниже, чем для электротехнической стали марки 1521 при толщине листов $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Для магнитопровода с толщиной слоев $0,35 \cdot 10^{-3}$ м с увеличением времени спекания от 0,5 до 4 ч удельные потери снизились с 1,7 до 0,8 Вт/кг (рис. 3.13), что стало сопоставимо с удельными потерями в текстурированной стали марки 3411 для толщины листов $0,35 \cdot 10^{-3}$ м. Для магнитопроводов с толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м с увеличением времени спекания от 0,5 до 4 ч удельные потери снизились с 3,1 до 1,4 Вт/кг (рис. 3.14), что на 15% меньше удельных потерь элек-

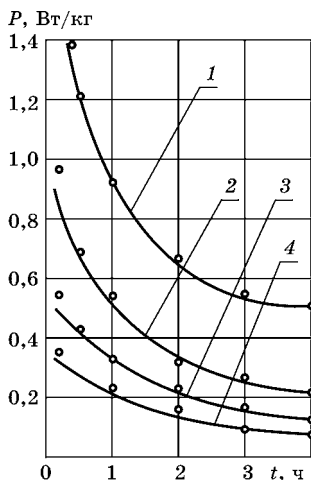


Рис. 3.12

Зависимость удельных потерь от времени спекания магнитопровода из кремнистого железа с толщиной слоев $0,2 \cdot 10^{-3}$ м для различной магнитной индукции:

1 — 1 Т; 2 — 0,75 Т; 3 — 0,5 Т; 4 — 0,25 Т.

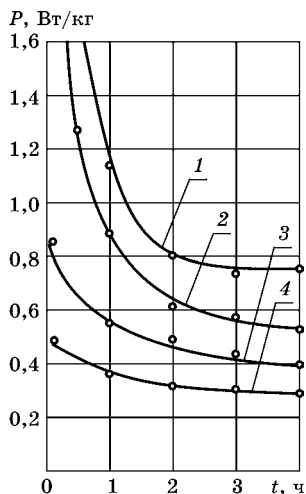


Рис. 3.13

Зависимость удельных потерь от времени спекания магнитопровода из кремнистого железа с толщиной слоев $0,35 \cdot 10^{-3}$ м для различной магнитной индукции:

1 — 1 Т; 2 — 0,75 Т; 3 — 0,5 Т; 4 — 0,25 Т.

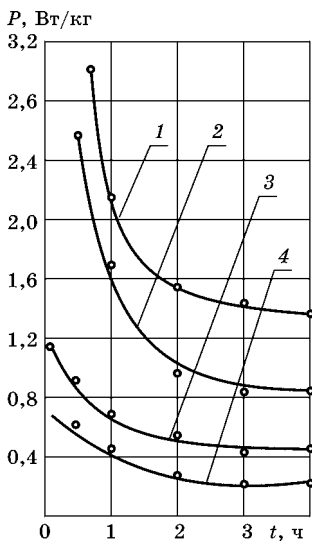


Рис. 3.14

Зависимость удельных потерь от времени спекания магнитопровода из кремнистого железа с толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м для различной магнитной индукции:

1 — 1 Т; 2 — 0,75 Т; 3 — 0,5 Т; 4 — 0,25 Т.

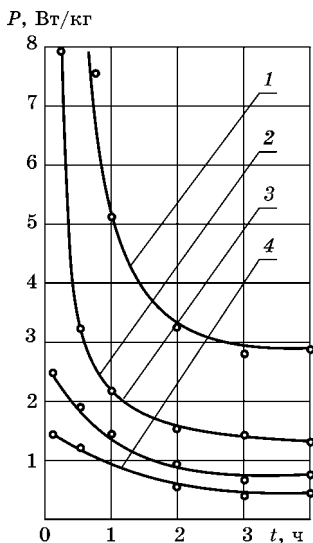


Рис. 3.15

Зависимость удельных потерь от времени спекания магнитопровода из кремнистого железа с толщиной слоев $0,8 \cdot 10^{-3}$ м для различной магнитной индукции:

1 — 1 Т; 2 — 0,75 Т; 3 — 0,5 Т; 4 — 0,25 Т.

тротехнической стали марки 1211 при толщине листов $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. На рисунке 3.15 представлена зависимость для нестандартной толщины материала. Для магнитопровода с толщиной слоев $0,8 \cdot 10^{-3}$ м с увеличением времени спекания от 0,5 до 4 ч удельные потери для индукции, равной 1 Т, снизились с 0,5 до 2,8 Вт/кг, что стало сопоставимо с удельными потерями электротехнической горячекатаной стали марки 1213 с толщиной листов $0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Для магнитопровода с толщиной слоев $1 \cdot 10^{-3}$ м с увеличением времени спекания от 0,5 до 4 ч удельные потери для индукции, равной 1 Т, снизились с 19,2 до 9 Вт/кг (см. рис. 3.16), что стало примерно сопоставимо с удельными потерями электротехнической горячекатаной стали марки 1211 с толщиной листов $1 \cdot 10^{-3}$ м.

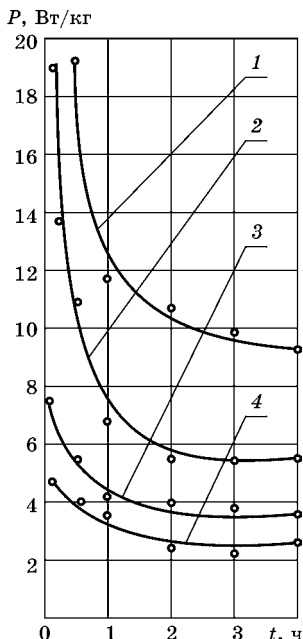


Рис. 3.16

Зависимость удельных потерь от времени спекания магнитопровода из кремнистого железа с толщиной слоев $1 \cdot 10^{-3}$ м для различной магнитной индукции:

1 — 1 Т; 2 — 0,75 Т; 3 — 0,5 Т; 4 — 0,25 Т.

Таким образом, слоистые спеченные магнитопроводы по магнитным характеристикам успешно конкурируют с электротехническими сталями. Уменьшение плотности дислокаций с увеличением времени спекания обусловлено постепенной аннигиляцией дислокаций. Чем больше время спекания магнитопровода, тем больше дислокаций аннигилирует, что сопровождается сокращением потерь, связанных с колебаниями дислокаций при перемагничивании кремнистого железа. При распространении влияния дислокаций на потери перемагничивания необходимо учитывать не только плотность дислокаций, но и другую альтернативу, а именно изменение структуры дислокаций. При отжиге развиваются дислокации с вектором Бюргерса $a <100>$. Именно такой перестройкой дислокационной структуры объясняется сокращение потерь и снижение коэрцитивной силы при нагревании образцов. Таким образом, факт снижения плотности дислокаций и изменение их структуры с увеличением времени спекания подтверждается и снижением потерь при перемагничивании.

Уменьшение плотности дислокаций приводит к уменьшению коэрцитивной силы (табл. 3.2).

Так, например, снижение средней плотности дислокаций от $17,8 \cdot 10^{10}$ до $6,1 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$ приводит к уменьшению коэрцитивной силы от 116 до 22 А/м. Такое резкое изменение коэрцитивной силы не может быть объяснено рафинированием примесей или уменьшением пористости

Таблица 3.2

Зависимость коэрцитивной силы от плотности дислокаций

Плотность дислокаций N , 10^{10} м^{-2}	17,8	15,7	13,2	11,3	9,5	7,4	6,1
Коэрцитивная сила H_c , А/м	116	109	85,2	60,8	41,8	32,4	22,0

магнитопровода. Кроме того, при сопоставительном спекании в инертной среде чистого аргона и в рафинирующей среде не было замечено различий в значениях коэрцитивной силы. Таким образом, основной причиной уменьшения коэрцитивной силы является уменьшение плотности дислокаций.

3.4. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ И МАКСИМАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ И КОНЦЕНТРАЦИИ ДОМЕНОВ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МПМ

Основными задачами повышения свойств магнитных материалов является установление механизмов процессов намагничивания и перемагничивания материалов, обусловленных дефектной структурой кристаллической решетки, и развитие количественной теории на этой основе.

Известно, что различают основную (коммутационную) кривую намагничивания и динамическую кривую намагничивания ферромагнетика. Если первую кривую получают при циклическом перемагничивании в постоянных полях, то вторую — при синусоидальном изменении напряженности поля либо магнитной индукции. Допустим, что если по одной оси параллельно действует внешнее поле, то объем доменов, вектор намагниченности которых коллинеарен вектору напряженности поля, растет за счет уменьшения антипараллельно намагниченных доменов, постепенно уничтожаемых при перемещении граничного слоя по оси, перпендикулярной оси параллельно действующего внешнего поля.

Динамическое поведение доменной структуры образцов железокремнистых сплавов в значительной мере

определяет их магнитные свойства. Интерес к изучению динамического поведения доменной структуры и его особенностям по сравнению с квазистатическим обусловлен широким применением этих магнитомягких материалов для изготовления магнитопроводов различных электротехнических агрегатов и устройств — трансформаторов, электрических машин, приборов, магнитных пускателей, контакторов, реле, дросселей и т. п. Учитывая, что уровень магнитных свойств этих материалов определяет качество, надежность и долговечность работы электротехнических агрегатов и устройств, выяснение механизма формирования свойств таких материалов и путей их улучшения способствует повышению качества, надежности и долговечности работы электроэнергетических систем.

Целью работы являлось исследование характера взаимодействия доменных границ с дислокациями и их количественное влияние на коэрцитивную силу и максимальную магнитную проницаемость. Практический интерес представляет определение зависимости скорости движения зародышей перемагничивания в материале от плотности распределения дислокаций и количественного содержания кремния. Для физики магнитных материалов представляет научный интерес изучение влияния плотности дислокаций и концентрации доменов в железокремнистых сплавах на коэрцитивную силу.

Коэрцитивная сила зависит не только от химического состава материала, но и от размеров и ориентации кристаллитов, от плотности и характера распределения дислокаций.

В работе Вицены предложена следующая зависимость коэрцитивной силы от плотности дислокаций N :

$$H_c \sim \sqrt{N}, \quad (3.1)$$

где H_c — коэрцитивная сила; N — плотность дислокаций [249].

Однако формула (3.1) весьма приближенно определяет зависимость H_c от N .

Величина H_c и максимальная магнитная проницаемость μ_{\max} зависят также от концентрации доменов n .

Для расчета H_c предполагается, что в отсутствие внешнего поля каждый кристаллит намагничен до насыщения в одном из направлений легкого намагничивания. Рассмотрим процесс перемагничивания таких кристаллитов. В микроскопическом объеме, примыкающем к границе кристаллита, происходит зарождение антифазного домена, отделенного от остальной части кристаллита стенкой. Для определенности возьмем 180-градусные доменные границы. Далее процесс перемагничивания кристаллита начинается со смещения 180-градусных доменных границ. Последующее изменение его намагниченности будет происходить за счет развития и роста зародышей перемагничивания. Это и приводит к увеличению свободной энергии кристаллита. Как известно, если в общем виде внешнее поле H направлено под углом θ к вектору самопроизвольной намагниченности I_s , то изменение магнитной энергии для 180-градусной границы определяется следующим образом [92]:

$$W = -\mu_0 I_s H \cos\theta, \quad (3.2)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

При $\theta = 180^\circ$ формула (3.2) принимает следующий вид:

$$W = \mu_0 I_s H. \quad (3.3)$$

Взаимодействие между дислокациями и плоскими блоховскими стенками определяется стохастической силой Пича — Колера, давление которой можно определить по формуле [92]:

$$P = \alpha I_s H, \quad (3.4)$$

где P — давление на доменную границу; α — коэффициент (при $\theta = 180^\circ$ $\alpha = 2$; при $\theta = 90^\circ$ $\alpha = 1$).

С повышением напряженности магнитного поля стенка все больше смещается в одну сторону, причем объем стенки непрерывно увеличивается. Такое положение приводит к росту свободной энергии кристаллита. При определенной напряженности магнитного поля, соответствующей коэрцитивной силе H_c , стенка займет положение, при котором объем правого домена будет равен объему левого, и результирующая намагниченность кристаллита станет равной нулю.

Это приводит к увеличению свободной энергии кристаллита по формуле

$$W\Delta V = \mu_0 I_s H_c \Delta V. \quad (3.5)$$

Приходим к заключению, что уменьшение коэрцитивной силы должно коррелировать со снижением плотности дислокаций. Таким образом, аналитическое уравнение для зависимости H_c от плотности дислокаций N можно представить в следующем виде:

$$\ln H_c = A + C_1 \ln \frac{N}{N_0}, \quad (3.6)$$

где A , C_1 — коэффициенты; N_0 — максимальная плотность дислокаций.

Для образца из сплава Fe–6,5% Si $A = 3,7302$, $C_1 = 0,676$. При этом точность расчета определяется величиной квадрата корреляции $R^2 = 0,9376$.

На рисунке 3.17 в логарифмических координатах представлены результаты измерения коэрцитивной силы в зависимости от плотности дислокаций для различных магнитных материалов.

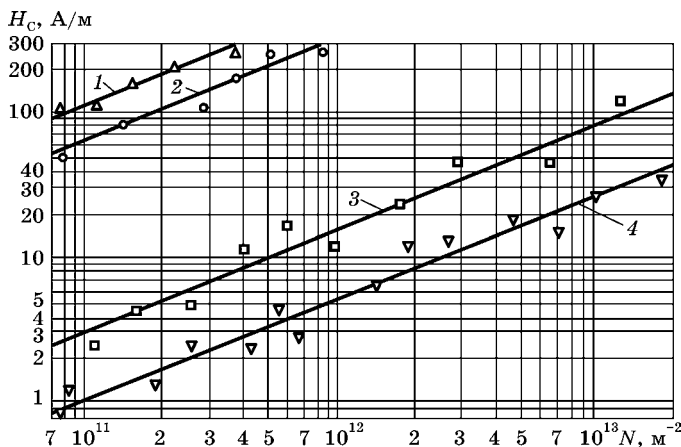


Рис. 3.17

Зависимость коэрцитивной силы от плотности дислокаций для различных магнитных материалов:

1 — Fe; 2 — Fe–1,9% Si; 3 — Fe–4% Si; 4 — Fe–6,5% Si.

Таблица 3.3

Образец магнитного материала	Предел измерения параметров			
	плотность дислокаций, м^{-2}	коэрцитивная сила, А/м	плотность дислокаций, м^{-2}	коэрцитивная сила, А/м
Fe	$7 \cdot 10^{10}$	90	$3,6 \cdot 10^{11}$	295
Fe–1,9% Si	$7 \cdot 10^{10}$	53	$8,0 \cdot 10^{11}$	287
Fe–4% Si	$7 \cdot 10^{10}$	2,5	$2,0 \cdot 10^{13}$	133
Fe–6,5% Si	$7 \cdot 10^{10}$	0,8	$2,0 \cdot 10^{13}$	39

Характеристики образцов даны в таблице 3.3.

С повышением содержания кремния и уменьшением плотности дислокаций коэрцитивная сила падает (табл. 3.3). Не исключено, что влиянием дислокаций можно также объяснить зависимость коэрцитивной силы от константы магнитной анизотропии ($H_c \approx K^n$) [245].

Характер движения доменных границ, зависящий от присутствия в кристаллите дислокаций, определяет величину коэрцитивной силы: чем ниже плотность дислокаций и чем выше концентрация доменов, тем меньше коэрцитивная сила. Термический отжиг изменяет дислокационную структуру, способствует аннигиляции дислокаций, что соответственно позволяет уменьшить H_c .

Коэрцитивная сила зависит от концентрации доменов n согласно уравнению

$$\ln H_c = B - C_2 \ln \frac{n}{n_0}, \quad (3.7)$$

где n_0 — максимальная концентрация доменов; B , C_2 — константы.

Для образца из сплава Fe–6,5% Si $B = 0,9083$, $C_2 = 0,611$ ($R^2 = 0,9326$).

На рисунке 3.18 в логарифмических координатах представлена зависимость коэрцитивной силы от средней концентрации доменов.

Характеристики образцов даны в таблице 3.4.

Чем выше концентрация доменов и содержание кремния в сплаве, тем меньше коэрцитивная сила (см. табл. 3.4).



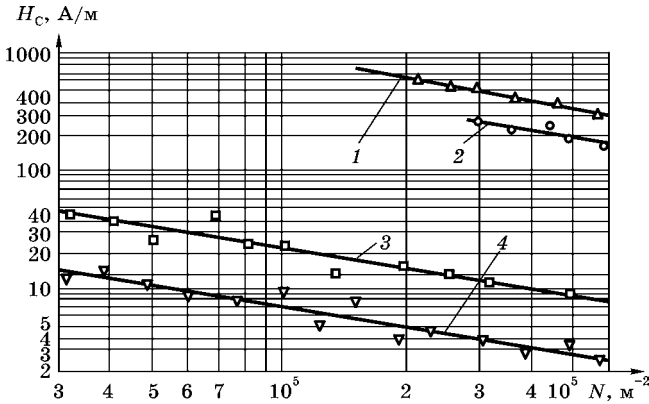


Рис. 3.18

Зависимость коэрцитивной силы от концентрации доменов для различных магнитных материалов:

1 — Fe; 2 — Fe-1,9% Si; 3 — Fe-4% Si; 4 — Fe-6,5% Si.

Таблица 3.4

Образец магнитного материала	Предел измерения параметров			
	концентрация доменов, м ⁻²	коэрцитивная сила, А/м	концентрация доменов, м ⁻²	коэрцитивная сила, А/м
Fe	2·10 ⁵	600	6,0·10 ⁵	300
Fe-1,9% Si	3·10 ⁵	280	6,0·10 ⁵	175
Fe-4% Si	3·10 ⁴	45	6,0·10 ⁵	8
Fe-6,5% Si	3·10 ⁴	15	6,0·10 ⁵	2,4

Зависимость коэрцитивной силы от плотности дислокаций и концентрации доменов можно представить с учетом (3.6) и (3.7) в следующем виде:

$$2 \ln H_c = A + B + C_1 \ln \frac{N}{N_0} - C_2 \ln \frac{n}{n_0}, \quad (3.8)$$

или

$$e^{\ln H_c^2} = e^{A+B} e^{\ln(N/N_0)^{C_1}} e^{\ln(n/n_0)^{-C_2}}. \quad (3.9)$$

Из уравнения (3.9) получаем

$$H_c = e^{\frac{A+B}{2}} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{\frac{C_1}{2}} \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\frac{C_2}{2}}. \quad (3.10)$$

Тогда величину энергии, характеризующую взаимодействие доменной границы с дислокациями, можно записать так:

$$W\Delta V = \frac{K\delta S}{2} e^{\frac{A+B}{2}} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{\frac{C_1}{2}} \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\frac{C_2}{2}}, \quad (3.11)$$

где δ — толщина доменной стенки; S — расстояние ее прохождение.

Из равенства выражений (3.5) и (3.11) получим

$$\mu_0 I_s H_c \Delta V = \frac{K\delta S}{2} e^{\frac{A+B}{2}} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{\frac{C_1}{2}} \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\frac{C_2}{2}}. \quad (3.12)$$

В выражении (3.12) $\Delta V = \frac{1}{2}V$, где считаем $V = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3$ — объем кристаллита. Тогда

$$H_c = 1,5 \frac{K\delta}{\mu_0 I_s D} e^{\frac{A+B}{2}} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{\frac{C_1}{2}} \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\frac{C_2}{2}}. \quad (3.13)$$

Формулу (3.13) можно использовать для расчета объяснения экспериментальных данных по зависимости коэрцитивной силы от плотности дислокаций и концентрации доменов.

Плотность дислокаций и концентрация доменов влияют также на максимальную магнитную проницаемость:

$$\ln \mu_{\max} = A_{\mu} - C_{1\mu} \ln \frac{N}{N_0}, \quad (3.14)$$

где A_{μ} , $C_{1\mu}$ — константы.

Для образца из сплава Fe–6,5% Si эти величины соответственно равны: $A_{\mu} = 8,0272$; $C_{1\mu} = 0,3171$ ($R^2 = 0,9071$).

На рисунке 3.19 в логарифмических координатах представлены результаты измерения максимальной магнитной проницаемости в зависимости от плотности дислокаций для различных магнитных материалов. Характеристики образцов даны в таблице 3.5.

С повышением содержания кремния и уменьшением плотности дислокаций максимальная магнитная проницаемость увеличивается (см. табл. 3.5). Не исключено, что влиянием дислокаций можно объяснить зависимость



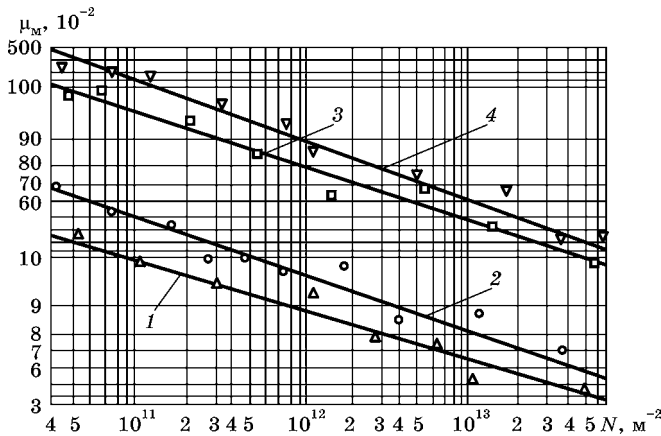


Рис. 3.19

Зависимость максимальной магнитной проницаемости от плотности дислокаций для различных магнитных материалов:

1 — Fe; 2 — Fe-1,9% Si; 3 — Fe-4% Si; 4 — Fe-6,5% Si.

Таблица 3.5

Образец магнитного материала	Предел измерения параметров			
	плотность дислокаций, м ⁻²	максимальная магнитная проницаемость	плотность дислокаций, м ⁻²	максимальная магнитная проницаемость
Fe	4,0·10 ¹⁰	3420	7,0·10 ¹³	370
Fe-1,9% Si	4,0·10 ¹⁰	6900	7,0·10 ¹³	530
Fe-4% Si	4,0·10 ¹⁰	14 600	7,0·10 ¹³	910
Fe-6,5% Si	4,0·10 ¹⁰	47 700	7,0·10 ¹³	2170

максимальной магнитной проницаемости от константы магнитной анизотропии и постоянной магнитострикции [221].

Максимальная магнитная проницаемость зависит от концентрации доменов согласно уравнению

$$\ln \mu_{\max} = B_{\mu} + C_{2\mu} \ln \frac{n}{n_0}, \quad (3.15)$$

где B_{μ} , $C_{2\mu}$ — константы.

Для образца из сплава Fe-6,5% Si эти величины соответственно равны: $B_{\mu} = 9,1912$ и $C_{2\mu} = 0,0948$ ($R^2 = 0,9126$).

На рисунке 3.20 в логарифмических координатах представлена зависимость максимальной магнитной проницаемости от средней концентрации доменов.

Характеристики образцов даны в таблице 3.6.

Чем выше концентрация доменов и больше содержание кремния в сплаве, тем больше максимальная магнитная проницаемость (табл. 3.6).

Аналогично выводу формулы (3.10) можно записать

$$\mu_{\max} = e^{\frac{A_{\mu} + B_{\mu}}{2}} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-\frac{C_{1\mu}}{2}} \left(\frac{n}{n_0} \right)^{\frac{C_{2\mu}}{2}}. \quad (3.16)$$

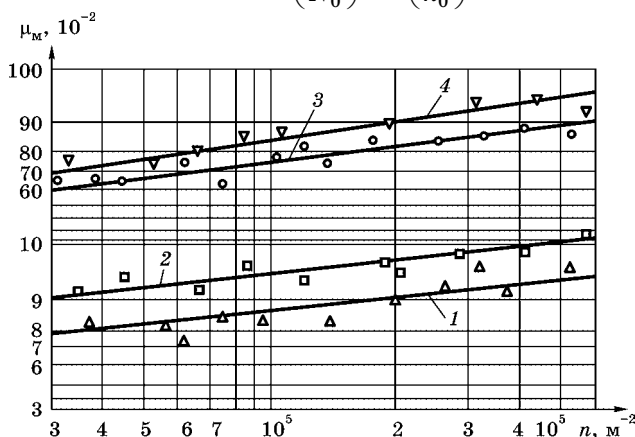


Рис. 3.20

Зависимость максимальной магнитной проницаемости от концентрации доменов для различных магнитных материалов:

1 — Fe; 2 — Fe-1,9% Si; 3 — Fe-4% Si; 4 — Fe-6,5% Si.

Таблица 3.6

Образец магнитного материала	Предел измерения параметров			
	концентрация доменов, м ⁻²	максимальная магнитная проницаемость	концентрация доменов, м ⁻²	максимальная магнитная проницаемость
Fe	3·10 ⁴	795	6,0·10 ⁵	940
Fe-1,9% Si	3·10 ⁴	905	6,0·10 ⁵	2400
Fe-4% Si	3·10 ⁴	5990	6,0·10 ⁵	9100
Fe-6,5% Si	3·10 ⁴	7100	6,0·10 ⁵	9870

В ферромагнитных материалах максимальная магнитная проницаемость определяется из выражения [92]:

$$\mu_{\max} = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (3.17)$$

где B — магнитная индукция.

С учетом (3.16) формула (3.17) будет выглядеть так:

$$\mu_{\max} = \frac{B}{\mu_0 H} e^{\frac{A_{\mu} + B_{\mu}}{2}} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-\frac{C_{1\mu}}{2}} \left(\frac{n}{n_0} \right)^{\frac{C_{2\mu}}{2}}. \quad (3.18)$$

До настоящего времени оставался неизученным вопрос о влиянии плотности дислокаций и концентрации доменов в железокремнистых сплавах на скорость движения

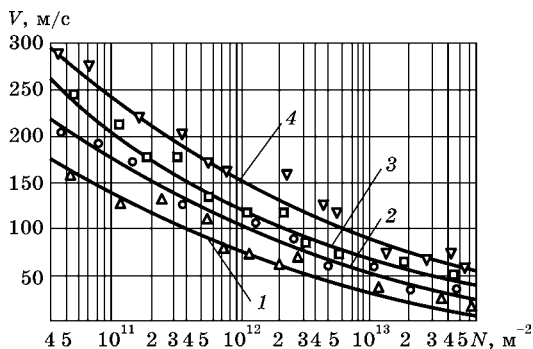


Рис. 3.21

Зависимость скорости движения доменных границ от плотности дислокаций для различных магнитных материалов:

1 — Fe; 2 — Fe–1,9% Si; 3 — Fe–4% Si; 4 — Fe–6,5% Si.

Таблица 3.7

Образец магнитного материала	Предел измерения параметров			
	плотность дислокаций, м ⁻²	скорость движения доменных границ, м/с	плотность дислокаций, м ⁻²	скорость движения доменных границ, м/с
Fe	4,0·10 ¹⁰	172,5	7,0·10 ¹³	9,9
Fe–1,9% Si	4,0·10 ¹⁰	216,2	7,0·10 ¹³	26,3
Fe–4% Si	4,0·10 ¹⁰	257,6	7,0·10 ¹³	43,4
Fe–6,5% Si	4,0·10 ¹⁰	293,7	7,0·10 ¹³	58,8

доменных границ. На рисунке 3.21 в полулогарифмических координатах представлены результаты измерения скорости движения доменных границ в зависимости от плотности дислокаций для различных магнитных материалов. Характеристика образцов дана в таблице 3.7.

Чем больше плотность дислокаций и чем меньше содержание кремния в сплаве, тем ниже скорость движения доменных границ (табл. 3.7).

Скорость перемещения доменов находится в прямой зависимости от подвижности доменных границ. С повышением содержания кремния в сплаве подвижность доменов существенно повышается. Такое повышение подвижности доменов в диапазоне полученных пределов изменения плотности дислокаций коррелирует с близким к нулю значением двух физических констант: постоянной кристаллической магнитной анизотропии и постоянной магнитострикции [221].

Физическая сущность рассматриваемых явлений состоит в том, что доменные границы от взаимодействия с дислокациями переключаются с большой скоростью и обеспечивают повышение максимальной магнитной проницаемости и уменьшение коэрцитивной силы.

При увеличении концентрации доменов и уменьшении плотности дислокаций на один порядок скорость движения доменных границ увеличивается в 1,73 раза, что соответственно приводит к уменьшению коэрцитивной силы в 5,6 раза и к увеличению максимальной магнитной проницаемости в 5,1 раза.

Для образца из сплава Fe–6,5% Si при плотности дислокаций, равной $7 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$, коэрцитивная сила равна 0,8 А/м и скорость движения доменных границ составляет 262 м/с; при плотности дислокаций, равной $8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$, коэрцитивная сила равна 4,5 А/м и скорость движения доменных границ — 155 м/с.

Для образца из сплава Fe–6,5% Si при плотности дислокаций, равной $4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$, максимальная магнитная проницаемость равна 47 700 и скорость движения доменных границ составляет 293,7 м/с; при плотности дислокаций, равной $5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$, максимальная магнитная

проницаемость равна 9400 и скорость движения доменных границ — 165 м/с.

По полученным формулам были рассчитаны значения зависимости магнитных характеристик от плотности дислокаций и концентрации доменов, которые правильно отразили экспериментальные данные.

Таким образом, для прецизионного сплава при отсутствии внутренних напряжений наибольший вклад в коэрцитивную силу вносит взаимодействие доменных границ с дислокациями. Чем выше плотность дислокаций, тем больше задержка в движении доменных границ и, следовательно, тем сильнее возрастает коэрцитивная сила.

На рисунке 3.22 в полулогарифмических координатах представлены результаты измерения времени движения доменных границ в зависимости от плотности дислокаций для различных магнитных материалов. На рисунке видно, что на время движения доменных границ плотность дислокаций влияет существенно. С увеличением плотности дислокаций от $2 \cdot 10^{12}$ до $7 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$ время движения доменных границ возрастает в следующих пределах: для железного образца — с $3,1 \cdot 10^{-6}$ до $19,6 \cdot 10^{-6}$ с; для образца из сплава Fe-1,9% Si — с $2,5 \cdot 10^{-6}$ до $10,2 \cdot 10^{-6}$ с; для образца из сплава Fe-4% Si — с $1,9 \cdot 10^{-6}$ до $7,4 \cdot 10^{-6}$ с; для образца из сплава Fe-6,5% Si — с $1,5 \cdot 10^{-6}$ до $5,6 \cdot 10^{-6}$ с.

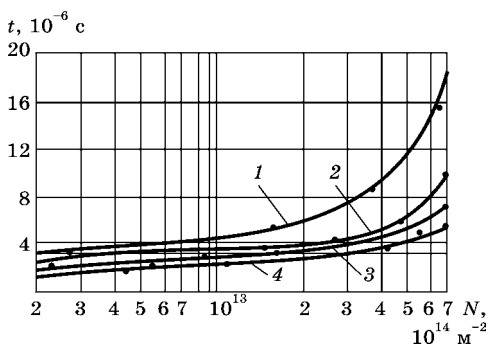


Рис. 3.22

Зависимость времени движения доменных границ от плотности дислокаций для различных магнитных материалов:

1 — Fe; 2 — Fe-1,9% Si; 3 — Fe-4% Si; 4 — Fe-6,5% Si.

Эксперименты показали, что время движения доменных границ уменьшается с повышением содержания кремния. Чем ниже плотность дислокаций и чем выше доля кремния в сплаве, тем меньше время движения доменных границ.

Сравнивая результаты испытаний по рисункам 3.17 и 3.22, можно сделать следующее заключение: при увеличении плотности дислокаций с ростом коэрцитивной силы время движения доменных границ соответственно увеличивается. Установленные закономерности имеют практическое значение, поскольку по скорости и времени движения доменных границ можно оценить степень динамической эффективности и реальное качество магнитного материала, определяемое плотностью распределения дислокаций и величиной внутренних напряжений.

3.5. ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МПМ

Одним из факторов, предопределяющих использование ферромагнетика в электрических изделиях, является контроль магнитных характеристик, важен также контроль удельных потерь. Если удельные потери очень высоки, то использование магнитных материалов в электротехнических устройствах имеет ограниченное применение или вообще нецелесообразно. Наиболее конкурентоспособны те электротехнические изделия, магнитомягкий материал которых имеет высокие магнитные свойства и низкие удельные потери.

Легирование кремнием, который образует с железом твердый раствор замещения, обуславливает увеличение удельного электрического сопротивления. Влияние кремния на удельное электрическое сопротивление определяется следующей приближенной эмпирической формулой [52]:

$$\rho = 1,0 \cdot 10^{-7} + 1,2\% \text{ Si} \cdot 10^{-7}. \quad (3.19)$$

Железосилицистые сплавы с низкими значениями удельного электрического сопротивления не находят широкого применения даже в технике низких частот из-за повышенных величин вихревых токов. На величину и направление вихревых токов, кроме размеров магнитного



сердечника, влияют его удельное электрическое сопротивление, частота электрического тока и магнитная проницаемость. Соответственно вихревые токи, вызываемые перемагничиванием магнитных материалов, влияют на удельные потери.

Современные формулы для подсчета удельных потерь дают некоторые погрешности. Рассмотрим это на примерах.

Попытка произвести расчет удельных потерь на вихревые токи в ферромагнетике была предпринята в 1926 г. Б. А. Введенским [146]. Он предложил следующую формулу:

$$P_{\text{в}} = \frac{\pi d^2 B_0^2 \omega}{3q}, \quad (3.20)$$

где d — толщина пластинки; B_0 — магнитная индукция, $B_0 = \mu H_0$; ω — циклическая частота; q — магнитная проводимость.

Однако формула (3.20) весьма приближенно отражает удельные потери на вихревые токи. Ошибки Введенского состояли в том, что значение магнитной проводимости q необходимо было ввести в числитель, а не в знаменатель, кроме того, в числитель необходимо было включить значение циклической частоты не в первой степени, а во второй, т. е. ω^2 , а в знаменателе надо было учесть значение плотности материала.

Интерес к определению удельных потерь в магнитных материалах появился в связи с возможностью их широкого применения при создании горячекатаной электротехнической стали для электрических машин. После того как в 1935 г. Госс [223] обнаружил высокие магнитные свойства у холоднокатаной электротехнической стали вдоль направления прокатки, интерес к изучению удельных потерь повысился. В последующие годы активизировались исследования с целью улучшения электрических характеристик стали.

Первое приближенное полуфеноменологическое уравнение для расчета полных потерь в проводящем ферромагнетике в 1937 г. дали Элвуд и Легг [215]:

$$P_{\text{полн}} = \frac{B_0^3 \nu}{4\mu^3} + \frac{\pi d^2 B_0 \omega}{3q} + c B_0^2, \quad (3.21)$$



где v — постоянная для данного сплава величина; μ — магнитная проницаемость; c — величина, не зависящая от B_0 и ω .

Экспериментальная проверка показала, что ошибки Элвуда и Легга состояли в том, что они повторили ошибки Введенского и, кроме того, необходимо было ввести в формулу значения плотности материала и коэрцитивной силы. Введенные в уравнение (3.21) параметры B_0^3 и μ^3 дополнительно искажают результаты расчета.

Приведенная формула (3.21) не учитывает дислокационную теорию магнитных свойств материалов. Более точную зависимость потерь энергии от физических величин при перемагничивании ферромагнетика дал Мишин [92]:

$$\frac{dW}{dt} \sim \lambda_{100}^2 \frac{l^4}{\delta B^2} N S n, \quad (3.22)$$

где λ_{100}^2 — магнитострикционная константа; l — средняя толщина дислокационного сегмента; δ — толщина доменной структуры; v — вектор Бюргерса; N — плотность дислокаций; S — площадь смещающихся границ доменов; n — число доменов в единичном объеме ферромагнетика.

В этом выражении учтено поглощение энергии изгибающимися под действием упругого поля доменными границами с дислокационными сегментами, но не учтена гистерезисная составляющая потерь и не принято во внимание удельное электрическое сопротивление материала. Однако данная формула позволяет определять потери энергии, зависящие от физических величин, и не дает возможности практически определять удельные потери на промышленных магнитных материалах в зависимости от технических величин.

Практическую формулу для инженерных расчетов удельных потерь на вихревые токи предложил К. А. Круг [74]. Суммируя множество замкнутых электрических контуров, он учел потери по всем контурам и получил следующее выражение:

$$P_v = \frac{4B_m^2 f^2 d^2 k_f^2 10^{-10}}{3\gamma\rho}, \quad (3.23)$$



где B_m — амплитуда магнитной индукции, Т; f — частота переменного тока, Гц; d — толщина пластин, мм; k_f — коэффициент формы кривой магнитной индукции; γ — плотность материала пластины, кг/м³; ρ — удельное электрическое сопротивление материала пластины, Ом·м.

Применяя формулу (3.23), получаем результаты практических вычислений, заниженные в среднем на четыре порядка, т. е. в 10^4 раз. Однако, чтобы формула (3.23) была полностью представлена в системе СИ и примерно соответствовала реальным показателям по потерям на вихревые токи, необходимо подставить в формулу толщину пластин в метрах и упразднить коэффициент 10^{-10} , т. е.

$$P_B = \frac{4B_m^2 f^2 d^2 k^2}{3\gamma\rho}, \text{ Вт/кг.} \quad (3.24)$$

Из работы Дружинина [52] известно, что потери на гистерезис прямо пропорциональны площади статического цикла гистерезиса и частоте перемагничивания, обратно пропорциональны плотности материала пластины и определяются следующим выражением:

$$P_H = \frac{Sf}{\gamma}, \quad (3.25)$$

где S — площадь статического цикла гистерезиса, Т·а/м.

Преобразовав петлю гистерезиса в виде прямоугольника, можно приблизительно определить площадь статического цикла гистерезиса по следующей простой формуле:

$$S = 4B_m H_c, \quad (3.26)$$

где H_c — коэрцитивная сила.

Следовательно, удельные потери на гистерезис с учетом (3.26) можно определить следующей формулой:

$$P_H = \frac{4B_m H_c f}{\gamma}, \text{ Вт/кг.} \quad (3.27)$$

Определив составляющие потерь по формулам (3.24) и (3.27), можно найти общие удельные потери на перемагничивание магнитомягких материалов:

$$P = P_B + P_r = \frac{4B_M f}{\gamma} \left(\frac{B_M f d^2 k^2}{3\rho} + H_c \right), \quad (3.28)$$

где H_c — значение коэрцитивной силы (приведено без учета плотности дислокаций и концентрации доменов).

На коэрцитивную силу на основе современной дислокационной теории магнитных свойств материалов оказывает влияние взаимодействие доменной и дислокационной структур согласно формуле (3.13). Следовательно, окончательно общие удельные потери с учетом (3.13) можно представить следующей формулой:

$$P = \frac{4B_M f}{\gamma} \left[\frac{B_M f d^2 k^2}{3\rho} + 1,5 \frac{K\delta}{\mu_0 I_s D} e^{\frac{A+B}{2}} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{\frac{C_1}{2}} \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\frac{C_2}{2}} \right]. \quad (3.29)$$

Принимая во внимание, что удельное электрическое сопротивление магнитного материала является структурно чувствительной величиной, запишем уравнение зависимости удельного электрического сопротивления от плотности дислокаций и концентрации доменов в следующем виде с учетом уравнения (3.19):

$$\rho = (1,0 + 1,2\% \text{ Si})_в \left(\frac{N}{N_0} \right)^q \left(\frac{n}{n_0} \right)^\varepsilon 10^{-7}, \quad (3.30)$$

где $в$ — коэффициент, принимающий значения от 0,1 до 0,9; q — постоянная для отношения плотности дислокаций; ε — постоянная для отношения концентрации доменов.

На удельное электрическое сопротивление магнитного материала влияет взаимодействие доменной и дислокационной структур. Для физики магнитных материалов представляет теоретический интерес изучение влияния плотности дислокаций на удельное электрическое сопротивление.

Экспериментальные испытания показали, что удельное электрическое сопротивление образцов с высокой мерой точности структурно чувствительно к возникновению в них дефектов. С увеличением плотности дислокаций соответственно повышается удельное электрическое сопротивление. На рисунке 3.23 в полулогарифмических



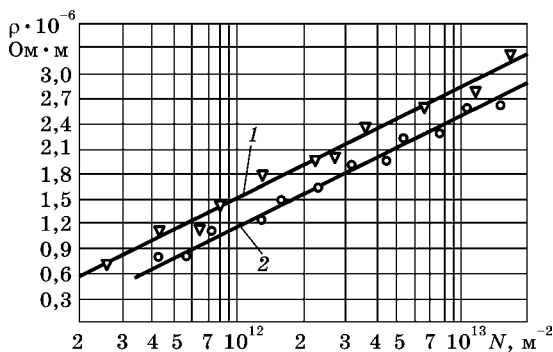


Рис. 3.23

Зависимость удельного электрического сопротивления от плотности дислокаций для железокремнистых сплавов:

1 — Fe-6,5% Si; 2 — Fe-4% Si.

координатах представлены результаты измерения удельного электрического сопротивления в зависимости от плотности дислокаций. С увеличением плотности дислокаций на один порядок с $6 \cdot 10^{11}$ до $6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$ удельное электрическое сопротивление возрастает для образца из сплава Fe-4% Si с $0,9 \cdot 10^{-6}$ до $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, т. е. в 2,4 раза; для образца из сплава Fe-6,5% Si с $1,2 \cdot 10^{-6}$ до $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, т. е. в 2,8 раза.

Практический интерес представляет установление зависимости удельных магнитных потерь от плотности дислокаций и количественного содержания кремния при различных значениях индукции намагничивания. Влияние дислокационной структуры на удельные потери изучалось в переменных магнитных полях промышленной частоты 50 Гц. На рисунке 3.24 в логарифмических координатах представлены результаты измерения удельных магнитных потерь в зависимости от плотности дислокаций для двух различных материалов и двух различных величин индукции намагничивания.

С увеличением плотности дислокаций на один порядок (с $2 \cdot 10^{11}$ до $2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$) удельные потери возрастают в следующих пределах: для образца из сплава Fe-4% Si при магнитной индукции 1,5 Т — с 3,3 до 9,0 Вт/кг, т. е. в 2,7 раза; для образца из сплава Fe-6,5% Si при магнитной индукции 1,5 Т — с 1,8 до 5,8 Вт/кг, т. е. в 3,2 раза;

для образца из сплава Fe-4% Si при магнитной индукции 1,0 Т — с 1,2 до 3,6 Вт/кг, т. е. в 3,0 раза; для образца из сплава Fe-6,5% Si при магнитной индукции 1,0 Т — с 0,7 до 2,4 Вт/кг, т. е. в 3,4 раза.

Не менее важно изучение влияния концентрации доменов на удельное электрическое сопротивление. Полученная зависимость удельного электрического сопротивления от концентрации доменов представлена в полулогарифмических координатах на рисунке 3.25. С увеличением

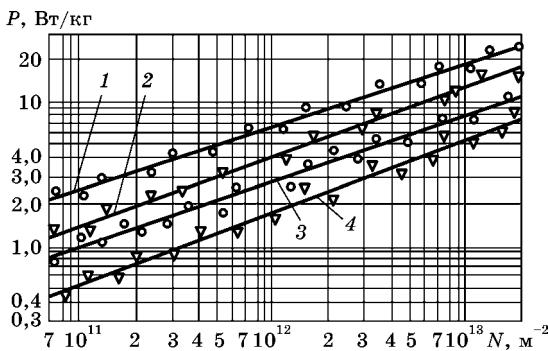


Рис. 3.24

Зависимость удельных магнитных потерь железокремнистых сплавов от плотности дислокаций при различных значениях индукции намагничивания:

1 — Fe-4,0% Si (1,5 Т); 2 — Fe-6,5% Si (1,5 Т); 3 — Fe-4,0% Si (1,0 Т); 4 — Fe-6,5% Si (1,0 Т).

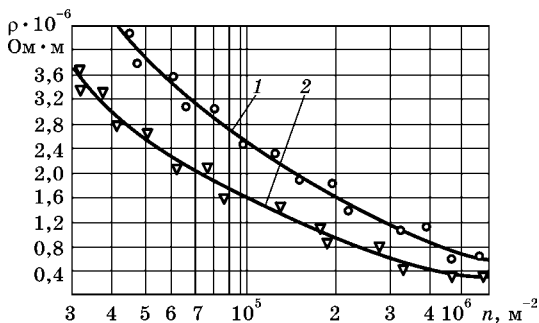


Рис. 3.25

Зависимость удельного электрического сопротивления от концентрации доменов для железокремнистых сплавов:

1 — Fe-6,5% Si; 2 — Fe-4% Si.

концентрации доменов с $6 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-2}$ удельное электрическое сопротивление уменьшается для образца из сплава Fe–4% Si с $2,3 \cdot 10^{-6}$ до $0,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, т. е. в 6,1 раза; для образца из сплава Fe–6,5% Si — с $3,45 \cdot 10^{-6}$ до $0,65 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, т. е. в 5,3 раза.

Об изменении концентрации дефектов в материале можно косвенно судить по изменению удельного электрического сопротивления. Физическая сущность рассматриваемого явления состоит в следующем. Под действием электромагнитного поля происходят релаксации дислокаций, которые резко отличаются по форме от гармонических синусоидальных колебаний. Интенсивное движение свободных электронов в металле приводит к рассеиванию энергии от встречи с дислокациями. Последние тормозят прохождение через металл электрического тока, тем самым повышая удельное электрическое сопротивление. Поэтому возникновение в сплаве любых типов дислокаций ведет к возрастанию удельного электрического сопротивления, а их уменьшение, наоборот, снижает удельное электрическое сопротивление. Таким образом, при увеличении плотности дислокаций на один порядок удельное электрическое сопротивление усиливается для образца из сплава Fe–4% Si в 2,4 раза, для образца Fe–6,5% Si — в 2,8 раза.

Рост удельных потерь происходит за счет повышения плотности дислокаций, приводящего к ухудшению структуры и затруднению процессов смещения доменных стенок, которые происходят при меньших индукциях намагничивания. На процессах вращения доменных стенок, имеющих место при больших индукциях намагничивания, такое повышение плотности дислокаций отражается с меньшей кратностью. Поэтому при ухудшении структуры сплава из-за повышенной плотности дислокаций увеличение потерь $P_{10/50}$ происходит с большей кратностью, чем для потерь $P_{1,5/50}$ [52].

Рассмотрим влияние концентрации доменов на удельные потери. Отрывочные данные, приведенные в [104; 250], противоречивы. По данным [250] в стержне квадратного сечения имелось только два домена. Потери на

вихревые токи оказались в несколько раз больше, чем рассчитанные без участия доменной структуры образца. Согласно [104] в толщине листа находилось четыре домена. Потери энергии от вихревых токов были в 1,5 раза больше, чем рассчитанные по общеизвестной формуле (3.23).

Систематические исследования показали, что при увеличении концентрации доменов на один порядок удельное электрическое сопротивление снижается для образца из сплава Fe–4% Si в 6,1 раза, для образца Fe–6,5% Si — в 5,3 раза, что при индукции намагничивания в 1,0 Т приводит к совокупному росту удельных потерь для образца из сплава Fe–4% Si в 3,0 раза, для образца из сплава Fe–6,5% Si — в 3,4 раза; при индукции намагничивания в 1,5 Т — к увеличению удельных потерь для образца из сплава Fe–4% Si в 2,7 раза, для образца из сплава Fe–6,5% Si — в 3,2 раза.

Выявленное улучшение свойств сплава кремния с железом Fe–6,5% Si в результате уменьшения плотности дислокации можно объяснить изменением кинематического параметра, т. е. увеличением скорости движения доменных границ. При высокотемпературном отжиге плотность дислокаций значительно падает, вследствие чего растет скорость движения доменных границ и, следовательно, сокращается коэрцитивная сила, гистерезисные потери и потери, связанные с релаксациями дислокаций.

Испытания показали, что высокие магнитные свойства (малая коэрцитивная сила, большая максимальная магнитная проницаемость, низкие удельные магнитные потери) в анизотропном материале могут быть получены, но лишь при условии низкой плотности дислокаций. Для достоверности заключения были проведены изотермические отжики контрольных образцов сплава Fe–6,5% Si с толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м при температуре 1470 К в течение 10 800 с. Произведенные отжики контрольных образцов показали, что потери $P_{1,0/50}$ сократились с 0,26 до 0,06 Вт/кг, в случае $P_{1,5/50}$ — с 0,52 до 0,13 Вт/кг.

Таким образом, при увеличении концентрации доменов и уменьшении плотности дислокаций на один порядок удельные потери $P_{1,5/50}$ снижаются на 2,3 Вт/кг.



ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Как в магнитном материале уменьшение плотности дислокаций влияет на скорость движения доменных границ?
2. Как в магнитном материале увеличение плотности дислокаций влияет на удельные магнитные потери?
3. Как в магнитном материале увеличение концентрации доменов влияет на удельное электрическое сопротивление?
4. Как в магнитном материале магнитная индукция изменяется в зависимости от температуры спекания?
5. Как в магнитном материале коэрцитивная сила изменяется в зависимости от времени спекания?
6. Как в магнитном материале увеличение плотности дислокаций влияет на удельное электрическое сопротивление?
7. Как в магнитном материале увеличение плотности дислокаций влияет на максимальную магнитную проницаемость?
8. Как в магнитном материале увеличение концентрации доменов влияет на максимальную магнитную проницаемость?
9. Вычислить глубину проникновения переменного магнитного поля z с частотой $f = 50$ Гц для сплава Fe-Si, у которого $\mu = 1,2 \cdot 10^3$, а удельное электрическое сопротивление $\rho = 2,1 \cdot 10^6$ Ом·м. Использовать формулу

$$z = \sqrt{2\rho/(\mu f)}.$$

10. Вычислить потери P на вихревые токи при перемагничивании проволоки с частотой поля 50 Гц, выполненной из сплава Fe-Si с радиусом $r = 2$ мм, удельное электрическое сопротивление которой $2,4 \cdot 10^6$ Ом·м. Использовать формулу

$$P = r^2 J_s^2 f^2 / (8\rho).$$

4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

4.1. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕРМОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НА МАГНИТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Одним из важнейших показателей технологических операций в производстве магнитопровода из спеченных материалов является скорость охлаждения. Если при увеличении скорости нагревания магнитопровода плотность дислокаций изменяется незначительно, то при увеличении скорости охлаждения плотность дислокаций возрастает существенно. Произвольная скорость охлаждения не позволяет повысить магнитную индукцию в малых и средних полях, хотя при существующей скорости охлаждения ($50^{\circ}\text{C}/\text{ч}$) магнитопровода для создания такой же магнитной индукции необходимо было бы увеличить напряженность магнитного поля. При скорости охлаждения магнитопроводов $50^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ коэрцитивная сила составила $118\dots 158$ А/м. При такой коэрцитивной силе не достигается требуемая стабильность параметров электротехнических устройств; например, в электрических машинах это приводит к увеличению тока холостого хода и значительному росту удельных потерь, в электромагнитных реле — к увеличению магнитодвижущей силы отпускания якоря и, следовательно, к увеличению времени отпускания и залипанию якоря.

В результате экспериментальных исследований была достигнута оптимальная скорость охлаждения магнитопроводов. В таблице 4.1 указаны наиболее целесообразные скорости ступенчатого охлаждения. Оптимальным является режим, при котором детали охлаждаются до 1110 К со скоростью $0,096$ К/с, после чего охлаждаются до 970 К

**Влияние скорости охлаждения
на магнитные свойства спеченных магнитопроводов**

Режим	Первая ступень		Вторая ступень			Третья ступень				
	Температура охлаждения до, К	Скорость охлаждения, К/с	Температура охлаждения до, К	Скорость охлаждения, К/с	Температура охлаждения до, К	Скорость охлаждения, К/с	Температура спекания, К	Магнитная проницаемость, Гн/м	Коэрцитивная сила, А/м	Магнитная индукция при напряженности 79,5 А/м, Т
1	1110	0,096	970	0,083	370	0,104	1690	17 300	6,36	0,94
2	1110	0,100	970	0,088	370	0,108	1690	17 200	8,75	0,92
3	1110	0,104	970	0,093	370	0,112	1690	15 100	23,85	0,86
4	1110	0,108	970	0,098	370	0,116	1690	12 300	27,82	0,80
5	1110	0,112	970	0,103	370	0,120	1690	9700	33,40	0,61
6	1110	0,116	970	0,108	370	0,124	1690	6900	56,40	0,56

Примечания. 1. Образцы были изготовлены из порошка марки ПЖВ-1 + 6,5% Si (фракции — 56–40 мкм). 2. Измерения производились на образцах размером $(34 \times 27 \times 5) \cdot 10^{-3}$ м.

со скоростью 0,083 К/с, а затем до 370 К со скоростью 0,104 К/с.

Как видно из таблицы 4.1, при большой скорости охлаждения сохраняется высокая коэрцитивная сила и поэтому наблюдаются отказы реле по причине залипания якоря магнитопровода. При малой скорости охлаждения в режиме 1 структура магнитопровода имеет неоднородное распределение дислокаций. При скорости охлаждения в режиме 1 плотность дислокаций составляет около $1,5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$, а при охлаждении в режиме 6 она увеличивается до $1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$.

Еще более высокую эффективность имеют магнитопроводы при совмещенном способе спекания и термомагнитной обработки (ТМО), которую производили от 970 К при напряженности магнитного поля одного направления 500 А/м, длительности импульса 0,075 с и частоте повторения импульса 2 цикл/с до 370 К со скоростью охлаждения 0,1040...0,0116 К/с. Приложенное импульсное поле одного направления по сравнению с постоянным магнитным

полем еще более увеличивает максимальную магнитную проницаемость (до 18 500 Гн/м) благодаря толчковому воздействию на «замороженные» примесные атомы, ориентируя их вдоль поля, и позволяет произвести ориентирование в направлении поля оставшихся доменов, которые при постоянном магнитном поле не были соразориентированы.

Для исследования причин залипания якоря реле было проверено несколько технологических вариантов спекания магнитных систем. Испытываемые системы из спеченных материалов проверялись на реле РПУ-1. У образцов были проверены следующие параметры: усилие отрыва якоря от сердечника, усилие на преодоление массы якоря, коэрцитивная сила — и зафиксирован момент залипания якоря реле. Сразу после отключения номинального напряжения с катушки реле в месте соприкосновения якоря с упором на расстоянии $73 \cdot 10^{-3}$ м от оси вращения якоря граммометром измерялось усилие отрыва якоря от сердечника. Затем в той же точке измерялось усилие, необходимое для преодоления массы якоря и сил трения.

Предварительно у всех испытываемых реле были сняты возвратная пружина и траверсы, щупами был измерен зазор между якорем и средним керном. Результаты измерения приведены в таблице 4.2, из которой видно, что

Таблица 4.2

Влияние температуры спекания на усилие отрыва якоря от сердечника, на залипание якоря и коэрцитивную силу

Температура спекания, К	Усилие отрыва якоря от сердечника, Н	Усилие преодоления массы якоря, Н	Залипание якоря реле, млн циклов ВО	Зазор между якорем и средним керном, 10^{-3} м	Коэрцитивная сила, H_c , Ам
1570	3,75	0,47	0,18	0,18	43
1590	3,52	0,45	1,20	0,18	35
1610	3,25	0,47	2,30	0,18	32
1630	2,84	0,46	3,70	0,18	28
1650	2,33	0,44	5,40	0,18	23
1670	1,70	0,47	8,20	0,18	15
1690	0,46	0,46	16,2	0,18	8*

Примечание. * Испытания продолжаются.

значения коэрцитивной силы у магнитных систем из материалов, спеченных при температуре 1690 К, примерно в 5,4 раза меньше, чем у магнитных систем из материалов, спеченных при температуре 1570 К. В то же время усилие отрыва якоря от сердечника увеличилось от 0,46 до 3,75 Н, т. е. почти в 8,2 раза, а вероятность залипания якоря уменьшилась с 16,2 млн циклов «включение — отключение» (ВО) до 0,18 млн циклов ВО, т. е. в 90 раз.

При низкотемпературном спекании материалов имели место случаи, когда якорь залипал при первых же циклах срабатывания реле, несмотря на то что зазор в среднем керне составлял $(0,19...0,23) \cdot 10^{-3}$ м. После того как материалы для магнитных систем были подвергнуты повторному спеканию при температуре 1690 К, реле из этих материалов продолжали функционировать до конца срока службы. Таким образом, причинами залипания якоря реле переменного тока являются большая скорость охлаждения материала магнитопровода, низкая температура спекания и недостаточное время спекания.

4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СЛОЕВ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Магнитные системы переменного тока получают методом порошковой металлургии (МПМ) цельнопрессованными, однако высокие удельные потери ограничивают применение таких магнитопроводов по сравнению с листовыми магнитопроводами из электротехнических сталей.

Другой способ изготовления магнитопроводов позволяет частично снизить потери от вихревых токов благодаря применению винтовой шихтовки, но и такие магнитопроводы (с эллиптическим магнитным полем) имеют большой поток рассеяния, так как рабочий магнитный поток рассекает изолирующие слои несколько раз [203].

Предлагаемый способ изготовления магнитных систем переменного тока лишен указанных недостатков, а полученные магнитопроводы обладают повышенными электрическими и магнитными свойствами и вполне заменяют листовые магнитные системы.

Производство спеченных слоистых магнитопроводов включало несколько операций. Сначала в пресс-форму засыпали шихту в количестве, необходимом для получения слоя толщиной $1 \cdot 10^{-3}$ м. Шихту разравнивали и прессовали при соответствующем давлении. Затем на поверхности основного материала аэрозольным напылением наносили диэлектрическую прослойку толщиной $0,04 \cdot 10^{-3}$ м из оксида магния, феррита или кварцевой стеклянной пудры, после чего все операции повторялись.

После прессования заготовки укладывали ровными рядами в специальные контейнеры, помещали в печь и производили спекание при температуре 1690 К в течение 14 400 с. Затем магнитопроводы охлаждали по режиму, описанному в п. 4.1.

Исследование влияния электроизоляционных покрытий (оксиды магния MgO , марганец-цинкового феррита $Mn-Zn$ и кварцевого стекла SiO_2) на магнитные свойства спеченных слоистых магнитопроводов показало, что неплохими электрическими и хорошими магнитными свойствами обладает магнитопровод с диэлектрическими прослойками из марганец-цинкового феррита, у которого удельные потери выше, чем у магнитопровода с диэлектрическими прослойками из оксида магния и кварцевого стекла (рис. 4.1). Но магнитная индукция насыщения такого магнитопровода выше, чем у магнитопроводов, диэлектрические прослойки которых выполнены из оксида магния и кварцевого стекла, поскольку феррит является магнитным материалом.

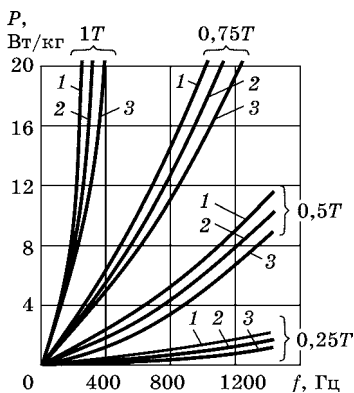


Рис. 4.1

Зависимость удельных потерь от частоты перемагничивания при различных значениях магнитной индукции для образцов из спеченных магнитомягких материалов с электроизоляционным покрытием из ферритовой пудры (1), оксида магния (2) и кварцевой пудры (3)

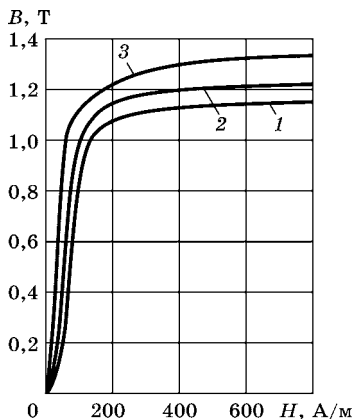


Рис. 4.2

Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля образцов из спеченных магнитомягких материалов с электроизоляционным покрытием из кварцевой пудры (1), оксида магния (2) и ферритовой пудры (3)

стекла имеет низкие магнитные характеристики, так как кварцевое стекло — немагнитный материал и не вносит вклада в повышение магнитной индукции образца (рис. 4.2).

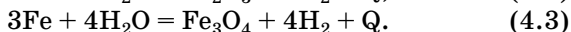
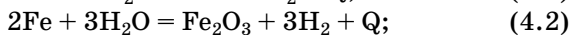
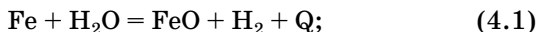
4.3. СОВМЕЩЕННЫЙ СПОСОБ АНТИКОРРОЗИЙНОГО ПОКРЫТИЯ И ПРОПИТКИ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Для повышения механической износостойкости магнитных систем из спеченных материалов был применен комплексный способ антикоррозионного покрытия в сочетании с ингибированной пропиткой, который осуществляется в два этапа. На первом этапе производится паротермическое оксидирование магнитопроводов, которые покрываются оксидной пленкой в результате воздействия на них высоких температур в атмосфере перегретого пара. Покрытие происходит в следующей технологической последовательности. Элементы магнитной системы

Следует отметить, что в этом случае для получения порошка использовали металлургический слиток, имеющий значительное содержание посторонних примесей (0,36% С; 0,4% Мп; 0,035% S; 0,02% Р). Применяемое в качестве диэлектрической прослойки кварцевое стекло, обладающее малыми удельными потерями, имеет низкую проводимость. Увеличение проводимости с повышением температуры более 620 К связано с большой энергией активации ионов примесей. В то же время магнитопровод с диэлектрическими прослойками из кварцевого

(магнитопроводы) устанавливают в ванне со скипидаром или другим растворителем для очистки от грязи, ржавчины и т. д. После этого магнитопроводы вынимают и, после того как скипидар стечет в ванну, тщательно продувают сжатым воздухом из воздушного пистолета. Затем их укладывают рядами в загрузочную корзину шлифованными поверхностями навстречу и нагревают до температуры оксидирования 520 К, пропуская через них нагретый пар. По достижении температуры оксидирования резко открывают вентили и продувают трубопроводы и камеру оксидирования. Давление в камере поднимают до 40...60 МПа и поддерживают постоянным на протяжении всего времени оксидирования.

Процесс протекает в герметически закрывающихся камерах печей, где на нагретые до 1020 К магнитопроводы воздействует диссоциированный кислород из перегретого водяного пара. Пар без конденсата равномерно омывает оксидируемые детали, подвергая их активному поверхностному окислению. Химический процесс образования пленки происходит последовательно в виде следующих экзотермических реакций:



Оксидная пленка состоит из механической смеси закиси, оксида и закиси-окиси железа.

Одновременно с образованием пленки происходит дополнительный отжиг деталей, улучшающий магнитные свойства магнитопроводов. По окончании оксидирования корзину с деталями охлаждают до 350 К.

На втором этапе осуществляется пропитка магнитопровода чистым ингибированным маслом К-17 на ультразвуковой установке. В наших условиях в качестве ультразвуковой установки применялись ультразвуковой генератор УЗГ-10 и ультразвуковая ванна УЗВП-3. В дно ванны вмонтирован магнитострикционный преобразователь электрических колебаний в ультразвуковые. Перед пропиткой масло профильтровывают через мелкую сетку



и нагревают в термостате до 350...355 К. Корзину с системами погружают с помощью тельфера в ультразвуковую ванну на расстояние $(5...8) \cdot 10^{-3}$ м от дна, имеющего диафрагму магнестрикционного излучателя. Ванну заполняют маслом на $2 \cdot 10^{-3}$ м выше уровня магнитных систем, после чего закрывают крышку и включают ультразвуковой генератор. Пропитка происходит по следующему режиму. Магнитные системы выдерживают под воздействием ультразвуковых колебаний в течение 60 с, затем выключают установку и выдерживают системы при нормальных условиях в течение 60 с. Этот цикл повторяют еще 6...8 раз, после чего корзину с магнитными системами вынимают из ванны тельфером, устанавливают над поддоном, наклонно соединенным с ванной, и выдерживают до полного стекания масла. Готовые магнитные системы выгружают из корзины и укладывают на стеллаж. Для проверки сквозной пропитки необходимо разрушить одну-две магнитные системы из партии. На основании наших экспериментов разработана технологическая инструкция.

После пропитки проводилось испытание на коррозионную стойкость в камере влаги и тепла типа 3001 по ГОСТ 16962-81, что соответствует режиму испытаний аппаратов тропического исполнения (температура 305...310 К, влажность 94...100%). Общая продолжительность испытания — 9 суток.

Перед установкой в камеру часть магнитных систем была установлена в пускатели типа ПМЕ-211, остальные испытывались в виде отдельных деталей. Всего было испытано 43 магнитопровода. Испытания показали, что системы, прошедшие только оксидирование с закреплением, после девятисуточного пребывания в камере влаги и тепла имеют следы и пятна ржавчины. Системы же, прошедшие полный технологический процесс — оксидирование и пропитку ингибированным маслом К-17, не имели никаких следов коррозии после испытания в тех же условиях — в камере влаги и тепла. До настоящего времени пропитка производилась в 10%-ном ингибированном масле НГ-203, что не обеспечивало защиту от коррозии, в то время как пропитка чистым ингибированным маслом обес-

печивает такую защиту. Оксидирование обычно применяется для сталей [91], работающих в статических режимах, и впервые использовалось в аппаратах управления, где при каждом включении происходит удар якоря о сердечник.

Указанный метод повышает износостойкость магнитных систем и позволяет исключить покраску, а также упростить технологию покрытия, улучшить внешний вид и возможность применения аппаратов в тропических условиях.

Механическая износостойкость магнитных систем была испытана с применением различных технологий: термического оксидирования, оксидирования и пропитки в ингибированном масле К-17 на ультразвуковой установке. Интенсивность износа соударяющихся поверхностей оксидированных магнитных систем выше, чем у обычных заводских систем, и значительно выше, чем у систем, оксидированных с последующей пропиткой в масле ультразвуковым способом (рис. 4.3).

Магнитные системы, претерпевшие износ, равный $8 \cdot 10^{-5}$ м, при сквозной пропитке маслом ультразвуковым способом выдерживают 6 млн циклов срабатываний, в то время как при оксидировании — только 2 млн. Износостойкость слоистых магнитопроводов из железокремнистого материала (6,5% Si) при совмещенном способе обработки составляет 13 млн циклов срабатываний, в то время как износостойкость обычных магнитных систем не превышает 3,5 млн циклов. Применение описанного

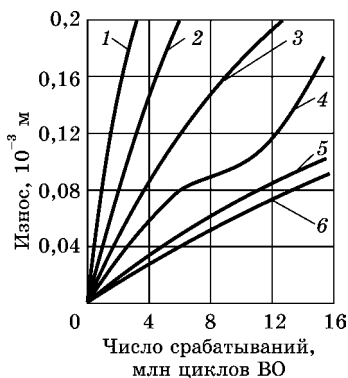


Рис. 4.3

Зависимость износа магнитных систем от числа срабатываний:

1 — магнитная система из стали 1212, оксидированная паротермическим способом, но не пропитанная в ванне; 2 — то же, из стали 3412; 3 — то же, не оксидированная паротермическим способом и не пропитанная в ванне; 4 — то же, не оксидированная паротермическим способом и пропитанная в ванне; 5 — то же, оксидированная паротермическим способом и пропитанная в ванне; 6 — спеченная магнитная система из Fe-Si (6,5% Si).

совмещенного антикоррозийного способа покрытия и пропитки позволило создать магнитные системы, практически не подвергающиеся коррозии и тем самым повышающие механическую износостойкость электрических аппаратов.

4.4. СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

С повышением производительности труда в промышленности более интенсивно используются электрические аппараты управления и соответственно повышаются требования к их качеству, надежности и долговечности. Механическая износостойкость магнитных систем, соответствующая современным техническим требованиям, может быть повышена введением смазки на шлифованные торцы шихтованных магнитных систем. Для определения влияния смазки испытывались несколько десятков аппаратов переменного тока с Ш-образными магнитными системами из электротехнической стали марки 3412 и магнитными системами из спеченного железокремнистого материала (6,5% Si).

Испытывались пускатели типа ПМЕ-111 и ПМЕ-211 со следующими прямоходовыми магнитными системами:

- системы, якорь и сердечник которых пропитаны минеральным маслом ультразвуковым способом;
- сердечник имеет полузакрытую камеру, в которую вставлена капсула, заполненная пропитанным в масле волокнистым материалом;
- магнитные системы серийного выпуска (без пропитки).

В системах п. 1 пропитку производили на ультразвуковой установке УЗУ-0,25, в масляную ванну которой погружали якоря и сердечники магнитных систем. Детали пропитывались в подогретом до 350 К минеральном масле воздействием колебания ультразвуковой частоты 18 кГц в течение примерно 360...540 с. Было выполнено семь-девять включений с интервалом 72 с. При контрольной разборке после пропитки якоря и сердечники осматривались по отдельности. Масляные зоны были равномерно распределены по всей поверхности листов и слоев.

По способу 2 смазка магнитных систем производилась следующим образом. Эллипсоидальные отверстия в районе кернов сердечника магнитных систем ПМЕ-211 прожигались на электроискровом координатном станке ХК 207.02М с помощью медных электродов соответствующей формы. Такие отверстия не имели заусениц, кромка получалась ровной. В изготовленное таким образом отверстие вставлялась капсула, в которую закладывался фитиль из волокнистого материала, пропитанный минеральным маслом.

Для сравнительного определения эффективности технологических мер остальные образцы испытывались без пропитки.

Испытания магнитных систем реальных электрических аппаратов проводились с частотой срабатывания 3600 циклов включений-отключений в час при ПВ = 50%. Механическая износостойкость аппаратов должна составлять 5 млн циклов включений-отключений (МРТУ-16.529.008-85). В процессе испытания периодически измерялись зазоры в среднем керне для определения износа магнитных систем. Результаты испытаний сведены в таблицу 4.3. Магнитные системы № 1 выполнены из спеченных магнитомягких материалов из кремнистого железа (6,5% Si), остальные — из электротехнической стали марки 3412.

Износ крайних кернов Ш-образной магнитной системы приводит к залипанию якоря, а также к увеличенной механической вибрации, что вызывает неисправности и поломки.

Из таблицы 4.3 следует, что в результате смазки вторым способом за время испытания износ магнитных систем уменьшился примерно в 2...4 раза, в то время как при пропитке магнитных систем минеральным маслом ультразвуковым способом износ уменьшился в 1,4...2 раза, хотя твердость всех магнитных систем, по Бринелю, составляет в среднем 187 НВ и соответствует твердости электротехнической стали марки 3412, т. е. наиболее эффективна смазка в полужакрытом объеме.

Для исключения покраски и сохранения консервации магнитных систем к смазке добавляют маслорастворимый ингибитор.

Таблица 4.3

**Результаты испытаний на износ магнитных систем
электрического аппарата ПМЕ-111 и ПМЕ-211**

Технологический способ обработки магнитных систем	Номер магнитной системы	Зазор среднего керна до испытания, 10^{-3} м	Зазор среднего керна после 10 млн срабатываний, 10^{-3} м	Зазор среднего керна после 16 млн срабатываний, 10^{-3} м	Износ крайних кернов после 10 млн срабатываний, 10^{-3} м	Износ крайних кернов после 16 млн срабатываний, 10^{-3} м
Якорь и сердечник пропитаны минеральным маслом ультразвуковым способом	1	0,30	0,15	0,101	0,15	0,20
	2	0,30	0,19	0,120	0,11	0,18
	3	0,20	0,10	0	0,10	0,20
	4	0,20	0,10	0	0,10	0,20
	5	0,20	0,12	0,090	0,08	0,11
	6	0,30	0,21	0,180	0,09	0,12
	7	0,15	0,07	0,040	0,08	0,11
	8	0,30	0,21	0,180	0,09	0,12
Сердечник имеет полузакрытую камеру, заполненную пропитанным в масле волокнистым материалом	1	0,30	0,20	0,15	0,10	0,15
	2	0,15	0,12	0,08	0,03	0,07
	3	0,24	0,19	0,16	0,05	0,08
	4	0,23	0,20	0,15	0,03	0,08
	5	0,20	0,18	0,15	0,02	0,05
Магнитные системы заводского выпуска (без пропитки)	1	0,35	0	—	0,35	—
	2	0,35	0,05	—	0,30	—
	3	0,25	0	—	0,25	—
	4	0,25	0	—	0,25	—
	5	0,25	0,10	0,06	0,15	0,19
	6	0,25	0,11	0,05	0,14	0,20
	7	0,18	0,03	0	0,15	0,18
	8	0,22	0,06	0	0,16	0,22

Магнитные системы клапанного типа РПУ-1 также подвергались специальной технологической обработке. На боковые поверхности пластин наносилась смазка окунанием. В качестве смазки для различных образцов использовались солидол, веретенное масло и 15% -ный раствор синтетического каучука в бензине. Магнитные системы РПУ-1, выполненные из спеченных магнитомягких материалов из кремнистого железа (6,5% Si), пропитывались минеральным маслом ультразвуковым способом (образцы № 9, 10, табл. 4.4).

Испытания проводились с частотой срабатывания 10 тыс. циклов включений-отключений в час при ПВ = 50%. Результаты экспериментальных испытаний приведены в таблице 4.4. Механическая износостойкость реле должна составлять 5 млн циклов включений-отключений (ТУ 16523020-80). Как видно из таблицы 4.4, смазка боковых поверхностей пластин солидолом, веретенным маслом и пропитка

Таблица 4.4

Результаты испытаний на износ магнитных систем реле клапанного типа РПУ-1

Технологический способ обработки магнитных систем	Номер магнитной системы	Зазор среднего зерна до испытания, 10^{-3} м	Зазор среднего зерна после испытания, 10^{-3} м	Износ крайних зерен, 10^{-3} м	Количество выполненных циклов, млн
На каждую пластину магнитной системы перед сборкой в пакет нанесена смазка окунанием (образцы № 1, 2, 3 смазаны солидолом; образцы № 4, 5, 6 — веретенным маслом; образцы № 7, 8 — 15%-ным раствором синтетического каучука в бензине; образцы № 9, 10 пропитаны минеральным маслом; образец № 11 заводского исполнения — без смазки)	1	0,19	0,15	0,04	25
	2	0,19	0,16	0,03	25
	3	0,15	0,13	0,02	25
	4	0,16	0,14	0,02	25
	5	0,17	0,12	0,05	25
	6	0,20	0,15	0,05	25
	7	0,20	0,15	0,05	25
	8	0,20	0	0,20	5
	9	0,18	0	0,18	5
	10	0,20	0,15	0,05	25
	11	0,10	0,10	0,10	5

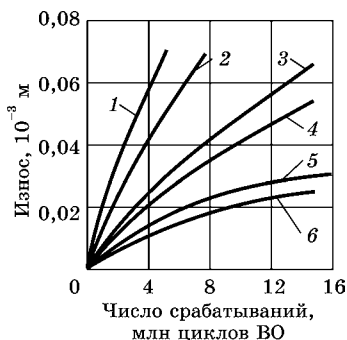


Рис. 4.4

Зависимость износа крайних кернов от числа срабатываний магнитной системы:

1 — якорь и сердечник из стали 3411 пропитаны минеральным маслом ультразвуковым способом; 2 — то же, но якорь и сердечник из спеченного кремнистого железа (6,5% Si); 3 — сердечник из стали 3411 имеет полузакрытую камеру, заполненную пропитанным в масле волокнистым материалом; 4 — то же, но сердечник из спеченного кремнистого железа (6,5% Si); 5 — якорь и сердечник из стали 3411, пропитанные окунанием в масло; 6 — то же, но якорь и сердечник из спеченного кремнистого железа (6,5% Si).

ло 15 млн циклов срабатываний при износе $55 \cdot 10^{-6}$ м. Для срока службы 8 млн циклов включения-отключения износ для магнитной системы заводского образца составляет $17 \cdot 10^{-6}$ м, для магнитной системы, пропитанной минеральным маслом ультразвуковым способом, износ равен $90 \cdot 10^{-6}$ м, для магнитной системы, смазанной минеральным маслом посредством капсулы, износ равен $45 \cdot 10^{-6}$ м, для магнитной системы, пропитанной окунанием в масло, — около $25 \cdot 10^{-6}$ м. Применение двух последних технологических мер позволяет без дополнительных затрат значительно снизить износ магнитных систем и эксплуатационные расходы. Особенно эффективна и удобна в эксплуатации смазка, производимая установкой капсулы, которую в случае необходимости можно дополнить маслом или оперативно сменить.

спеченных магнитных систем минеральным маслом повысили механическую износостойкость магнитных систем до 25 млн циклов срабатываний, т. е. более чем в 5 раз. Смазка пластин магнитопровода 15% -ным раствором синтетического каучука в бензине не дала эффекта — механическая износостойкость сохранилась на том же уровне.

На рисунке 4.4 показана зависимость износа крайних кернов от числа срабатываний различных магнитных систем (износ контролировался по уменьшению зазора в среднем керне). Износостойкость слоистых магнитопроводов из кремнистого железа (6,5% Si) при смазывании минеральным маслом посредством капсулы составляет около

4.5. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕССОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Применение порошковых магнитопроводов открывает большие возможности по созданию изделий различного конструктивного исполнения, обладающих высокой эффективностью, выполнение которых из листовой стали либо практически невозможно, либо связано со значительными издержками — большими отходами электротехнической стали в металлолом, или большими энергетическими затратами, или технологическими сложностями и низкими физико-механическими свойствами [120]. В последнее время наиболее распространенным методом изготовления изделий является двустороннее и (реже) одностороннее статическое пластическое прессование порошкового материала в жесткой пресс-форме [67]. Однако такой метод не обеспечивает равномерной плотности прессовок как по высоте, так и по сечению, что приводит к большому разбросу характеристик и низкой эффективности изделия.

Магнитно-импульсный метод формирования изделий ранее применялся для конструкционных материалов [87]. Мы использовали этот метод для магнитомягких материалов, изделия из которых обладают структурно-чувствительными свойствами. Данный метод обеспечивает равномерный и динамический характер разностороннего приложения нагрузки и позволяет расширить номенклатуру изделий, сэкономить ресурсы и энергию, упростить технологический процесс изготовления изделий и отказаться от большого количества технологической оснастки, дорогого и сложного оборудования.

В основу этого метода положен принцип действия магнитно-импульсного пластического прессования. Импульсное магнитное поле индуктора взаимодействует с магнитным полем вихревых токов, наведенных в электропроводящем элементе, уплотняющем порошок. В качестве такого элемента использовалась электропроводящая оболочка из отожженной меди.

Магнитное поле во всех случаях связано с электрическим током. Эти два разных явления существуют в едином



физическом процессе, находятся в движении, постоянно меняясь и преобразовываясь как по величине, так и по направлению. При разрядке конденсатора энергия электрического поля переходит в индуктор. Однако разряд конденсатора в цепи с активным сопротивлением и индуктивностью имеет некоторые особенности. Характеристическое уравнение, составленное для этой цепи методом входного сопротивления, имеет следующий вид:

$$p^2 + \frac{r}{L}p + \frac{1}{LC} = 0, \quad (4.4)$$

где p — корень характеристического уравнения; r — активное сопротивление индуктора; L — индуктивность индуктора; C — емкость конденсатора.

Решение этого уравнения можно представить следующим образом:

$$p_{1,2} = -\frac{r}{2L} + \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}. \quad (4.5)$$

Рассмотрим возможные случаи.

1. Если корни характеристического уравнения вещественны и отличны друг от друга, то такой разряд конденсатора носит апериодический характер. Это имеет место при условии $r/2L > 1/\sqrt{LC}$.

2. Если корни характеристического уравнения вещественны и равны друг другу, то такой разряд конденсатора также носит апериодический характер. Это имеет место при условии $r = 2\sqrt{LC}$.

3. Если корни характеристического уравнения являются комплексными числами, то в цепи совершаются затухающие колебания тока и напряжения. Это имеет место при условии $r = 2\sqrt{L/C}$.

Практика показывает, что в первых двух случаях происходит качественное формование прессовок, так как конденсатор в одностороннем порядке полностью и безвозвратно разряжается на индуктор. В третьем случае неизбежен брак прессовок, так как происходит неоднократный колебательный обмен энергией между конденсатором и индуктором до полного ее исчезновения, что не способствует качественному формованию прессовок.

Простая по конструкции пресс-форма изготавливалась и собиралась следующим образом. Стальная ступенчатая оправка с рабочим диаметром $19,52 \cdot 10^{-3}$ м, высотой $35 \cdot 10^{-3}$ м и нарезной резьбой М10 на стержне вытачивалась на токарном станке. Снаружи устанавливалась и фиксировалась в основани-



Рис. 4.5
Фрагмент спрессованного ферромагнитного шунта (размер $40 \times 34 \times 65 \cdot 10^{-3}$ м) в магнитно-импульсном поле

нии электропроводящая оболочка из отожженной меди толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м с внутренним диаметром $23 \cdot 10^{-3}$ м. Для придания пресс-форме при прессовании необходимой прочности с боковых сторон устанавливались две обоймы полуцилиндрической формы толщиной $6 \cdot 10^{-3}$ м с внутренним диаметром $24 \cdot 10^{-3}$ м. После заполнения пресс-формы порошком все детали скреплялись широкополой металлической шайбой с помощью навинченной гайки. Готовая к прессованию пресс-форма оборачивалась несколькими слоями фторопластовой ленты (в целях надежной электроизоляции) и помещалась в индуктор. Для мелкосерийного производства деталей была изготовлена разборная пресс-форма.

На рисунке 4.5 показан фрагмент спрессованного ферромагнитного шунта (размер $40 \times 34 \times 65 \cdot 10^{-3}$ м) в пресс-форме для магнитно-импульсного прессования.

Формование прессовок осуществлялось на магнитно-импульсной установке типа МИУ-80/10 с наибольшей энергией, равной 80 кДж. Установка состоит из 1140 конденсаторов, образующих батарею общей емкостью 17 100 мкФ [18]. Индуктор, выполненный из семи витков сечением $(20,7) \cdot 10^{-6}$ м², силовым кабелем подсоединялся к установке.

Металлические порошки для магнитопроводов опытного образца поставлялись фирмой «ХЭГАНЕС» (Швеция). Технологический процесс изготовления изделий включает гомогенизирующий отжиг, автоматическое дозирование, прессование, спекание и термический отжиг.

Магнитно-импульсное прессование осуществлялось при энергии разряда конденсатора, равной 80 кДж. Прессовка формировалась в течение 10^{-3} с, после чего извлекалась из пресс-формы.

Спекание и термический отжиг прессовок производили в вакууме ($13,3 \cdot 10^{-3}$ Па) в двухколпаковой камерной печи типа СГВ2-3/15-2. Высокотемпературное спекание магнитопроводов осуществлялось по следующему режиму: прессовки нагревали до 1073...1173 К со скоростью 10,8...11,2 К/с, затем до 1653...1673 К со скоростью 6,3...6,4 К/с с выдержкой в течение 1080...2160 с, а охлаждение велось до температуры 1203...1303 К со скоростью 4,56...4,57 К/с. По такому режиму проводили 2...3 цикла операций «спекание — охлаждение» (авт. свид. № 986596).

Для крепления магнитопровода к обойме на нем предусмотрено резьбовое отверстие М3 на высоте $10,5 \cdot 10^{-3}$ м. Ранее резьбовое отверстие получали при радиальной схеме прессования, однако в последнее время для надежности резьбу нарезают в кондукторе непосредственно после спекания.

В серийных приборах магнитоэлектрической системы типа М4250, используемых в качестве амперметров и вольтметров, применяются магнитопроводы из материала марки В10, имеющего следующий состав: 98,11% Fe; 0,65% Mn; 0,37% Si; 0,26% Cu; 0,24% Ni; 0,15% Cr; 0,14% C; 0,045% S; 0,035% P. Между магнитопроводом и полюсами постоянного магнита ЮН14ДК24Т2 имеется кольцевой воздушный зазор размером $1,6 \cdot 10^{-3}$ м, в котором создается магнитная индукция, составляющая примерно 0,13 Т. Магнитопровод производили из заготовки в виде трубы на токарном станке. Это нецелесообразно, так как 43% материала идет в отход в виде стружки. Взамен традиционного материала предложен железокремниевый сплав, имеющий следующий состав: 94,8% Fe; 5,0% Si; 0,16% P; 0,02% Mn; 0,01% C; 0,01% S.

Среди факторов, обуславливающих магнитные свойства порошковых магнитомягких материалов и влияющих на показания прибора, главное место занимает пористость

[67]. На рисунке 4.6 представлена зависимость пористости от энергии разряда.

Как видно из рисунка 4.6, при увеличении энергии разряда от 14,5 до 60 кДж пористость снизилась с 27,5 до 1,8%. Пористость изменяется по экспоненциальному закону. Это связано с тем, что в большинстве случаев при магнитно-импульсном прессовании достигается более высокая плотность неспеченного порошка по сравнению с односторонним и двусторонним формованием на прессе. Плотность неспеченного порошка более равномерна во всех направлениях и не так сильно зависит от размеров и формы изделий. Кроме того, на уплотнении порошка не сказываются фрикционные эффекты.

Представляет интерес влияние энергии разряда на коэрцитивную силу, так как она воздействует на магнитную вариацию показаний прибора. На рисунке 4.7 представлена зависимость коэрцитивной силы железокремниевое сплава с различным содержанием кремния от энергии разряда.

Испытания показали, что чем меньше величина коэрцитивной силы, тем меньше влияние она оказывает на магнитную вариацию показаний прибора. С увеличением

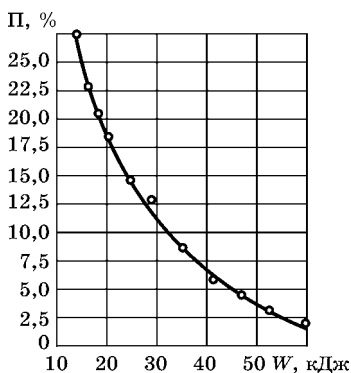


Рис. 4.6
Зависимость пористости порошкового магнитомягкого материала от энергии разряда

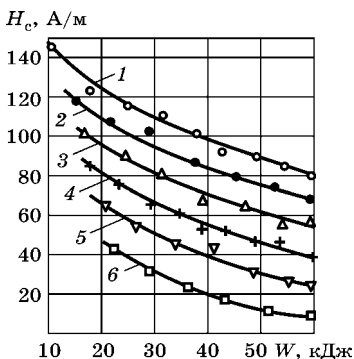


Рис. 4.7
Зависимость коэрцитивной силы железокремнистого сплава с различным содержанием кремния от энергии разряда: 1 — 2% Si; 2 — 3% Si; 3 — 4% Si; 4 — 5% Si; 5 — 6% Si; 6 — 7% Si.

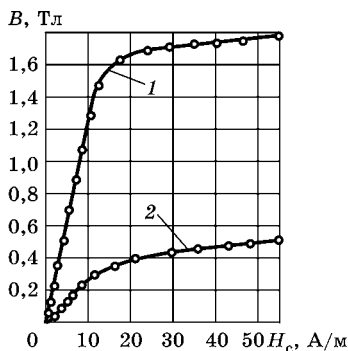


Рис. 4.8

Кривые намагничивания магнитопровода:

1 — опытный образец; 2 — серийный образец.

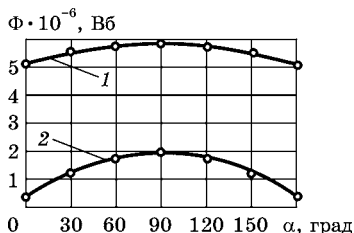


Рис. 4.9

Зависимость магнитного потока в магнитопроводе от угла расположения полюсов постоянного магнита:

1 — опытный образец; 2 — серийный образец.

Присутствие углерода в материале магнитопровода марки В10 сильно снижает магнитную индукцию и увеличивает коэрцитивную силу. Магнитопровод серийного образца содержит 0,14% углерода, его магнитная индукция равна 0,49 Т, а коэрцитивная сила — 220 А/м, в то время как железокремниевый материал магнитопровода опытного образца включает 0,01% углерода, его магнитная индукция равна 1,58 Т, а коэрцитивная сила — 40 А/м. Кроме того, первый образец сильно подвержен магнитной вариации показаний по сравнению со вторым.

энергии разряда от 10 до 60 кДж для железокремниевового сплава с содержанием 2% Si величина коэрцитивной силы уменьшилась с 144 до 83 А/м. При энергии разряда 50 кДж с увеличением содержания кремния от 2 до 7% коэрцитивная сила также уменьшилась с 91 до 12 А/м.

На погрешность электроизмерительных приборов существенно влияют магнитные свойства. На рисунке 4.8 представлены сравнительные кривые намагничивания опытного и серийного образцов магнитопроводов.

Кривая намагничивания для опытного образца магнитопровода более крутая и проходит выше, чем кривая намагничивания для серийного образца, что позволяет увеличить магнитную проницаемость, снизить напряженность магнитного поля и, следовательно, уменьшить ампер-витки катушки.

От распределения магнитного потока по высоте сердечника зависит эффективность работы электроизмерительных приборов. На рисунке 4.9 представлена зависимость величины магнитного потока в магнитопроводах опытного и серийного образцов от угла расположения полюсов постоянного магнита ЮН14ДК24Т2.

Магнитные потоки в обоих образцах распределены по убывающей величине от оси симметрии магнитных полюсов. Однако магнитный поток в центре оси симметрии магнитопровода опытного образца примерно в 3 раза превышает по величине магнитный поток магнитопровода серийного образца, так как первый имеет большую проводимость по сравнению со вторым. На окраинах от оси симметрии полюсов эта разница увеличивается до 10 раз.

Таблица 4.5

Определение погрешности приборов

Исполнение прибора	Предел	Показания прибора				Погрешность прибора	
		образцового		серийного	опытного	серийного	опытного
		абсолютные величины	деления шкалы	деления шкалы		%	
Миллиамперметр	0...5 мА	0	0	0	0	0	0
		1	20	19,5	20,0	-0,5	0
		2	40	41,0	40,0	+1,0	0
		3	60	62,5	60,5	+1,5	+0,5
		4	80	81,0	80,0	+1,0	0
Амперметр	0...5 А	0	0	0	0	0	0
		10	30	29,5	30,0	-0,33	0
		20	60	60,5	60,0	+0,33	0
		30	90	92,0	90,0	+1,32	0
		40	120	121,0	119,5	+0,66	-0,33
		50	150	149,5	149,0	-0,33	-0,66
Вольтметр	0...300 В	0	0	0	0	0	0
		100	50	50,5	50	+0,33	0
		200	100	99,5	100,5	-0,33	+0,33
		300	150	148,0	150,0	-1,33	0

Результаты испытаний электроизмерительных приборов показаны в таблице 4.5. Для сравнительного определения приведенной погрешности выбран образцовый прибор класса 0,2. Из таблицы видно, что приведенная погрешность серийных приборов составляет 1,5%, опытных приборов — 1,0%.

В процессе эксплуатации и транспортирования приборы подвергаются воздействию различных механических и климатических факторов. Способность приборов после такого воздействия надежно выполнять свои функции и сохранять товарный вид проверяется испытаниями. Для этого все приборы оснащаются магнитопроводами, изготовленными по методу магнитно-импульсного прессования, покрытие которых выполнено способом парофазного оксидирования (рис. 4.10).

Механические нагрузки, которые испытывают приборы в процессе эксплуатации и транспортирования, проявляются в виде вибраций, сотрясений, одиночных и многократных ударов. Параметры воздействующих механических нагрузок, максимально приближенные к эксплуатационным, создаются при испытаниях на вибростендах и ударных стендах (копрах). Испытания, проведенные на вибростенде типа ВЭДС-200 с ускорением 2...20 м/с², частотой 10...40 Гц в течение 3600 с, показали, что погрешность приборов не превысила 1,0%. Ослабления и самоотвинчивания крепежных деталей за время испытания не наблюдалось.



Рис. 4.10
Полые спеченные магнитопроводы для электроизмерительного прибора типа М4204

Испытание приборов на ударопрочность проводилось в следующем режиме: ускорение 100 и 150 м/с², частота 100 ударов в минуту, число циклов 108 тыс. ударов. Испытания осуществлялись на ударном стенде типа SPS-80, при этом погрешность приборов после испытания не превысила 1,0%. Ослабления и самоотвинчивания

крепежных деталей за время испытания также не наблюдалось.

После того как приборы выдержали механические воздействия, их подвергли климатическим испытаниям. Проверку на влагопрочность проводили в камере влаги типа ТВК-2 при температуре 40°C, относительной влажности 98% в течение 864×10^3 с и с выдержкой в нормальных условиях. После изъятия приборов из камеры в течение не более 180 с проверяли электрическую прочность и сопротивление изоляции. Изоляция между корпусом и изолированными от корпуса по постоянному току электрическими цепями при испытании на установке УПУ-10 выдержала действие испытательного напряжения в 1,2 кВ в течение 60 с. Сопротивление изоляции между корпусом и изолированными по постоянному току электрическими цепями при измерении мегаомметром М4100 составило более 0,5 МОм. Следов ржавчины и коррозии на деталях приборов не обнаружено.

В условиях эксплуатации фактическая температура окружающей среды, при которой работают приборы, изменялась от -50 до 65°C. Это может привести не только к ухудшению временных характеристик прибора, но и к его отказу. Изменение температуры окружающей среды влияет на сопротивление прибора, плотность магнитного потока в воздушном зазоре и упругие свойства пружин, создающих противодействующий момент. Однако два последних обстоятельства компенсируют друг друга. Например, повышение температуры вызывает ослабление магнитного потока в воздушном зазоре, т. е. вращающий момент уменьшается, снижается упругость пружин, примерно на столько же уменьшается и противодействующий момент. Продолжительность цикла испытания в камере КРК-3522 в диапазоне обозначенных температур составила 7200 с при количестве циклов, равном 3. Затем прибор находился в нормальных условиях. Сопротивление изоляции между корпусом и изолированными по постоянному току электрическими цепями при температуре 65°C превысило 5 МОм. Испытания показали, что погрешность приборов не превышала 1,0%, в деталях



приборов не было нарушений покрытий и механических повреждений.

Для определения влияния внешних магнитных полей испытание проводили на установке постоянного тока РР-479. Для этого каждый прибор устанавливали в центре катушки со 104 витками и наружным диаметром 0,3 м. Испытание на воздействие внешнего однородного поля напряженностью 400 А/м и индукцией $5 \cdot 10^{-2}$ Т показало, что погрешность приборов не превысила 1,0% и они обладают достаточной электромагнитной помехоустойчивостью. Опытный образец прибора имеет меньшую чувствительность к внешним магнитным полям по сравнению с серийным, так как магнитная проницаемость первого значительно выше, чем у второго.

Разработанная ресурсосберегающая технология магнитно-импульсного прессования материала для магнитопроводов позволила уменьшить отход материала на 43%, сократить затраты электроэнергии на 38%, увеличить рабочий магнитный поток примерно в 3 раза, снизить коэрцитивную силу в 5,5 раз. При этом класс точности прибора повысился с 1,5 до 1,0 и магнитные вариации его показаний уменьшились.

Магнитно-импульсное прессование может найти применение в тех областях, где требуются длинные полые магнитопроводы с тонкими стенками, такие как датчики, приборы, магнитные шунты.

4.6. РАЗРАБОТКА КРИТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОГО СПЕКАНИЯ (МЖФС)

Важной задачей является замена традиционной прокатанной листовой электротехнической стали серией спеченных порошковых железокремнистых сплавов, составляющих основу электротехнических материалов. В производстве магнитопроводы переменного тока получают способом порошковой металлургии цельнопрессованными, однако высокие удельные потери ограничивают



применение таких магнитопроводов по сравнению с прокатанными листовыми магнитопроводами из электротехнических сталей. *Критической* является *межотраслевая* технология, которая создает существенные предпосылки для развития многих технологических областей и вносит в совокупности главный вклад в научно-техническое и промышленное развитие различных отраслей¹.

Магнитопроводы из сплава кремния с железом в производственных условиях изготавливают из порошка при давлении 500...700 МПа, спекают при 1023...1103 К в течение 1...2 ч. Многие исследователи работали над усовершенствованием технологии изготовления магнитопроводов. Одни прессовали железный порошок с порошком кремния от 2 до 8,5% при давлении 800 МПа, спекали при 1423 К в атмосфере осушенного водорода в течение 3 ч [175], другие прессовали порошок Fe–6,5% Si при давлении 800...1000 МПа, спекали при 1323...1373 К в вакууме 10^{-2} мм рт. ст. в течение 1 ч [154], третьи прессовали порошок Fe–4% Si при давлении 800 МПа, спекали при 1523 К в водороде в течение 4 ч [199]. В одной из работ исследовано влияние бора на физические свойства сплава Fe–6,5% Si (прессование осуществлено при давлении 800 МПа, спекание при 1523...1553 К в атмосфере осушенного водорода в течение 3 ч) [140]. В работе Альтмана [7] приведена усовершенствованная методика изготовления образцов: смешивание железного порошка с легирующим порошком (6, 7, 8 и 9% Si), прессование при давлении 1000 МПа, спекание при 1573 К в течение 24 ч, причем производилось двукратное прессование и спекание образцов. Однако технология спекания, описанная в перечисленных работах, относится к категории твердофазного спекания, и по этой технологии невозможно получить магнитопроводы с низкой пористостью и высокими магнитными свойствами. Если теория твердофазного спекания двухкомпонентных порошковых смесей подробно изложена в работах Я. И. Френкеля, Б. Я. Пинеса,

¹ Указ Президента РФ В. В. Путина № Пр-578 от 30 марта 2002 г. «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники РФ и Перечень критических технологий РФ».



Я. Е. Гегузина и других авторов, то теория жидкофазного спекания изучена недостаточно.

Применительно к сплавам Fe–Si жидкофазное спекание исследовалось в единственной работе [136]. К сожалению, здесь технология изготовления магнитопровода не была доведена до завершающей стадии, так как образцы сплава кремния с железом, содержащего 6,5% Si, прессовались при низком давлении (1500 МПа). В работе указывается, что легированный порошок с 6,5% Si плохо прессуется даже с пластификатором. В результате спеченные образцы имеют высокую относительную пористость (10...20%). К тому же спекание образцов проводилось при низкой температуре (1523 К), поэтому процесс массопереноса и объемной диффузии атомов не был завершен. Порошок ферросилиция марки Си20, применяемый в качестве ингредиента в смеси с железным порошком, имеет большой процент примесей ($\leq 5,04\%$), что отрицательно влияет на магнитные свойства магнитопроводов, так как в последних обнаружены окисленные продукты и рентгеноструктурным анализом выявлена дискретная неоднородность твердого раствора. Углерод, содержащийся в этом составе примесей (до 1%), отрицательно воздействует на магнитные свойства, увеличивает магнитоупругую энергию, в результате чего коэрцитивная сила возрастает.

Особенность критической технологии состоит в том, что сначала делают сплав ферросилиция Fe–20% Si, затем способом распыления расплава получают порошок, после чего для приготовления необходимого состава сплава Fe–6,5% Si смешивают сплав ферросилиция с железным порошком и производят прессование при давлении 1,0...1,8 P вместо достигнутого ранее давления прессования $P = 1500$ МПа [136]. Жидкофазное спекание производят при температуре 1,0...1,11 $T_{пл}$ вместо достигнутой ранее температуры спекания 0,67...1,0 $T_{пл}$, где $T_{пл}$ — температура плавления легкоплавкой лигатуры ($T_{пл} = 1523$ К).

Поставка распыленного железного порошка марки PASC-20 (базовый железный порошок ASC 100.29) осуществлена фирмой «ХЭГАНЕС» (Швеция). Лигатуру порошка ферросилиция Fe–20% Si получили смешиванием поликри-

сталлического порошка кремния КПС-1 (ТУ 48-4-319-84) в необходимых пропорциях с железным порошком марки PASC-20. Затем проводили прессование смеси порошка при давлении 1100 МПа и спекание при 1473 К в течение 1 ч в вакууме, после чего порошки ферросилиция Fe–20% Si получали методом распыления расплава. Далее для получения жидкой фазы в количестве 32,5% проводили дозирование смешиванием в необходимых пропорциях порошка Fe–20% Si с железным порошком той же марки (PASC-20).

Одним из основных показателей спеченных изделий является пористость прессовки, от которой зависят их магнитные свойства. Общая пористость определяется по следующей формуле:

$$П_W = 100 \left(1 - \frac{\gamma_B}{\gamma_M} \right) \%, \quad (4.6)$$

где γ_B — плотность воды; γ_M — плотность материала.

Плотность образцов прессовки вычисляли по формуле (4.6) и измеряли методом гидростатического взвешивания. На рисунке 4.11 представлено влияние давления прессования на пористость прессовок. При увеличении усилия прессования до 2700 МПа пористость прессовок снижается до 1,5%.

Технология изготовления магнитных систем заключается в следующем. Порошок фракции ($<56...>40$)· 10^{-6} м перед прессованием подвергли гомогенизирующему отжигу при 1473 К в течение 4 ч в вакууме $0,065 \cdot 10^{-2}$ ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.). Прессование магнитопроводов произвели при давлении 2700 МПа на гидравлическом прессе типа 2ПГ-500. В матрицу пресс-формы, имеющей нижний пуансон, из бункера-питателя засыпали рас-

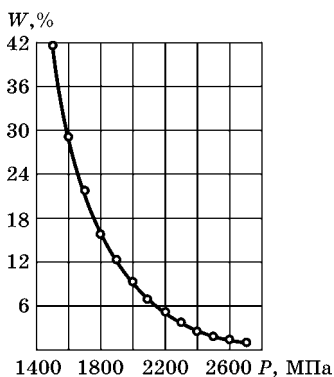


Рис. 4.11
Зависимость пористости прессовок от давления прессования

считанную по объему навеску шихты. После заполнения шихтой полости матрицы провели прессование верхним пуансоном при опускании плунжера пресса. Затем верхний пуансон отвели вверх и путем аэрозольного напыления в матрицу пресс-формы ввели диэлектрическую прослойку толщиной 50 мкм. Далее все операции повторили. После окончания прессования дискретно спрессованный магнитопровод выпрессовали из пресс-формы и установили на контейнер. Синтез сплава кремния с железом осуществили в камерной печи сопротивления типа СНВЛ-1.3.1/1-М2 в вакууме $0,065 \cdot 10^{-2}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) при температурах 1523, 1608 и 1693 К.

Представляет интерес физический механизм жидкофазного спекания. Различаются три последовательные стадии спекания:

- *начальная*: образование жидкого металлического контакта между отдельными частицами;
- *промежуточная*: перенос через жидкость вещества тугоплавкой фазы;
- *завершающая*: твердофазное спекание и формирование кристаллической структуры.

При жидкофазном спекании необходимо учитывать фазовую диаграмму состояния системы Fe–Si. Сплав кремния с железом до содержания кремния 4,5% при доле углерода 0,08% сохраняет структуру феррита. Отсутствие полиморфного превращения для магнитопровода из сплава Fe–6,5% Si позволяет повысить температуру спекания до линии ликвидуса (1773 К) без перекристаллизации.

Спрессованные заготовки обладают пористостью и развитой системой мелких сообщающихся каналов между порами. Чтобы снизить давление воздуха, создают глубокий вакуум $0,065 \cdot 10^{-2}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) в камере спекания и включают нагрев. На начальной стадии спекания, называемой процессом перегруппировки [37], при приближении температуры печи к температуре появления жидкой фазы происходит взаимное сближение частиц, нарастание площади контактов и увеличение усадки. Затем наступает ослабление остаточных напряжений, возникших после прессования, что приводит к увеличению

плотности в результате скольжения частиц. Появление жидкой фазы при нагреве связано с расплавлением частиц легкоплавкой лигатуры ферросилиция Fe–6,5% Si при 1523 К, которая начинает заполнять зазоры между твердыми частицами железа, вызывая их взаимное перемещение, что приводит к дальнейшему уплотнению порошковой массы. Стягивание твердых частиц жидкими прослойками обусловлено капиллярным давлением, которое по закону П. С. Лапласа определяется следующей зависимостью [3]:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (4.7)$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости фазы и газа; R_1, R_2 — главные радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности.

По мнению Г. Эйринга и М. Поляни, разработавших теорию абсолютных скоростей реакции, в ходе элементарного акта возникает конфигурация атомов, являющаяся критической: если она будет достигнута, то дальнейшее движение атомов происходит беспрепятственно, не требуя расхода энергии [39]. Механизм реакции определяет равновесие между реагирующими способностями вещества.

При появлении жидкой фазы происходит ее взаимодействие с твердой фазой. Для расчета скорости химической реакции применимо следующее выражение в термодинамической форме [39]:

$$v = \frac{kT}{2\pi h} \exp\left(\frac{\Delta S}{K}\right) \exp\left(\frac{\Delta H}{kT}\right), \quad (4.8)$$

где k, h — соответственно постоянные Больцмана и Планка; T — абсолютная температура; $\Delta S, \Delta H$ — соответственно энтропия и энтальпия активации.

Энергия сплавообразования в несколько раз превышает изменение поверхностной энергии. Начинается диффузия атомов второго компонента из жидкой фазы в твердую, образуя в ее поверхностном слое насыщенный твердый раствор, способный находиться в равновесии с расплавом [113].

Движущей силой появления диффузионных потоков является неравенство в подвижности атомов диффузионных компонентов, т. е. соотношение парциальных коэффициентов диффузии. В системе Fe–Si при 973 К это соотношение равно $D_{\text{Si}}/D_{\text{Fe}} \approx 4,5 \cdot 10^3$.

Особое внимание уделяют газам, оставшимся в порах. Нагревать прессовки необходимо со скоростью 300 К/с, так как при большей скорости нагрева до температуры спекания поры могут захлопнуться раньше, чем произойдет диффузия атомов газа в твердое тело.

Действие поверхностного натяжения сил и парциальных сил диффузионных потоков направлено таким образом, что поры из хаотически неправильной формы стремятся превратиться в шаровую геометрическую форму.

Промежуточная стадия начинается после завершения округления пор. Эта стадия, названная процессом растворения — осаждения [37], играет важную роль, так как количество жидкой фазы в сплаве еще достаточно велико. Вследствие изменения химического состава после диффузии атомов из жидкой фазы в твердую температура плавления на поверхности твердой фазы понижается, и атомы твердого раствора поверхностного слоя могут переходить в расплав путем растворения, а в случае пересыщения — путем плавления [113]. В промежуточной стадии спекания продолжают интенсивно действовать диффузионные потоки.

Основной причиной появления диффузионных потоков, а следовательно, и диффузионного напряжения, является различие парциальных коэффициентов диффузии. Согласно эффекту Киркендалла [80] доминирующую роль в диффузионных процессах играют вакансии. Это связано с тем, что коэффициент диффузии атомов кремния в железо на три порядка больше, чем коэффициент диффузии атомов железа в кремний, поэтому в частицах кремния образуются избыточные вакансии, коалесцирующие в поры, а размеры частиц железа увеличиваются вследствие доминирования притока атомов кремния над оттоком атомов железа. Следовательно, согласно эффекту Киркендалла, происходит перетекание материала вещества в направлении деформации объемного расширения.

Промежуточная стадия завершается тем, что жидкая фаза может закристаллизоваться в сплаве в результате обогащения кремния тугоплавкой фазой железа.

Завершающая стадия изотермического спекания, называемая процессом твердофазного спекания [37], отличается от промежуточной тем, что границы кристаллитов приобретают способность к миграциям. В результате пора, примыкающая к границе кристаллита, также становится способной к миграциям. Механизм миграции границ кристаллитов и пор вызван дисбалансом сил кристаллограничного и поверхностного натяжения. Пора, расположенная на вершине кристаллита, обладает избыточной энергией и, следовательно, более подвижна, чем поры на границе кристаллита. Если поверхностная энергия превышает кристаллограничную, то происходит миграция поры, которая увлекает за собой границу кристаллита и искривляет ее. Если энергия кристаллограничного натяжения на искривленной границе кристаллита больше, чем поверхностная энергия, то происходит миграция границы кристаллита, который увлекает за собой примыкающую к границе пору.

Влияние границ кристаллитов особенно наглядно, когда к поре примыкает несколько кристаллитов. Граница как бы сдувает пору, встречающуюся на ее пути. Таким образом, движущим механизмом миграции границ кристаллитов и пор является кристаллограничная энергия натяжения на искривленной границе кристаллита. Избыточная энергия обратно пропорциональна радиусу кривизны. При этом наличие разного рода искривленных границ между элементами структуры является определяющим фактором для кинетики уплотнения пористого тела.

Вследствие непрерывной миграции границ кристаллитов и пор более крупные кристаллиты растут в результате поглощения соседних более мелких, а крупные поры увеличиваются в результате слияния мелких пор. В дальнейшем крупные поры становятся неспособны к миграциям, что приводит к снижению скорости рекристаллизации. После того как установится равновесие между кристаллограничной и поверхностной энергией, происходит

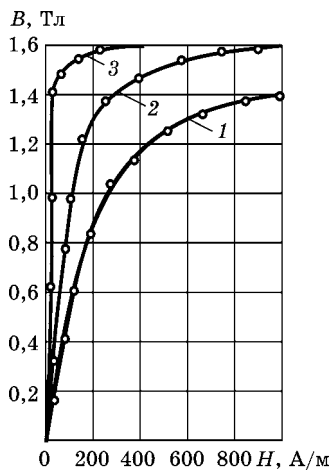


Рис. 4.12
Кривая намагничивания магнитопровода в зависимости от температуры жидкофазного спекания: 1 — 1523 К; 2 — 1608 К; 3 — 1693 К.

спекания прямолинейный участок кривой магнитной индукции проходит значительно круче при одной и той же напряженности магнитного поля. Для магнитопровода, спеченного при температуре 1693 К, требуется низкая напряженность магнитного поля для достижения насыщения стали. Чем ниже напряженность магнитного поля, тем меньшее число витков требуется для функционирования катушки.

Были изучены следующие магнитные характеристики магнитопроводов: коэрцитивная сила (H_c), максимальная магнитная проницаемость (μ_m), магнитная индукция при напряженности 100 А/м (B_{100}), удельное электрическое сопротивление (ρ), удельные потери при индукции 1,0 и 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,0/50}$ и $P_{1,5/50}$) и плотность (γ). Сравнительные данные магнитопровода для толщины слоя (листа) $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, изготовленного из спеченного материала Fe-6,5% Si с нулевой пористостью, и магнитопровода из материала марки 3412 (Э-320), применяемого в магнитных пускателях ПМ 12-040152, представлены в таблице 4.6.

коалесценция пор, т. е. их рассасывание вследствие воздействия механизма диффузии вакансий.

Важно определить влияние температуры жидкофазного спекания на намагничивание магнитопровода. На рисунке 4.12 представлены зависимости кривых намагничивания от температуры жидкофазного спекания. Самое легкое намагничивание происходит при высокой температуре, равной $1,11 T_{пл}$ (1693 К); при температуре спекания 1608 К процесс намагничивания затрудняется; при 1523 К намагничивание еще более затруднено. С повышением температуры

Из таблицы видно, что магнитные характеристики магнитопроводов, изготовленных из сплава Fe–6,5% Si методом жидкофазного спекания, по коэрцитивной силе и максимальной магнитной проницаемости имеют в несколько раз более высокие свойства по сравнению с магнитопроводами, изготовленными из холоднокатаной анизотропной стали марки 3412. Магнитная индукция магнитопровода из сплава Fe–6,5% Si при напряженности 100 А/м имеет более низкую величину по сравнению со сталью марки 3412. Это связано с тем, что кремний не металл (хотя и является химическим элементом с металлическим блеском) и поэтому отрицательно воздействует на магнитные свойства, снижая магнитную индукцию. Чем выше удельное сопротивление магнитопровода, тем меньше удельные потери. Увеличение удельного сопротивления сплава Fe–6,5% Si по сравнению со сталью марки 3412 более чем вдвое приводит к снижению удельных потерь более чем в четыре раза. Более низкий атомный вес кремния в определенной пропорции по сравнению с атомным весом железа в сплаве Fe–6,5% Si приводит к снижению плотности сплава по сравнению с плотностью стали марки 3412.

На основании критической технологии разработана магнитная система для магнитного пускателя типа ПМ 12-040152 (ТУ 16-98ИГФР.644236.03ЗТУ). Магнитные пускатели предназначены для дистанционного пуска, остановки и реверсирования трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (мощность до 18 кВт, номинальный ток 40 А).

Магнитная система состоит из Ш-образного сердечника и Ш-образного якоря. Сердечник имеет следующие номинальные размеры: общая ширина составляет $58,5 \cdot 10^{-3}$ м,

Таблица 4.6

Сравнительные физические параметры магнитопроводов, изготовленных из спеченного материала Fe–6,5% Si, и из электротехнической стали марки 3412 (Э-320)

Материал	H_c , А/м	μ_m	B_{100} , Т	ρ , мкОм·м	$P_{1,0/50}$, Вт/кг	$P_{1,5/50}$, Вт/кг	γ , кг/м ³
Fe–6,5% Si	1,39	269 450	1,63	1,12	0,23	0,5	6930
3412 (Э-320)	47,8	11 500	1,52	0,5	0,95	2,1	4650



общая высота — $18,4 \cdot 10^{-3}$ м, ширина двух крайних кернов — по $11 \cdot 10^{-3}$ м, ширина среднего керна — $13 \cdot 10^{-3}$ м, высота перемычки в основании сердечника для прохождения магнитного потока между средним и крайними кернами — $6,3 \cdot 10^{-3}$ м. Общая ширина якоря составляла $54,3 \cdot 10^{-3}$ м, общая высота — $21,5 \cdot 10^{-3}$ м, ширина двух крайних кернов — по $8,8 \cdot 10^{-3}$ м, ширина среднего керна — $12,2 \cdot 10^{-3}$ м, высота перемычки в основании якоря для прохождения магнитного потока между средним и крайними кернами — $6,3 \cdot 10^{-3}$ м. Сердечники и якоря выполнены одинаковой толщины — $14 \cdot 10^{-3}$ м, имеют 28 слоев толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м каждый.

Втягивающая катушка выполнена из провода диаметром $0,15 \cdot 10^{-3}$ м марки ПЭТВ-2 на напряжение 220 В, 50 Гц и имеет 4000 витков и сопротивление 365 ± 18 Ом.

Все детали магнитной системы установлены в корпус магнитного пускателя типа ПМ 12-040152.

Надежность функционирования магнитного пускателя опытного образца отражает его электромагнитная (тяговая) и механическая (противодействующая) характе-

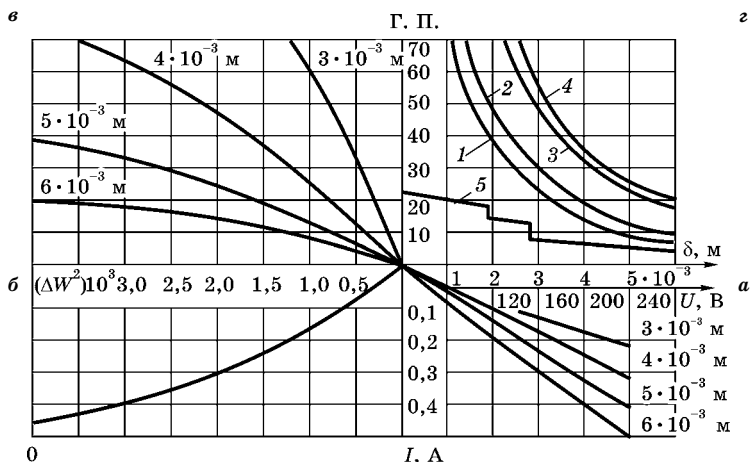


Рис. 4.13

Тяговая и механическая характеристики магнитных систем:

1 — серийного образца магнитного пускателя ПМ 12-040152 при $0,85 U_H$; 2 — того же образца при U_H ; 3 — опытного образца при $0,85 U_H$; 4 — того же образца при U_H ; 5 — механическая характеристика магнитного пускателя.

ристики, представленные на рисунке 4.13, где приведена электромагнитная характеристика магнитного пускателя аналогового серийно выпускаемого образца типа ПМ 12-040152.

Алгоритм снятия тяговой характеристики магнитного пускателя следующий.

1. Снимаем вольт-амперную характеристику электромагнитной системы в зависимости от положения хода якоря (рис. 4.13а).

2. Рассчитываем зависимость квадрата намагничивающей силы $(AW)^2$ от силы тока катушки (рис. 4.13б).

3. Измеряем зависимость электромагнитного усилия якоря от квадрата намагничивающей силы $(AW)^2$ при различном положении хода якоря (рис. 4.13в).

4. Строим график зависимости электромагнитной характеристики электромагнита от хода якоря при значении напряжения $0,85 U_H$ (187 В) и номинальном значении напряжения (рис. 4.13г).

5. Строим график механической (противодействующей) характеристики электромагнита от положения хода якоря (рис. 4.13з).

Кривая зависимости электромагнитных сил от хода якоря должна находиться выше кривой характеристики противодействующих сил. Для аналогового образца заключенная между ними площадь является оптимальной и обеспечивает функционирование при $0,85 U_H$ (187 В), для опытного образца — определяет излишнюю механическую энергию, расходуемую на удар и вибрацию при включении и преждевременно изнашивающую магнитный пускатель. Необходимо выбрать предельный магнитный режим стали магнитной системы, чтобы сталь была не насыщена в отключенном состоянии магнитного пускателя и насыщена во включенном.

Электромагнитную систему можно подкорректировать следующим образом: уменьшить размеры сечения магнитной системы и заложить меньший параметр ампер-витков в конструкцию катушки. Расчеты показывают, что для разработки магнитной системы имеется другой вариант — переход на более высокий тип магнитного пускателя

с номинальным током 63 А. Физическая суть повышения магнитных свойств состоит в том, что с повышением температуры жидкофазного спекания увеличивается концентрация доменов и уменьшается плотность дислокаций, вследствие чего увеличивается скорость движения доменных границ.

Для приблизительного определения любого основного параметра технологии изготовления магнитопровода по двум заданным можно применить формулу объединенного закона Бойля — Мариотта и Гей-Люссака, выведенную для кинетической теории газов:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_0 V_0}{T_0}, \quad (4.9)$$

где p_1 , V_1 , T_1 — текущие параметры давления прессования, объема заготовки и температуры спекания; p_0 , V_0 , T_0 — номинальные параметры давления прессования, объема заготовки и температуры спекания.

Объем заготовки можно определить по формуле

$$V_1 = S h_1; \quad V_0 = S h_0, \quad (4.10)$$

где S — площадь сечения заготовки; h_1 — текущая высота прессовки; h_0 — номинальная высота прессовки.

Принимая во внимание (4.10), формулу (4.9) можно преобразовать так:

$$\frac{p_1 h_1}{T_1} = \frac{p_0 h_0}{T_0}. \quad (4.11)$$

Для сплава Fe–6,5% Si приводим следующие номинальные параметры: $p_0 = 2700$ МПа; $h_0 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м; $T_0 = 1713$ К.

По двум заданным текущим параметрам $p_1 = 1000$ МПа, $h_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м можно приблизительно определить температуру спекания прессовки из формулы (4.11):

$$T_1 = \frac{p_1 h_1 T_0}{p_0 h_0} = \frac{1000 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1713}{2700 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}} = 1586 \text{ К.}$$

Таким образом, разработана критическая технология производства магнитомягких материалов Fe–6,5% Si и изделий из них, обладающих беспористой структурой и высокими магнитными свойствами. Исследования пока-



зали, что жидкофазное спекание наиболее эффективно при высоком давлении прессования $1,0 \dots 1,8 p_n$ (где p_n — достигнутый ранее уровень давления прессования) и высокой температуре спекания $1,00 \dots 1,1 T_{пл}$ (где $T_{пл}$ — температура плавления легкоплавкой лигатуры).

4.7. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ МПМ

Физико-механические свойства магнитных материалов, применяемых в электротехнических изделиях, необходимо учитывать при проектировании деталей, разработке технологических процессов, выборе сплавов, обосновании конструкторских разработок, расчетах на прочность деталей и узлов, а также при анализе и сопоставлении условий эксплуатации деталей в различных режимах.

В опубликованной литературе имеются данные о физико-механических свойствах сплавов кремния с железом, полученных по методу горячекатаной стали, но недостаточно сведений о физико-механических свойствах сплава кремния с железом, полученных МПМ.

Попытки исследовать механические свойства сплава кремния с железом описаны в различных работах [9; 53; 123]. Предел прочности при растяжении с увеличением содержания кремния в сплаве до 4,5% по сравнению с технически чистым железом возрастает до максимального значения в 2,6 раза, но затем при возрастании доли кремния до 6,5% уменьшается по сравнению с максимальным значением в 6,5 раз и становится равным 100 МПа. Предел текучести с увеличением содержания кремния в сплаве до 4,5% по сравнению с технически чистым железом возрастает до максимального значения почти в 5 раз, а затем при росте доли кремния до 6,5% падает по сравнению с максимальным значением в 5 раз и становится равным 100 МПа. Предел прочности при растяжении и предел текучести с увеличением содержания кремния в сплаве до 7% одновременно уменьшаются до нуля.

Относительное удлинение с увеличением содержания кремния в сплаве до 2,5% по сравнению с технически



чистым железом уменьшается в 3 раза, а относительное уменьшение площади поперечного сечения сокращается более чем в 4 раза. При дальнейшем увеличении содержания кремния до 5% как относительное удлинение, так и относительное уменьшение площади поперечного сечения сплава одновременно становятся равными нулю.

Для определения параметров механических свойств деталей электротехнических изделий и механизмов при действии различных видов нагрузок проводили статические и динамические испытания.

Сравнительные испытания магнитопровода по пределу прочности при статических деформациях сжатия, кручения, изгиба и растяжения, а также данные по проверке твердости сплава, относительного удлинения и относительного уменьшения площади поперечного сечения представлены в таблице 4.7. Кроме того, в этой таблице приведены значения ударной вязкости.

Деформация образцов на сжатие и растяжение, как правило, заканчивается их разрушением, что приводит к разделению на части и возникновению новых поверхностей — поверхностей изломов.

Предел прочности на сжатие с увеличением содержания кремния в сплаве до 5% возрастает до максимального

Таблица 4.7

Механические свойства сплава Fe-6,5% Si

№ п/п	Показатели	Температура спекания		
		0,84 $T_{пл}$	0,88 $T_{пл}$	0,92 $T_{пл}$
1	Предел прочности при сжатии, МПа	515	658	787
2	Предел прочности при кручении, МПа	372	503	619
3	Предел прочности при изгибе, МПа	94	122	137
4	Предел прочности при растяжении, МПа	73	102	118
5	Твердость, HV	140	210	250
6	Относительное удлинение, %	0	0	0
7	Относительное уменьшение площади поперечного сечения, %	0	0	0
8	Ударная вязкость КСИ, Дж/см ²	2	3,8	6

значения, затем начинает уменьшаться. Изучением параметра решетки сплава кремния с железом в зависимости от содержания кремния занимались М. Фаркухар и А. Вейль [217]. Они установили, что как только содержание кремния превышает 5%, параметр решетки скачкообразно уменьшается на большую величину, что связывается с началом упорядочения сплава. Поэтому сплав при увеличении содержания кремния до 5% достигает экстремального значения предела прочности на сжатие, которая с дальнейшим увеличением содержания кремния начинает уменьшаться.

Деформация на кручение осуществляется двумя равными по значению и противоположно направленными моментами, которые прикладываются к концам образца в плоскостях, нормальных к его продольной оси. При кручении в поперечных сечениях возникают касательные напряжения. В отличие от деформации сжатия, при испытании на кручение до разрушения можно довести как хрупкий, так и пластичный материал. На сплаве Fe–6,5% Si происходит разрушение по типу «скалывание» в основном под углом 45° к оси образца; при этом трещина, распространяясь, часто повторяет волнистую форму линии скольжения.

Целесообразность проведения испытаний на изгиб по сравнению с испытаниями на сжатие и кручение обусловлена применением большого числа деталей электротехнических изделий, работающих в условиях постоянно действующих изгибающих сил. Деформация сплавов проводилась до появления первой трещины, соответствующей приложенной максимальной нагрузке.

Испытания на твердость, по Виккерсу, показали, что с увеличением содержания кремния до 5% твердость, начиная с 68 для железного образца, резко увеличивается, достигая экстремального значения 273. При доле кремния 6,5% значение твердости приближается к 250. При дальнейшем увеличении содержания кремния твердость плавно уменьшается.

Испытания образцов на статические свойства — необходимое, но недостаточное условие для определения



прочности сплава, так как механические свойства образцов, определенные медленными повышениями нагрузки, часто не соответствуют реальным условиям работы деталей при эксплуатации. Это обстоятельство привело к необходимости исследовать свойства сплавов при динамических нагрузках.

Кремний в небольшом количестве (до 1%) содействует образованию мелкозернистой структуры, благодаря чему повышается сопротивление сплава хрупкому разрушению и соответственно увеличивается ударная вязкость до экстремального значения, равного 39 Дж/см² (при температуре спекания 0,92 $T_{пл}$). С дальнейшим увеличением содержания кремния от 1 до 4...5% значительно падает пластичность сплава и в то же время возрастает его прочность, что снижает ударную вязкость при температуре спекания 0,92 $T_{пл}$ до 7,7 Дж/см². Ударная вязкость для сплава Fe-6,5% Si при температуре спекания 0,92 $T_{пл}$ равна 6 Дж/см².

Полученные результаты свидетельствуют о том, что сплав Fe-6,5% Si может быть успешно применен в качестве конструкционного материала для изготовления магнитопроводов электротехнических изделий.

4.8. ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Эффективность реализации больших технологических возможностей порошковой металлургии во многом обуславливается использованием надежных методов оперативного контроля точности и качества изготовления магнитных систем.

Для уменьшения электрических потерь в спеченных слоистых магнитных системах необходимо надежно изолировать активные слои, иначе электрические потери возрастут до больших величин. Конструкция магнитопровода электрического изделия переменного тока представляет собой пакет, спрессованный из слоев толщиной $(0,1...1,0) \cdot 10^{-3}$ м кремнистого железа с содержанием 6,5%

кремния с чередованием изоляционных диэлектрических прослоек. Объектом анализа технологической точности и качества изготовления магнитных систем послужили изделия с П-, Ш-, Г-, С-, Т-, Б-, Н-образными магнитопроводами, толщина слоев которых составляла $0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Число активных слоев равно 30. Между ними имеется изоляционная ферритовая диэлектрическая прослойка толщиной $0,06 \cdot 10^{-3}$ м, а толщина защищенного покрытия магнитопровода от коррозии составляет $0,025 \cdot 10^{-3}$ м.

Рассчитаем разброс ширины пакета магнитопровода для закона нормального распределения, так как элементы магнитопровода изготавливались со следующими отклонениями от нормальных размеров:

- для железокремнистого слоя $A_1 = 0,5 \pm 0,02$ мм;
- для изоляционной прослойки $A_2 = 0,06 \pm 0,0085$ мм;
- для защитного покрытия $A_3 = 0,025 \pm 0,004$ мм.

С учетом дисперсии замыкающего и составляющих звеньев магнитопровода соотношение между допусками имеет следующий вид:

$$t_{\Sigma} = t \sqrt{\sum \lambda_1' T^2}, \quad (4.12)$$

где $t = 3$ — коэффициент, учитывающий вероятность риска 0,27%; λ' — коэффициент, учитывающий принятый процент риска P с вероятностью выхода размера замыкающего звена за рассчитанные пределы 0,27%; T — размер допуска звеньев магнитопровода.

Составим уравнение размерной цепи и определим номинальную ширину пакета магнитопровода, которая определяется толщиной железокремнистого активного слоя, толщиной изоляционной диэлектрической прослойки, толщиной защитного покрытия от коррозии, числом слоев активного материала, изоляции и защитного покрытия [115]:

$$\begin{aligned} A_{\Sigma} &= nA_1 + mA_2 + kA_3 = \\ &= 30 \cdot 0,5 + 29 \cdot 0,006 + 2 \cdot 0,025 = 16,79 \text{ мм}, \end{aligned}$$

где n — число слоев железокремнистого активного материала; $m = (n - 1)$ — число изоляционных диэлектрических прослоек; k — число защитных покрытий по ширине магнитопровода.

Рассчитаем средние отклонения полей допусков составляющих звеньев и замыкающего звена магнитопровода:

$$\Delta C_1 = \frac{(+0,02) + (-0,02)}{2} = 0; \quad \Delta C_2 = \frac{(+0,0085) + (-0,0085)}{2} = 0;$$

$$\Delta C_{\Sigma} = \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3 = 0.$$

Определим допуск замыкающего звена магнитопровода:

$$t_{\Sigma}^B = t \sqrt{\sum \lambda_1' T} =$$

$$= 3 \cdot 1/3 \sqrt{0,04^2 \cdot 30 + 0,017^2 \cdot 29 + 0,008^2 \cdot 2} = 0,26 \text{ мм},$$

где $T_1 = 0,04$ мм; $T_2 = 0,017$ мм; $T_3 = 0,008$ мм.

Сравним размер допуска T_{Σ} по методу максимум — минимум [115]:

$$T_{\Sigma} = nT_1 + mT_2 + kT_3 =$$

$$= 30 \cdot 0,04 + 29 \cdot 0,017 + 2 \cdot 0,008 = 1,709 \text{ мм};$$

$$t_{\Sigma}^B < T_{\Sigma}.$$

Определим предельные отклонения замыкающего звена магнитопровода [115]:

$$S_{\Sigma}^B = \Delta C_{\Sigma} + 1/2 T_{\Sigma} = 0 + 0,13 = +0,13 \text{ мм};$$

$$I_{\Sigma}^B = \Delta C_{\Sigma} - 1/2 T_{\Sigma} = 0 + (-0,13) = -0,13 \text{ мм}.$$

Определим предельные размеры ширины магнитопровода [115]:

$$A_{\Sigma \max} = A_{\Sigma} + S_{\Sigma}^B = 16,79 + (+0,13) = 16,92 \text{ мм};$$

$$A_{\Sigma \min} = A_{\Sigma} + I_{\Sigma}^B = 16,79 + (-0,13) = 16,66 \text{ мм}.$$

Следовательно, номинальный размер ширины пакета магнитопровода с определенным размером допуска составляет

$$A_{\Sigma} = 16,79 \pm 0,13 \text{ мм}.$$

Рассчитанный магнитопровод устанавливается в окно пластмассовой обоймы размером $17,56 \pm 0,4$ мм по свободной посадке.

С целью проведения контроля на наличие изоляционной диэлектрической прослойки спеченные слоистые образцы магнитопроводов разрезались на наждачном



станке с установленным на нем алмазным кругом. Шлифы готовились на шлифовальном станке модели 3881 и полировальном станке модели 3881 Б фирмы «Нерис» (Латвия). На станок модели 3881 были последовательно установлены четыре шлифовальные шкурки фирмы «Клингспор» (Германия). Первоначальная обработка поверхностей производилась

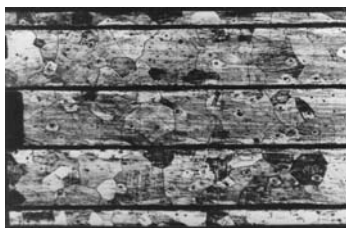


Рис. 4.14

Снимок поперечного сечения магнитной системы с ферритовыми диэлектрическими прослойками на фоне кристаллической структуры сплава Fe-6,5% Si. Увеличение $\times 60$

на шкурках с последовательно уменьшающимися размерами зерен следующих типов: P-150, P-320, P-600, P-1000 (самое мелкое зерно). Затем на полировальном круге станка модели 3881 Б было закреплено сукно и с помощью суспензии порошка окиси хрома осуществлялась окончательная полировка и доводка поверхности образца магнитопровода. Химическое травление происходило в 4% -ном растворе азотной кислоты в спирте в течение 240 с, после чего образец высушивался струей теплого сжатого воздуха.

Наблюдение и фотографирование изоляционных диэлектрических прослоек проводилось на металлографическом микроскопе модели «Неофот-32» фирмы «Карлцейс Йена» (Германия). На рисунке 4.14 приведена фотография микроструктуры поперечного разреза торцевой части магнитной системы на глубине $3 \cdot 10^{-3}$ м от поверхности магнитопровода. Толщина магнитного слоя составляет $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, толщина изоляционной диэлектрической прослойки — $0,04 \cdot 10^{-3}$ м.

На снимке видны сплошные линии изоляционных ферритовых диэлектрических прослоек, на фоне которых заметны кристаллиты почти равноосной полиэдрической формы. Кристаллиты имеют размеры в основном 170...240 мкм, но иногда достигают величины 460 мкм. Все кристаллиты находятся в пределах прослоек, не пересекая и не продавливая их. Прослойки идут почти

Таблица 4.8

**Сопротивление различных магнитопроводов
в направлении поперечного сечения изоляционных прослоек**

Типы магнитных систем	П	Ш	Г	С	Т	Б	Н
Поперечное сопротивление магнитопровода, МОМ	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

параллельно без искажений, линии непрерывны и не размазаны.

Измерение сопротивления изоляции в крайних точках, произведенное мегомметром М 1101, показало, что для П-, Ш-, Г-, С-, Т-, Б-, Н-образных магнитных систем оно равно бесконечности (табл. 4.8).

Измерение сопротивления в крайних точках боковой поверхности магнитопровода дает гарантию введения в эксплуатацию магнитных систем без повышенного риска увеличения удельных электрических потерь. Для контроля дополнительно было разрушено по два магнитопровода от П-, Ш-, Г-, С-, Т-, Б-, Н-образных магнитных систем, но при этом не было зарегистрировано локального разрушения и прерывания изоляционных прослоек.

С целью получения требуемых размеров и качества поверхностей изделия нередко подвергают калиброванию. Эта операция обеспечивает получение качеств точности 5...6 и чистоты шероховатости поверхности класса 7.

Результаты анализа технологической точности и качества изготовления магнитных систем показали, что изоляционные диэлектрические прослойки толщиной $0,04 \cdot 10^{-3}$ м для магнитопроводов с толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ надежно изолируют соседние активные слои от вихревых токов.

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

- Какой электроизоляционный материал в магнитной системе переменного тока имеет повышенную магнитную индукцию, если слои выполнены напылением:
 - ферритовой пудрой;
 - окисью магния;
 - кварцевой пудрой?
- Как пропитка магнитных систем переменного тока минеральными маслами влияет на их механическую износостойкость?

3. Как меняется величина механического износа слоистой магнитной системы, если в нее вставлена капсула, заполненная пропитанным в минеральном масле волокнистым материалом?
4. Как различные парциальные коэффициенты диффузии влияют на эффект Киркендалла?
5. Как изменяется пористость прессовки в зависимости от энергии разряда конденсатора при магнитно-импульсном прессовании?
6. Характеристическое уравнение, составленное для замкнутой цепи конденсатора и индуктора, имеет вид

$$p^2 + \frac{r}{L}p + \frac{1}{LC} = 0.$$

Вычислить, при каком разряде конденсатора его корни вещественны и отличны друг от друга.

7. Объясните влияние критической технологии изготовления магнитной системы на ее качество.
8. Вычислить температуру спекания прессовки по формуле

$$T_1 = P_1 H_1 T_0 / P_0 H_0,$$

где $P_1 = 1000$ МПа, $H_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $T_0 = 1713$ К, $P_0 = 2700$ МПа, $H_0 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

9. Вычислить капиллярное давление твердых частиц жидкими прослойками при спекании по закону П. С. Лапласа

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где $\sigma = 1,25$ Н/м, $R_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $R_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

10. Как в магнитном материале увеличение энергии разряда при магнитно-импульсном прессовании деталей влияет на коэрцитивную силу?

5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

5.1. ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ МАТЕРИАЛОВ МПМ

В связи с возрастающим выпуском магнитопроводов для различных электротехнических устройств становятся актуальными задачи их удешевления и упрощения технологии изготовления.

Несмотря на оптимизацию раскроя электротехнической стали и усовершенствование технологического процесса, отходы электротехнической стали по-прежнему велики, а технология изготовления магнитопроводов все еще сложна. Применение порошковой металлургии позволяет перейти к малооперационной технологии производства магнитопроводов и значительно сократить отходы материалов. Кроме того, изготовление магнитопроводов методами порошковой металлургии взамен листовых магнитопроводов, в основном выполненных из электротехнической стали марки 3411, в настоящее время экономически целесообразно.

Предлагаем описание сравнительного испытания магнитопроводов, изготовленных методом порошковой металлургии и скомпонованных из листов электротехнической стали. Магнитопроводы производились из чередующихся слоев кремнистого железа ($6...6,5\% \text{ Si}$) и изоляционного слоя марганец-цинкового феррита с последующим спеканием при температуре $1620...1670 \text{ K}$ (разрежение $133,32 \cdot 10^4 \text{ Па}$) в печи типа СШВЛ-0.6.2/16М1; толщина слоев составляла $0,5 \cdot 10^{-3}$ и $0,01 \cdot 10^{-3}$ м соответственно.

При содержании $6...6,5\% \text{ Si}$ и $92...93\% \text{ Fe}$ в магнитопроводе наблюдается наибольшее значение максимальной

магнитной проницаемости, магнитострикция близка к нулю, а константа магнитной анизотропии составляет всего $16 \cdot 10^3$ Дж/м³.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что слоистые магнитопроводы по своим свойствам превосходят магнитопроводы из кремнистых электротехнических сталей марок 1571 и 3411 (рис. 5.1). В средних полях до 200 А/м кривая намагничивания слоистого магнитопровода проходит выше кривых намагничивания для сталей марок 1571 и 3411. На вставке приведена осциллограмма постоянного тока включения втягивающей катушки при движении якоря, изготовленного из спеченного материала с различной пористостью: 1 — пористость 3%; 2 — пористость 12%; 3 — пористость 26%; 4 — пористость 35%; 5 — пористость 44%. Осциллографирование динамических процессов производилось с помощью осциллографа С8-2. Процесс изменения тока в катушке при движении якоря с повышением пористости магнитопровода в значительной мере усложняется в связи с заметным изменением индуктивности магнитной системы. Поскольку

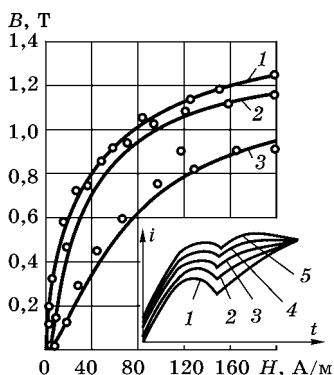


Рис. 5.1

Сравнительные кривые намагничивания кольцевых магнитопроводов:

1 — слоистый магнитопровод с 6,0... 6,5% Si и 92...93% Fe; 2 — магнитопровод из электротехнической стали 3411; 3 — магнитопровод из электротехнической стали 1571.

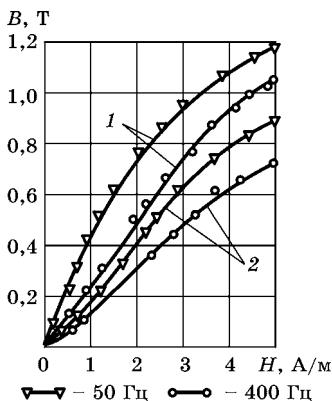


Рис. 5.2

Сравнительные кривые намагничивания кольцевых образцов, полученные в переменном поле:

1 — слоистый магнитопровод; 2 — магнитопровод из электротехнической стали 1571.

основное применение слоистые магнитопроводы имеют в области переменных полей, были проведены сравнительные измерения кривых намагничивания слоистых и листовых магнитопроводов в условиях переменных полей частотой 50 и 400 Гц (см. рис. 5.2). Испытания показали, что слоистые магнитопроводы как на частоте 50 Гц, так и на частоте 400 Гц по магнитным свойствам значительно превосходят магнитопроводы из электротехнической стали марки 1571. Слоистые магнитопроводы могут быть использованы при работе на повышенной частоте 400 Гц.

Магнитная индукция насыщения и магнитострикция магнитопроводов с повышением температуры уменьшаются. Зависимость температуры нагрева магнитопровода от частоты перемагничивания приведена на рисунке 5.3.

Различная частота задавалась с помощью генератора ГЗ-33. Температура измерялась при постоянной амплитуде напряжения на задающем генераторе с помощью хромель-алюмелевых термопар диаметром $0,15 \cdot 10^{-3}$ м. На рисунке видно, что при увеличении частоты перемагничивания температура нагрева магнитопровода повышается, но кривая изменения температуры нагрева слоеного магнитопровода при хорошей изоляции между слоями

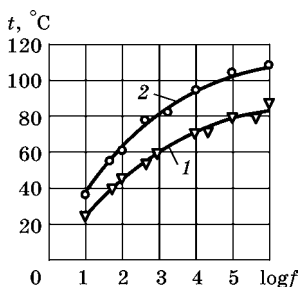


Рис. 5.3
Зависимость температуры нагрева кольцевых магнитопроводов от частоты перемагничивания:

1 — слоистый магнитопровод с 6,5% Si и 93% Fe; 2 — образец магнитопровода из электротехнической стали 3411.

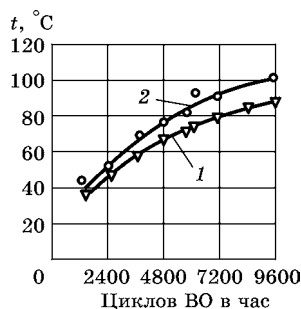


Рис. 5.4
Зависимость температуры нагрева магнитопроводов от частоты срабатывания реле:

1 — слоистая магнитная система из материала 6,5% Si и 93% Fe; 2 — магнитная система из электротехнической стали 3411.

проходит ниже кривой температуры нагрева листового магнитопровода, так как удельное электрическое сопротивление сплава, содержащего 6,5% Si и 93% Fe, составляет $(82...88) \cdot 10^{-10}$ Ом·м, а удельное электрическое сопротивление сплава 3,3...3,6% Si и 94,7...95,9% Fe — $(49...54) \cdot 10^{-10}$ Ом·м. Это свидетельствует о том, что исследуемый магнитопровод достаточно долго может работать при высокой частоте.

Зависимость температуры нагрева магнитопровода от частоты срабатывания проверялась на Ш-образных магнитопроводах, установленных на реле переменного тока РПУ-1. Задание режима работы магнитных систем производилось задающим устройством — мультивибратором, позволяющим регулировать частоту срабатывания от 360 до 2500 циклов включений-отключений (ВО) в час и продолжительность включения (ПВ) от 10 до 90%. Причем на выходе мультивибратора нагрева было установлено герконовое реле типа РПГ-110212/УЗ на напряжение питания 24 В. С увеличением частоты срабатывания температура нагрева магнитопровода возрастает (рис. 5.4), но при увеличении частоты срабатывания свыше 9600 циклов ВО в час повышения температуры не происходит, так как наступает установившийся режим.

Измерения производились на магнитопроводах, геометрия которых аналогична серийным. Одновременно было измерено превышение температуры нагрева втягивающей катушки, которая для слоистого магнитопровода составила 311,5 К, для компактного листового магнитопровода 316 К (погрешность измерения составляет около 2% при доверительной вероятности 0,95). Для сравнения эти измерения проводились с одной и той же втягивающей катушкой, обмоточные данные которой имеют следующие параметры: число витков $w = 5000$, диаметр провода $d_{\text{пр}} = 0,13 \cdot 10^{-3}$ м, марка провода ПЭВ-2. При уменьшении диаметра провода d перегрев может быть значительно уменьшен, и, кроме того, необходимо иметь в виду, что для магнитопровода, выполненного из другого материала, необходимы свои расчетные параметры катушки.

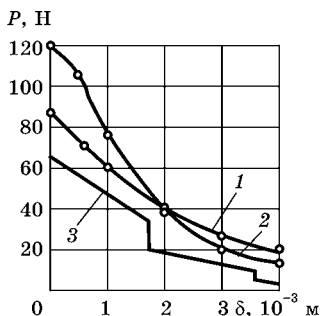


Рис. 5.5

Тяговые характеристики электромагнитной системы реле (зависимость тягового усилия P от зазора между якорем и сердечником δ):

1 — слоистая магнитная система из материала 6,5% Si и 92...93% Fe; 2 — магнитная система из электро-технической стали 3411; 3 — противодействующая характеристика реле.

лечения тяговая характеристика реле со слоистым магнитопроводом лучше согласуется с противодействующей характеристикой реле, чем тяговая характеристика реле с листовым магнитопроводом, выполненным из электро-технической стали марки 3411. Известно, что удельные электрические потери для электро-технической стали марки 3411 при частоте 50 Гц составляют $P_{1/50} = 1,1 \text{ Вт/кг}$, для слоистого магнитопровода с толщиной слоев $0,5 \times 10^{-3} \text{ м}$ — $0,23...0,45 \text{ Вт/кг}$. Удельные потери должны быть снижены в тех устройствах, которые постоянно находятся под напряжением. Например, для электросчетчиков бытовых приборов СО-И446, СО-И449, СО-И2МГ гарантируемые удельные потери не должны превышать $0,5 \text{ Вт/кг}$ (при магнитной индукции магнитопровода $0,7 \text{ Т}$). Варьируя толщину слоев слоистых магнитопроводов от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, удельные потери можно оперативно изменять.

Для расширения функциональных возможностей электромагнитов переменного тока со слоистыми магнитопроводами были исследованы характеристики электромагни-

В целях сопоставления тяговые характеристики были сняты с одной и той же втягивающей катушки для реле РПУ-1 с магнитопроводами из слоистого материала и электро-технической стали марки 3411, геометрия которых аналогична серийным образцам (рис. 5.5).

Тяговые характеристики реле с магнитопроводом из электро-технической стали имеют более крутой характер по сравнению с относительно пологими тяговыми характеристиками реле с магнитопроводом из слоистого материала. Исследования показали, что при выбранной технологии изготов-

тов переменного тока со спеченными магнитопроводами, полученными прессованием порошков при различных уровнях давления.

Условные кривые намагничивания слоистых магнитопроводов с учетом их пористости приведены на рисунке 5.6, на котором видно, что с повышением усилия прессования магнитная индукция при той же напряженности поля возрастает.

Испытания показали, что при повышении давления прессования кратность пускового тока увеличивается (рис. 5.7).

При изменении режима прессования от 500 до 2000 МПа кратность пускового тока для слоистой магнитной системы изменяется в пределах 1,12...1,73 для разомкнутого положения якоря (листовые магнитопроводы из электротехнической стали марки 3411 имеют кратность пускового тока 3,2). Процесс квазистатического изменения тока вызван относительно малым изменением магнитного потока рассеяния при срабатывании электромагнита. Использование этого явления приводит к уменьшению электродинамических сил в управляющих катушках электрических аппаратов за счет снижения взаимодействия

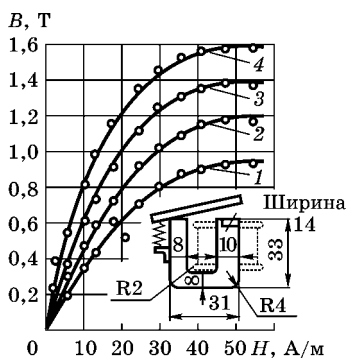


Рис. 5.6

Кривая намагничивания слоистого магнитопровода, изготовленного под различным давлением прессования, МПа:

1 — 500; 2 — 1000; 3 — 1500; 4 — 2000.

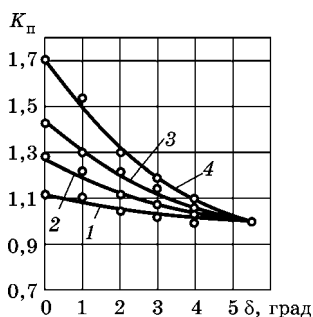


Рис. 5.7

Зависимость кратности $K_{п}$ пускового тока от положения якоря δ слоистой магнитной системы, изготовленной под различным давлением прессования, МПа:

1 — 500; 2 — 1000; 3 — 1500; 4 — 2000.

проводников тока с магнитным полем или к уменьшению взаимодействия между проводниками с током.

С ростом давления прессования от 500 до 2000 МПа коэффициент мощности падает от 0,7 до 0,45, так как доля активной мощности в электромагните с возрастанием давления прессования уменьшается (рис. 5.8).

Измерения времени срабатывания якоря электромагнита в зависимости от пористости производились с помощью электронного миллисекундомера Ф-209. На рисунке 5.9 видно, что чем больше пористость, тем меньше время срабатывания.

При большой пористости магнитопровода электромагнит обладает высокой скоростью срабатывания якоря. Изготовление магнитопроводов из слоистых магнитомягких материалов большой пористости можно рекомендовать в тех случаях, когда по условиям работы требуется большая частота срабатывания якоря электромагнита и быстродействие. Известно, что время срабатывания ферропорошковых муфт составляет менее 1...2 мс, т. е. в 12...15 раз меньше, чем в электромагнитных муфтах.

Высокая скорость срабатывания электромагнита связана с уменьшением вихревых токов в магнитопроводе из-за сокращения контакта между ферромагнитными частицами. Изменяя давление прессования магнитопроводов при изготовлении, мы мо-

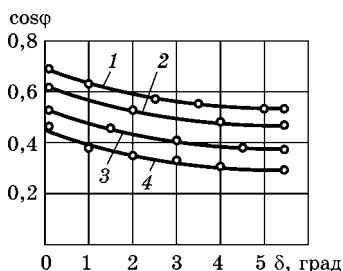


Рис. 5.8

Зависимость коэффициента мощности $\cos\phi$ от положения якоря δ слоистой магнитной системы, изготовленной под различным давлением прессования, МПа:

1 — 500; 2 — 1000; 3 — 1500; 4 — 2000.

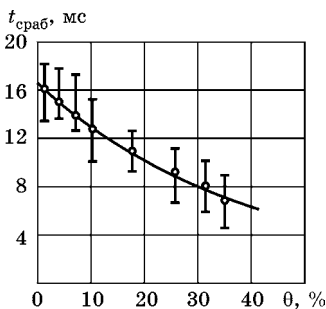


Рис. 5.9

Зависимость времени срабатывания якоря электромагнита от пористости θ спеченной магнитной системы

жем управлять временем срабатывания якоря электромагнита в диапазоне 7...16 мс, в то время как для электромагнитов, скомпонованных из листов, это значение постоянно и составляет 16 мс.

Четыре тяговые характеристики электромагнитов переменного тока, полученные при различных давлениях прессования слоистых магнитопроводов в пределах 500...2000 МПа, представлены на рисунке 5.10, из которого видно, что путем изменения давления прессования слоев магнитопровода тяговые характеристики электромагнита можно регулировать в широких пределах.

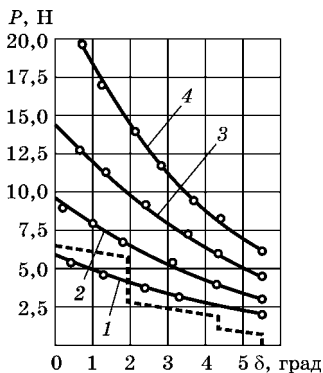


Рис. 5.10

Кривые изменения характеристик электромагнитов переменного тока, магнитные системы которых изготовлены из спеченного магнитомягкого материала под различным давлением прессования, МПа:

1 — 500; 2 — 1000; 3 — 1500; 4 — 2000.

5.2. ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНОЙ ФОРМЫ СХЕМЫ ПРЕССОВАНИЯ

В России рынок электротехнической промышленности — один из развивающихся наиболее динамично. Поэтому с развитием электротехнической промышленности и расширением номенклатуры продукции возникла потребность в создании новых перспективных видов магнитных систем. Для расширения функциональных возможностей создано четыре новых класса:

1-й — простые слоистые магнитные системы (прессование без вариаций давления);

2-й — монодискретные магнитные системы (прессование с эквидистанционной вариацией давления);

3-й — полидискретные магнитные системы (прессование при дифференциальном давлении);

4-й — композиционные магнитные системы (прессование элементов магнитных систем на основе сочетания МММ и МТМ).

5.2.1. ПРЕССОВАНИЕ БЕЗ ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Современная технология производства электрических аппаратов, электродвигателей, трансформаторов, измерительных приборов, дросселей и других устройств предполагает изготовление магнитных систем из электротехнических сталей. Магнитные системы выполняются шихтованными и набираются из одинаковых тонких листов электротехнической стали, имеющей одинаковые свойства [115].

Использование магнитопроводов из спеченных цельноспрессованных материалов в устройствах переменного тока затруднено из-за больших удельных магнитных потерь в них по сравнению с шихтованными магнитопроводами из электротехнической стали, так как потери на вихревые токи растут пропорционально квадрату толщины листа. Попытки получить магнитопроводы из сплава кремния с железом с плоскими диэлектрическими прослойками пока не увенчались успехом [172].

Для расчета и изготовления сложных магнитопроводов переменного тока были применены матричные формы. Прессование слоев для магнитных систем переменного тока производилось в виде структурной матричной схемы следующего вида:

$$\left\| \begin{array}{ccccccc} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2m} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \dots & P_{3j} & \dots & P_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & P_{i3} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & P_{nj} & \dots & P_{nm} \end{array} \right\|, \quad (5.1)$$

где P_{11}, \dots, P_{nm} — компоненты матричной схемы.

Компоненты структурной матричной формы схемы прессования (5.1) образуют слои магнитопровода. Общее количество строк в матричной схеме равно числу пакетов магнитопровода, число столбцов равно числу слоев в пакете магнитопровода.

Способ изготовления магнитопровода характерен тем, что прессование производят послойно при одном и том же

давлении, каждый слой для образования диэлектрической прослойки покрывают водной суспензией на основе ферритовой пудры, что позволяет, с одной стороны, значительно уменьшить вихревые токи (так как удельное сопротивление этой ферритовой пудры в $10^6 \dots 10^{12}$ раз больше удельного сопротивления сплава кремния с железом), с другой — повысить магнитную индукцию магнитопровода, поскольку феррит является магнитным материалом (авт. свид. № 712902).

Простое прессование магнитопровода без вариаций давления осуществляется при следующих элементах.

Элементы строк:

$$\left. \begin{array}{l} P_{11} = P_{12} = P_{13} = \dots = P_{1j} = P_{1m} \\ P_{21} = P_{22} = P_{23} = \dots = P_{2j} = P_{2m} \\ P_{31} = P_{32} = P_{33} = \dots = P_{3j} = P_{3m} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ P_{i1} = P_{i2} = P_{i3} = \dots = P_{ij} = P_{im} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ P_{n1} = P_{n2} = P_{n3} = \dots = P_{nj} = P_{nm} \end{array} \right\} \quad (5.2)$$

Элементы столбцов:

$$\left. \begin{array}{l} P_{11} = P_{21} = P_{31} = \dots = P_{i1} = P_{n1} \\ P_{12} = P_{22} = P_{32} = \dots = P_{i2} = P_{n2} \\ P_{13} = P_{23} = P_{33} = \dots = P_{i3} = P_{n3} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ P_{1j} = P_{2j} = P_{3j} = \dots = P_{ij} = P_{nj} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ P_{1m} = P_{2m} = P_{3m} = \dots = P_{im} = P_{nm} \end{array} \right\} \quad (5.3)$$

Из элементов строк (5.2) и элементов столбцов (5.3) видно, что все слои каждого пакета прессуются при одинаковом давлении. Таким образом, спрессованный магнитопровод переменного тока эквивалентен шихтованному магнитопроводу переменного тока, выполненному из электротехнической стали.

Методика прессования без вариаций давления была впервые предпринята при разработке промежуточного многоконтактного электромагнитного реле типа ЭП-41.



5.2.2. ПРЕССОВАНИЕ С ЭКВИДИСТАНЦИОННОЙ ВАРИАЦИЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Практическое использование электрического аппарата с однофазной системой требует применения магнитной системы со сдвинутыми по фазе магнитными потоками. Но системы, собранные из листов одного материала, не позволяют получить такой сдвиг. Особенности изготовления электромагнита переменного тока вызваны наличием на расщепленном полюсе детали короткозамкнутого витка, предназначенного для устранения вибрации якоря во включенном состоянии [41]. При эксплуатации электромагнита переменного тока указанный короткозамкнутый виток оказывается ненадежной деталью: часто происходит его преждевременная поломка и электромагнит перестает функционировать.

Рассмотрим случай, когда отдельный слоистый лист пронизывает переменный синусоидальный поток Φ . Переменный магнитный поток индуцирует электродвижущие силы, под действием которых возникают вихревые токи, направленные по закону Ленца таким образом, что созданное ими магнитное поле, с одной стороны, ослабляет и искажает исходное поле, с другой — создает сдвиг магнитных потоков по фазе.

Расположим оси координат так, как показано на рисунке 5.11, т. е. \vec{E} параллелен оси Ox , \vec{H} параллелен оси Oy , а вектор Пойнтинга направлен внутрь листа. Начало координат поместим в центре сечения листа. При h и $l \gg d$ электромагнитную волну можно считать плоской.

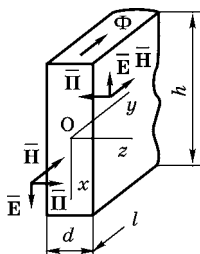


Рис. 5.11
Проникновение электромагнитной волны в активный слой магнитопровода (фрагмент)

Расчет электромагнитного поля основывается на решении уравнений Максвелла при заданных граничных и начальных условиях. Уравнения Максвелла для переменного электромагнитного поля имеют вид

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \delta + \gamma \vec{E}, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{dB}{dt} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt}. \quad (5.4)$$

Из общеизвестных развернутых уравнений (5.4) по осям x , y , z выберем максимальные амплитуды, начальные фазы и, следовательно, комплексные амплитуды \dot{E}_m и \dot{H}_m функциями одной координаты z и найдем производные для напряженностей электрического и магнитного полей [63; 78]:

$$-\frac{d\dot{H}_m}{dz} = \gamma\dot{E}_m, \quad \frac{d\dot{E}_m}{dz} = -j\omega\mu\dot{H}_m. \quad (5.5)$$

Произведя дифференцирование первого уравнения по z с учетом второго уравнения, найдем

$$\frac{d^2\dot{H}_m}{dz^2} = -j\omega\mu\gamma\dot{H}_m.$$

Общее решение этого уравнения с постоянными коэффициентами имеет вид [63; 78]:

$$\dot{H}_m = A_1 e^{-\alpha z} + A_2 e^{+\alpha z}, \quad (5.6)$$

где корень характеристического уравнения $\alpha = \sqrt{j\omega\mu\gamma}$.

Учитывая, что $\sqrt{j} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 + j)$ и обозначая волновое число $k = \sqrt{\frac{\omega\mu\gamma}{2}}$, получим

$$\alpha = (1 + j)\sqrt{\frac{\omega\mu\gamma}{2}} = (1 + j)k.$$

Во втором члене уравнения (5.6) принимаем $A_2 = 0$, так как напряженность не может расти до бесконечности, поэтому $\dot{H}_m = A_1 e^{-\alpha z}$. Постоянную A_1 находим из условия $z = 0$, при этом $A_1 = \dot{H}_m$. Решение уравнения (5.6) имеет вид [63; 78]:

$$\dot{H}_m = \dot{H}_m e^{-kz} e^{-jkz}. \quad (5.7)$$

Выражение для напряженности электрического поля находим из уравнения (5.5). Получаем

$$\dot{E}_m = \frac{1}{\gamma}(1 + j)k\dot{H}_m e^{-kz} e^{-jkz}, \quad (5.8)$$



так как

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(1+j) = e^{j\frac{\pi}{4}}; \quad \frac{1}{\gamma}(1+j)_{\text{к}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\gamma}} e^{j\frac{\pi}{4}}.$$

Волновое сопротивление для слоистого листа оказывается комплексным:

$$z = \frac{\dot{E}_m}{\dot{H}_m} = \frac{(1+j)_{\text{к}}}{\gamma} = (1+j) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}}. \quad (5.9)$$

При монодискретном прессовании магнитопроводы выполняли в виде периодически прессованных пакетов, причем каждый слой, начиная с первого, прессовали с последовательным уменьшением усилия прессования так, что давление на каждый последующий слой отличалось от предыдущего на постоянную величину. После каждого слоя для образования диэлектрической прослойки наносили изолирующий материал путем аэрозольного напыления (авт. свид. № 624721). Величину давления прессования, соответствующую m -му дискретному слою, можно рассчитать по формуле

$$P_{ij} = P_{11} - \Delta P(m-1), \quad (5.10)$$

где P_{ij} — давление прессования j -го слоя; P_{11} — давление прессования 1-го слоя; ΔP — снижение давления, $\Delta P \in (-\infty; 0) \cup (0; +\infty)$; i — номер пакета магнитопровода, $i = 1, 2, \dots, n$; j — номер слоя пакета, $j = 1, 2, \dots, m$.

Величину снижения давления можно изменять в широких пределах.

Монодискретное прессование магнитопровода осуществляется при следующих элементах матричной схемы.

Элементы строк:

$$\left| \begin{array}{cccccc} P_{11} > & P_{12} > & P_{13} > & \dots > & P_{1j} > & P_{1m} \\ P_{21} > & P_{22} > & P_{23} > & \dots > & P_{2j} > & P_{2m} \\ P_{31} > & P_{32} > & P_{33} > & \dots > & P_{3j} > & P_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} > & P_{i2} > & P_{i3} > & \dots > & P_{ij} > & P_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} > & P_{n2} > & P_{n3} > & \dots > & P_{nj} > & P_{nm} \end{array} \right. \quad (5.11)$$

Элементы столбцов:

$$\begin{array}{l}
 P_{11} = P_{21} = P_{31} = \dots = P_{i1} = P_{n1} \\
 P_{12} = P_{22} = P_{32} = \dots = P_{i2} = P_{n2} \\
 P_{13} = P_{23} = P_{33} = \dots = P_{i3} = P_{n3} \\
 \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 P_{1j} = P_{2j} = P_{3j} = \dots = P_{ij} = P_{nj} \\
 \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 P_{1m} = P_{2m} = P_{3m} = \dots = P_{im} = P_{nm}
 \end{array} \quad (5.12)$$

На рисунке 5.12 приведена экспериментальная зависимость угла сдвига магнитных потоков от разности давления прессования слоев магнитопровода. Как можно видеть, сдвиг магнитных потоков по фазе тем больше, чем больше величина ΔP .

На основании прессования с эквидистанционной вариацией давления могут быть выполнены магнитные системы для магнитных пускателей, реле управления, реле защиты, датчиков, дросселей и других электротехнических изделий.

Преимущества элементов магнитных систем, выполненных прессованием с эквидистанционной вариацией давления прессования, — широкий диапазон изменения $\cos\varphi$ и времени срабатывания электромагнитных систем.

5.2.3. ПРЕССОВАНИЕ ПРИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Следующей матричной формой схемы прессования является прессование при дифференциальном давлении. Для более равномерного сдвига магнитных потоков прессование можно осуществить полидискретным способом согласно формуле:

$$P_{ij} = (P_{11} \pm e_i) - \Delta P(m - 1), \quad (5.13)$$

где e_i — величина смещения давления прессования, $e_i \in z$; z — множество чисел.

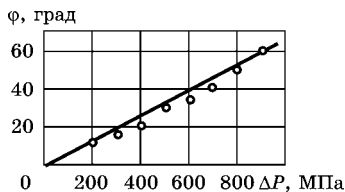


Рис. 5.12
Зависимость угла сдвига магнитных потоков от разности давления прессования слоев спеченного магнитопровода

Полидискретное прессование выполняется при следующих элементах матричной схемы.

Элементы строк:

$$\left[\begin{array}{cccccc} P_{11} > P_{13} > P_{15} > \dots > P_{1j} > P_{1m} \\ P_{21} > P_{23} > P_{25} > \dots > P_{2j} > P_{2m} \\ P_{31} > P_{33} > P_{35} > \dots > P_{3j} > P_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} > P_{i3} > P_{i5} > \dots > P_{ij} > P_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} > P_{n3} > P_{n5} > \dots > P_{nj} > P_{nm} \end{array} \right. \quad (5.14)$$

Элементы столбцов:

$$\left[\begin{array}{cccccc} P_{11} > P_{21} > P_{31} > \dots > P_{i1} > P_{n1} \\ P_{13} > P_{23} > P_{33} > \dots > P_{i3} > P_{n3} \\ P_{15} > P_{25} > P_{35} > \dots > P_{i5} > P_{n5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1j} > P_{2j} > P_{3j} > \dots > P_{ij} > P_{nj} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1m} > P_{2m} > P_{3m} > \dots > P_{im} > P_{nm} \end{array} \right. \quad (5.15)$$

Прессование слоев дискретным способом с большим давлением возможно согласно формуле:

$$P_{ij} = P_{11} \varepsilon^{m-1}, \quad (5.16)$$

где ε — шаг давления прессования.

Прессуя магнитопровод при переменном давлении ($P = \text{var}$), получим магнитопровод, имеющий неодинаковое контактное сопротивление между прессуемыми частицами, что вызывает различную магнитную проницаемость слоев. Составим матричную форму для структурной схемы магнитных проницаемостей слоистого магнитопровода:

$$\left[\begin{array}{cccccc} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \dots & \mu_{1j} & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \dots & \mu_{2j} & \mu_{2m} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} & \dots & \mu_{3j} & \mu_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{i1} & \mu_{i2} & \mu_{i3} & \dots & \mu_{ij} & \mu_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \mu_{n3} & \dots & \mu_{nj} & \mu_{nm} \end{array} \right] \quad (5.17)$$

Из матричной формы магнитных проницаемостей слоистого магнитопровода (5.17) видно, что, прессуя магнитопровод при давлениях, соответствующих формулам (5.10), (5.13) и (5.16), получаем различный спектр магнитных проницаемостей.

Магнитный поток для одного слоя можно выразить через намагничивающую силу катушки F и магнитную проницаемость G_{m1} :

$$\Phi_1 = FG_{m1}. \quad (5.18)$$

Магнитный поток для смежного слоя выразится следующей формулой:

$$\Phi_2 = FG_{m2}. \quad (5.19)$$

Магнитная проводимость для одного слоя выражается через магнитную проницаемость материала μ_1 , длину l_1 и поперечное сечение S_1 следующей формулой:

$$G_{m1} = \mu_1 S_1 / l_1. \quad (5.20)$$

Магнитная проводимость для смежного слоя выражается следующей формулой:

$$G_{m2} = \mu_2 S_2 / l_2. \quad (5.21)$$

В нашем случае $S_1 = S_2$ и $l_1 = l_2$.

Используя формулы (5.18)...(5.21) и переходя на комплексное обозначение магнитной проницаемости, составим соотношение магнитных потоков для двух смежных рассматриваемых слоев:

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{G_{m2}}{G_{m1}} = \frac{S_2 l_2 \mu_2}{S_1 l_1 \mu_1} = \frac{\mu'_2 - j\mu''_2}{\mu'_1 - j\mu''_1} = \mu_n e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} = \mu_n e^{j\psi}. \quad (5.22)$$

Из формулы видно, что магнитные потоки, проходящие через смежные слои, сдвигаются по фазе на некоторый угол ψ . Эффективность магнитной системы переменного тока увеличивается за счет полидискретного прессования слоев спеченного магнитопровода, которое приводит к изменению спектра магнитных проницаемостей. Достоинство дифференциального давления прессования магнитных систем состоит в том, что тяговая характеристика



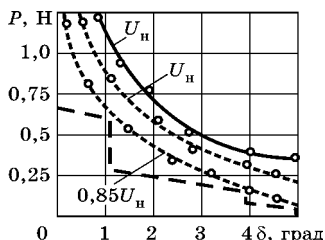


Рис. 5.13
Сравнительные тяговые характеристики безвариационного давления прессования и дифференциального давления прессования магнитных систем:
(- -) — противодействующая и тяговая характеристика безвариационного давления;
(---) — дифференциальное давление прессования.

электромагнита, выполненного по этой системе, превышает тяговую характеристику электромагнита, магнитная система которого выполнена на основании безвариационного давления прессования (рис. 5.13).

5.2.4. ПРЕССОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СОЧЕТАНИЯ МАГНИТОМЯГКИХ И МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ (МММ И МТМ)

В последние десятилетия в области электротехнической промышленности имеют место два направления развития:

1) для магнитных систем переменного тока происходит уменьшение коэрцитивной силы, что приводит к снижению тока холостого хода (ХХ), а следовательно, к уменьшению потерь ХХ;

2) для постоянных магнитов происходит увеличение коэрцитивной силы и, следовательно, возрастание магнитной энергии.

Важной задачей является создание электромагнитной системы переменного тока, имеющей высокую магнитную энергию и малые электрические потери, что должно снижать вероятность неблагоприятного воздействия на работу магнитной системы (возрастания коэрцитивной силы), увеличивать вероятность повышения магнитной энергии и исключить проблему электромагнитной несовместимости различных магнитных систем. Компромиссный вариант предложенного магнитопровода отличается от аналогового магнитопровода тем, что он выполнен из чередующихся слоев спеченных магнитомягкого и магнитотвердого материалов с диэлектрическими прослойками из оксида алюминия (авт. свид. № 851503).

Запишем схему прессования в виде матрицы:

$$\left\| \begin{array}{cccccc} P_{11}; & C_{12}; & P_{13}; & C_{14}; & \dots & P_{1m-1}; & C_{1m} \\ P_{21}; & C_{22}; & P_{23}; & C_{24}; & \dots & P_{2m-1}; & C_{2m} \\ P_{31}; & C_{32}; & P_{33}; & C_{34}; & \dots & P_{3m-1}; & C_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1}; & C_{i2}; & P_{i3}; & C_{i4}; & \dots & P_{im-1}; & C_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1}; & C_{n2}; & P_{n3}; & C_{n4}; & \dots & P_{nm-1}; & C_{nm} \end{array} \right\|, \quad (5.23)$$

где P_{11}, \dots, P_{nm-1} — компоненты матричной схемы, обозначающие слои из магнитомягкого материала (МММ); C_{12}, \dots, C_{nm} — компоненты матричной схемы, обозначающие слои из магнитотвердого материала (МТМ).

Компоненты матричной формы схемы прессования представляют собой слои магнитопровода из магнитомягкого и магнитотвердого материалов. Общее число строк в матричной схеме равно числу пакетов магнитопровода. Число столбцов матричной схемы равно числу слоев в пакете.

Простое прессование магнитопровода осуществляется при следующих элементах матричной схемы.

Элементы строк МММ:

$$\left\| \begin{array}{cccccc} P_{11} = & P_{13} = & P_{15} = & \dots = & P_{1j} = & P_{1m} \\ P_{21} = & P_{23} = & P_{25} = & \dots = & P_{2j} = & P_{2m} \\ P_{31} = & P_{33} = & P_{35} = & \dots = & P_{3j} = & P_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} = & P_{i3} = & P_{i5} = & \dots = & P_{ij} = & P_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} = & P_{n3} = & P_{n5} = & \dots = & P_{nj} = & P_{nm} \end{array} \right\| \quad (5.24)$$

Элементы строк МТМ:

$$\left\| \begin{array}{cccccc} C_{12} = & C_{14} = & C_{16} = & \dots = & C_{1j} = & C_{1m} \\ C_{22} = & C_{24} = & C_{26} = & \dots = & C_{2j} = & C_{2m} \\ C_{32} = & C_{34} = & C_{36} = & \dots = & C_{3j} = & C_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{i2} = & C_{i4} = & C_{i6} = & \dots = & C_{ij} = & C_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n2} = & C_{n4} = & C_{n6} = & \dots = & C_{nj} = & C_{nm} \end{array} \right\| \quad (5.25)$$

Элементы столбцов МММ:

$$\begin{array}{l}
 P_{11} = P_{21} = P_{31} = \dots = P_{i1} = P_{n1} \\
 P_{13} = P_{23} = P_{33} = \dots = P_{i3} = P_{n3} \\
 P_{15} = P_{25} = P_{35} = \dots = P_{i5} = P_{n5} \\
 \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 P_{1j} = P_{2j} = P_{3j} = \dots = P_{ij} = P_{nj} \\
 \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 P_{1m} = P_{2m} = P_{3m} = \dots = P_{im} = P_{nm}
 \end{array} \quad (5.26)$$

Элементы столбцов МТМ:

$$\begin{array}{l}
 C_{12} = C_{22} = C_{32} = \dots = C_{i2} = C_{n2} \\
 C_{14} = C_{24} = C_{34} = \dots = C_{i4} = C_{n4} \\
 C_{16} = C_{26} = C_{36} = \dots = C_{i6} = C_{n6} \\
 \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 C_{1j} = C_{2j} = C_{3j} = \dots = C_{ij} = C_{nj} \\
 \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 C_{1m} = C_{2m} = C_{3m} = \dots = C_{im} = C_{nm}
 \end{array} \quad (5.27)$$

При монодискретном прессовании магнитопроводы выполняли в виде периодически прессованных пакетов, причем каждый слой прессовали, начиная от одного и того же значения давления с последовательным уменьшением усилия прессования, таким образом, что каждый последующий слой отличался от предыдущего на величину постоянного давления прессования.

Давление прессования для МММ рассчитывается по формуле (5.10), а давление для МТМ — по следующей формуле:

$$C_{nm} = C_{12} - \Delta C(m - 1), \quad (5.28)$$

где C_{nm} — давление прессования n -го слоя; C_{12} — давление прессования 1-го слоя; ΔC — снижение давления прессования.

Монодискретное прессование магнитопровода осуществляется при следующих элементах матричной схемы. Такая схема прессования позволяет осуществить сдвиг магнитных потоков по фазе по сравнению с предыдущей схемой.

Элементы строк МММ:

$$\begin{array}{l}
 P_{11} > P_{13} > P_{15} > \dots > P_{1j} > P_{1m} \\
 P_{21} > P_{23} > P_{25} > \dots > P_{2j} > P_{2m} \\
 P_{31} > P_{33} > P_{35} > \dots > P_{3j} > P_{3m} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 P_{i1} > P_{i3} > P_{i5} > \dots > P_{ij} > P_{im} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 P_{n1} > P_{n3} > P_{n5} > \dots > P_{nj} > P_{nm}
 \end{array} \quad (5.29)$$

Элементы строк МТМ:

$$\begin{array}{l}
 C_{12} > C_{14} > C_{16} > \dots > C_{1j} > C_{1m} \\
 C_{22} > C_{24} > C_{26} > \dots > C_{2j} > C_{2m} \\
 C_{32} > C_{34} > C_{36} > \dots > C_{3j} > C_{3m} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 C_{i2} > C_{i4} > C_{i6} > \dots > C_{ij} > C_{im} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 C_{n2} > C_{n4} > C_{n6} > \dots > C_{nj} > C_{nm}
 \end{array} \quad (5.30)$$

Элементы столбцов МММ:

$$\begin{array}{l}
 P_{11} = P_{21} = P_{31} = \dots = P_{i1} = P_{n1} \\
 P_{13} = P_{23} = P_{33} = \dots = P_{i3} = P_{n3} \\
 P_{15} = P_{25} = P_{35} = \dots = P_{i5} = P_{n5} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 P_{1j} = P_{2j} = P_{3j} = \dots = P_{ij} = P_{nj} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 P_{1m} = P_{2m} = P_{3m} = \dots = P_{im} = P_{nm}
 \end{array} \quad (5.31)$$

Элементы столбцов МТМ:

$$\begin{array}{l}
 C_{12} = C_{22} = C_{32} = \dots = C_{i2} = C_{n2} \\
 C_{14} = C_{24} = C_{34} = \dots = C_{i4} = C_{n4} \\
 C_{16} = C_{26} = C_{36} = \dots = C_{i6} = C_{n6} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 C_{1j} = C_{2j} = C_{3j} = \dots = C_{ij} = C_{nj} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 C_{1m} = C_{2m} = C_{3m} = \dots = C_{im} = C_{nm}
 \end{array} \quad (5.32)$$

Структуру сдвига магнитных потоков можно осуществить полидискретным способом прессования.

Давление прессования для МММ рассчитывается по формуле (5.13), а для МТМ — по следующей формуле:

$$C_{nm} = (C_{12 \pm e_i}) - \Delta C(m - 1), \quad (5.33)$$

где e_i — величина смещения давления прессования, $e_i \in z$; z — множество целых чисел.

Полидискретное прессование магнитопровода осуществляется при следующих элементах матричной схемы.

Элементы строк МММ:

$$\begin{array}{l} P_{11} > P_{13} > P_{15} > \dots > P_{1j} > P_{1m} \\ P_{21} > P_{23} > P_{25} > \dots > P_{2j} > P_{2m} \\ P_{31} > P_{33} > P_{35} > \dots > P_{3j} > P_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} > P_{i3} > P_{i5} > \dots > P_{ij} > P_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} > P_{n3} > P_{n5} > \dots > P_{nj} > P_{nm} \end{array} \quad (5.34)$$

Элементы строк МТМ:

$$\begin{array}{l} C_{12} > C_{14} > C_{16} > \dots > C_{1j} > C_{1m} \\ C_{22} > C_{24} > C_{26} > \dots > C_{2j} > C_{2m} \\ C_{32} > C_{34} > C_{36} > \dots > C_{3j} > C_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{i2} > C_{i4} > C_{i6} > \dots > C_{ij} > C_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n2} > C_{n4} > C_{n6} > \dots > C_{nj} > C_{nm} \end{array} \quad (5.35)$$

Элементы столбцов МММ:

$$\begin{array}{l} P_{11} > P_{21} > P_{31} > \dots > P_{i1} > P_{n1} \\ P_{13} > P_{23} > P_{33} > \dots > P_{i3} > P_{n3} \\ P_{15} > P_{25} > P_{35} > \dots > P_{i5} > P_{n5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1j} > P_{2j} > P_{3j} > \dots > P_{ij} > P_{nj} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1m} > P_{2m} > P_{3m} > \dots > P_{im} > P_{nm} \end{array} \quad (5.36)$$

Элементы столбцов МТМ:

$$\begin{array}{l}
 C_{12} > C_{22} > C_{32} > \dots > C_{i2} > C_{n2} \\
 C_{14} > C_{24} > C_{34} > \dots > C_{i4} > C_{n4} \\
 C_{16} > C_{26} > C_{36} > \dots > C_{i6} > C_{n6} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 C_{1j} > C_{2j} > C_{3j} > \dots > C_{ij} > C_{nj} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 C_{1m} > C_{2m} > C_{3m} > \dots > C_{im} > C_{nm}
 \end{array} \quad (5.37)$$

Применение матричной формы схемы прессования композиционных элементов магнитных систем на основе сочетания МММ и МТМ имеет хорошие перспективы. На основе созданной технологии изготовления композиционной дискретной магнитной системы разработан эффективный синхронный двигатель (патент № 2130680).

5.3. МЕХАНИЧЕСКАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СЛОИСТЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Для повышения производительности труда в промышленности необходимо увеличивать частоту работы автоматизированных и электромагнитных систем. Однако с возрастанием частоты включений-отключений требуется повышение стойкости поверхностей якоря и сердечника магнитных систем, подвергающихся ударам при соприкосновении. Установлено также, что от направления обработки поверхностей якоря и сердечника зависит механическая износостойкость магнитных систем. Поэтому надо выяснить, как частота включений и отключений и направление обработки контактных поверхностей магнитопровода влияют на их износ и какова зависимость механической износостойкости от содержания кремния в магнитопроводе.

Многочисленными испытаниями установлено, что направление обработки контактных поверхностей влияет на износ магнитных систем. Создан метод обработки рабочих поверхностей слоеных магнитных систем, который отличается от применявшихся ранее тем, что между направлением следов от инструмента на сердечнике и следов на якоре обеспечивают угол, равный $\pi/2 + 2\pi l$, при



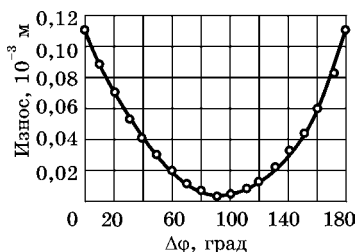


Рис. 5.14

Зависимость износа магнитной системы от разности углов между направлениями обработки якоря и сердечника

этом обработке рабочей поверхности одного из указанных элементов производят в направлении, перпендикулярном направлению следов, обусловленных слоями магнитной системы (авт. свид. № 609126). Испытания проводились на Ш- и П-образных слоистых магнитопроводах, установленных на электромагнитном реле РПУ-4 и магнитном пускателе ПМЕ-211. Во время механической обработки производится съём металла при движении рабочего инструмента (резца или шлифовального круга) под определенным углом к большей осевой линии симметрии. Износ кернов-полюсников зависит от взаимного расположения углов обработки соприкасающихся поверхностей якоря и сердечника. На рисунке 5.14 показана кривая зависимости износа контактных рабочих поверхностей магнитной системы переменного тока от разности углов между направлениями обработки якоря и сердечника.

Контактная поверхность, образуя в процессе износа тонкую рифленую сетку, при правильно выбранном угле обработки становится зеркально ровной, как при доводочной операции обработки — полировке. При отклонении от оптимального угла поверхность становится матовой, т. е. качество поверхности в процессе износа является своеобразным индикатором правильности выбранного угла обработки. Поверхности магнитной системы наиболее интенсивно изнашиваются при $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$, наименее интенсивно — при $\varphi = 90^\circ$, т. е. оптимальный угол обработки должен быть равен 90° (износ за 11,3 млн срабатываний равен $0,004 \cdot 10^{-3}$ м). Несмотря на то что известные магнитомягкие материалы весьма чувствительны к упругим и пластическим деформациям, возникающим при статических и ударных нагрузках, при обработке поверхностей таким образом повышается их устойчивость к различного рода динамическим воздействиям. Испытаниями Ш- и П-образных

магнитопроводов с размерами $190 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ и $81 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ установлено, что при различной разности углов обработки магнитных систем наблюдается резко выраженная износостойкость поверхности. Перед началом испытания на всех образцах производили шлифовальную обработку по 10-му качеству точности с параметром шероховатости $Ra < 10 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Поверхность магнитной системы после механического износа имеет неровности в виде чередующихся впадин и выступов, образующих шероховатость.

Высота неровностей зависит от применяемого материала, первоначальной обработки, частоты соприкосновения, удельного давления контактирующих поверхностей и т. п. (шероховатости поверхностей для определения классов чистоты установлены ГОСТ 2789-89). По окончании испытания была измерена высота неровностей гребешков, чему соответствовали разные качества точности (табл. 5.1).

Испытаниями установлено, что с изменением содержания кремния изменяется механическая износостойкость магнитных систем (рис. 5.15). Испытания проводились на реле типа РПУ-1 и РПУ-4 с магнитопроводами, изготовленными из спеченных магнитомягких материалов.

Таблица 5.1

Зависимость высоты неровностей магнитной системы, измеренной после испытания, от разности углов между направлениями обработки якоря и сердечника

Разность углов между направлениями обработки поверхностей якоря и сердечника, град	Высота неровностей, 10^{-9} м	Базовая длина для измерения шероховатостей, 10^{-3} м	Качество точности
0	300...400	8	—
10	150...310	8	16...17
20	83...150	8	15
30	42...75	8	14
40	21...37	2,5	12
50	10...18	2,5	11
60	6,5...10	0,8	10
70	3,3...6,0	0,8	9
80	1,2...3,2	0,25...0,8	8
90	0,4...0,8	0,25	7

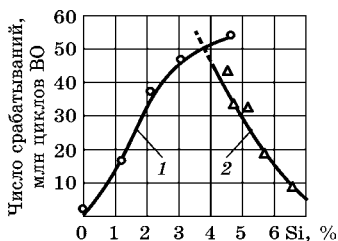


Рис. 5.15
Зависимость механической износостойкости от различного содержания кремния в магнитной системе:

1 — по причине залипания; 2 — по причине поломки.

Количество порошка ферросилиция вводилось из расчета получения определенного содержания кремния. С увеличением доли кремния механическая износостойкость возрастает из-за снижения вероятности отказа по причине «залипания». Это связано с тем, что с повышением содержания кремния коэрцитивная сила падает. При нулевой доле кремния магнитопровод выдерживает всего 40...100 срабатываний, после чего «залипает» даже при наличии гарантированного зазора, равного $0,15 \cdot 10^{-3}$ м. Прогнозируемый вывод подтвердился во время испытаний, а также при проведении химического анализа и измерении коэрцитивной силы (табл. 5.2).

С уменьшением коэрцитивной силы вероятность «залипания» снижается. С другой стороны, с увеличением содержания кремния снижается механическая износостойкость, так как возрастает хрупкость магнитопровода, обусловленная высоким сопротивлением сплава малым пластическим деформациям. Влияние частоты срабатывания на интенсивность износа магнитных систем определялось на Ш-образных слоистых магнитопроводах при установке их на магнитные пускатели типа ПМЕ-211. Через определенное число циклов срабатывания (включений-отключений, ВО) измерялся зазор в среднем керне. Износ контролировался по изменению немагнитного зазора в Ш-образных магнитных системах. Иногда для скорейшего получения результатов по механической износостойкости испытания на заводах проводят на большой частоте, при этом не получая достоверных результатов.

Экспериментальная зависимость износа магнитных систем от числа срабатываний при изменении частоты циклов ВО в час показана на рисунке 5.16.

Таблица 5.2

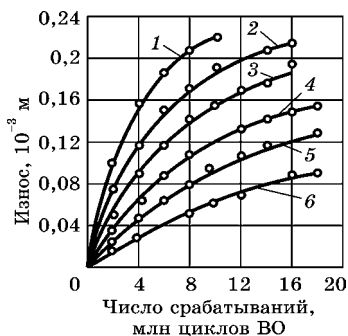
**Влияние содержания кремния
на коэрцитивную силу магнитной системы**

Содержание основных элементов, %			H_c , А/м
Fe	Si	C	
98,36...98,63	0,15	0,18...0,21	221
98,20...98,90	0,50	0,15...0,25	213
96,70...97,50	2,00	0,17...0,21	166
95,70...96,20	3,00	0,26...0,35	134
94,50...95,30	4,00	0,37...0,42	102,5
93,10...93,80	5,50	0,34...0,39	55,3
92,00...93,00*	6,00	0,56...0,60	31,6
91,50...92,50	6,50	0,56...0,58	7,9
91,20...92,30	7,00	0,39...0,42	3,95

Примечание. *При изготовлении магнитопроводов был использован специальный металлургический слиток.

Рис. 5.16
Зависимость износа магнитной системы от числа циклов срабатываний ВО при различных частотах испытания:

1 — 1200 циклов ВО/ч; 2 — 2400 циклов ВО/ч; 3 — 3600 циклов ВО/ч; 4 — 6000 циклов ВО/ч; 5 — 7200 циклов ВО/ч; 6 — 9000 циклов ВО/ч.



С увеличением частоты циклов срабатываний ВО в час интенсивность износа магнитной системы уменьшается. Так, например, с увеличением частоты испытаний в 3 раза (с 1200 до 3600 циклов срабатываний ВО в час) интенсивность износа падает с $0,155 \cdot 10^{-3}$ до $0,089 \cdot 10^{-3}$ м, т. е. примерно в 1,8 раза. Это, очевидно, связано с тем, что процесс релаксации механических напряжений после одного удара не успевает закончиться, как наступает другой удар, т. е. вибрация магнитной системы продолжается в течение неполного цикла.



Рис. 5.17
Основные варианты
слоистых магнитопроводов для реле РПУ-4
(толщина слоев 0,1; 0,15; 0,2; 0,35 и $0,5 \cdot 10^{-3}$ м)

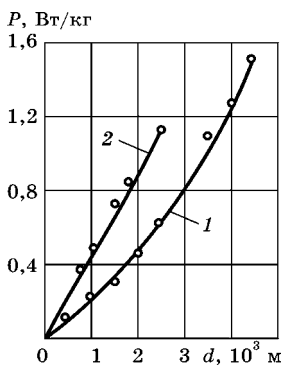


Рис. 5.18
Зависимость удельных потерь от толщины слоев магнитопровода из спеченного материала (6,5% Si и 92...93% Fe) и толщины листов магнитопровода из электротехнической стали

Слои магнитопроводов из спеченных материалов могут быть любой толщины: от 0,1; 0,15; 0,2; 0,35; $0,5 \cdot 10^{-3}$ м до толщины компактного магнитопровода $14 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 5.17).

Испытаниями установлено, что электрические потери с уменьшением толщины слоя неуклонно сокращаются (рис. 5.18). Применяя специальную технологию прессования, специальное диэлектрическое связующее, получаем слоистые магнитопроводы, по прочности не уступающие листовым магнитопроводам.

Таким образом, полученные данные могут быть использованы в ходе эксплуатации магнитных систем аппаратов переменного тока при изменении технологии обработки. Они позволяют судить о возможных последствиях замены одного состава спеченного магнитомягкого материала другим составом, а также смены режима эксплуатации с одной частоты срабатывания аппарата на другую.

5.4. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕ В СРАВНЕНИИ С ЗАРУБЕЖНЫМИ АНАЛОГАМИ

Работа магнитных систем в большой степени обуславливается применяемыми материалами. Были исследованы различные магнитные системы, применяемые в реле, так как от магнитных свойств материалов зависят характеристики реле. Испытанию подвергались в основном магнитные системы реле иностранного производства,

изготовленных из листовой стали, а также опытного варианта реле, полученных методом МПМ.

В таблице 5.3 приведены типы реле, фирмы-изготовители и страны, в которых базируются эти фирмы, а также

Таблица 5.3

**Основные данные магнитных систем
для различных фирм-изготовителей реле**

Основные измеренные данные управления катушки				Тип реле	Страна, фирма-изготовитель	Основные данные магнитных систем		
$U_{ном},$ В	$I_{раб},$ А	$I_{пуск},$ А	$R_{кат},$ Ом			Толщина листа, 10^{-3} м	Сечение среднего полюса, 10^{-6} м ²	Толщина магнитопровода, 10^{-3} м
220	0,043	0,22	570	ЗТА69	Германия, Siemens	0,5	182,25	13,5
220	0,036	0,32	530	CA2-DN131	Франция, Telemecanique Electric	0,5	153,00	17,0
380	0,0354	0,15	1700	SRC 3631-0	Япония, Fuji electric	0,5	175,50	13,5
24	0,166	0,71	14	HSA-0	Германия, Brown Boveri	1,0	143,75	12,5
220	0,041	0,22	750	MV-2	Дания, Danfoss	0,5	133,65	11,0
220	0,033	0,21	850	PAK 10UR	Япония, Togami electric	0,5	123,50	13,0
110	1,01	1,6	83	GO-31	США, Scverde	0,5	131,25	12,5
24	0,31	1,5	12	DSL 6-44	Германия, Metzener jung	0,5	154,00	14,0
55	0,0025	0,0086	1190	UCO5-10	Англия, MTE	0,5	137,50	12,5
220	0,072	0,108	509	ППУ-1	Опытный образец	0,5	140,00	14,0

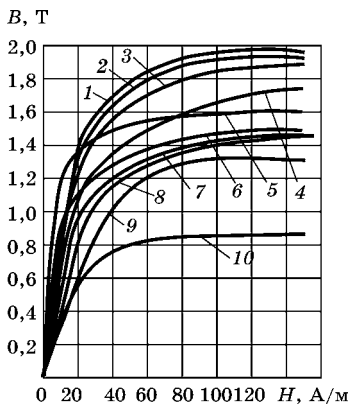


Рис. 5.19
Кривые намагничивания
магнитных систем реле:

1 — CA2-DN 131; 2 — PAK-10UR; 3 — SRC3631; 4 — DSL 6-44; 5 — опытный образец реле РПУ-1; 6 — ЗТА69; 7 — GO-31; 8 — HSA-0; 9 — MV-2; 10 — UCO 5-10.

измеренные данные втягивающих катушек. На рисунке 5.19 показаны кривые намагничивания магнитных систем на переменном токе 50 Гц. Так как на иностранных реле отсутствуют обмоточные данные катушек, то для определения кривых намагничивания были изготовлены катушки со следующими данными: $w = 5300$ витков, $d = 0,12 \cdot 10^{-3}$ м, провод ПЭТВ-2. Для опытного варианта реле была изготовлена катушка со следующими данными: $w = 5700$ витков, $d_{\text{пр}} = 0,14 \cdot 10^{-3}$ м, провод ПЭТВ-2. Все используемые в реле стали

имеют разное значение индукции насыщения и разные наклоны прямолинейных участков к оси абсцисс.

Такое большое различие кривых связано с различием состава и термообработки применяемых сталей.

Высокую магнитную индукцию насыщения имеет магнитная система от реле CA2-DN131 фирмы Telemecanique Electric (Франция). Эта фирма применяет кремнистую сталь двух марок: 1,7W (толщина листа $0,15 \cdot 10^{-3}$ м) и 3,6W (толщина листа $1 \cdot 10^{-3}$ м). Сталь марки 1,7W имеет следующий химический состав: Si = 2,5...3,0%; C = 0,005%; Mn = 0,35%; P = 0,04%; S = 0,02%; Al = 0,2±0,45%.

В связи с тем, что углерода в стали содержится не более 0,005%, материал имеет стабильные характеристики и не ухудшает магнитных характеристик. Температура отжига после изготовления магнитных систем достигает 1098 К, выдержка при этой температуре производится в течение $10,8 \cdot 10^3$ с. Охлаждение деталей осуществляется на воздухе со скоростью 0,093 К/с.

Опытный слоистый образец, содержащий 6,5% Si и 93,5% Fe, по магнитной индукции насыщения превосхо-

дит магнитные системы реле ЗТА69, ГО-31, HSA-0, MV-2, УСО 5-10. При этом для намагничивания магнитопровода требуется намагничивающей силы в 2 раза меньше, чем для магнитопровода реле ЗТА63.

Испытанию подвергалось до 10 образцов; результаты статистически обрабатывались [70]. Среднее значение рабочей магнитной индукции при номинальном напряжении для магнитной системы определялось по формуле [70]:

$$B_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i, \quad (5.38)$$

где n — число опытных значений; B_i — измеренные значения магнитной индукции.

Среднее квадратичное отклонение вычислялось по формуле [70]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - B_{\text{cp}})^2}{n - 1}}. \quad (5.39)$$

Нижняя граница рабочей магнитной индукции определялась по выражению:

$$B_{\text{min}} = B_{\text{cp}} - k\sigma, \quad (5.40)$$

где k — квантиль нормальной функции распределения, соответствующей принятой вероятности. Для принятой вероятности 0,9 значение $k = 1,282$.

Магнитная индукция для 90% всех значений находится выше значения B_{min} .

Формула (5.40) справедлива для нормального закона распределения. Фактический закон распределения опытных данных, по-видимому, отличается от нормального, однако уточнить его затруднительно из-за ограниченного числа опытных данных.

На рисунке 5.20 показаны диаграммы эффективности магнитных систем различных типов реле для номинального напряжения при замкнутой магнитной системе. На рисунке 5.20а изображена диаграмма значений рабочей магнитной индукции, на которой видно, что наибольшую индукцию 1,43 Т имеет реле СА2-DN131, а наименьшую

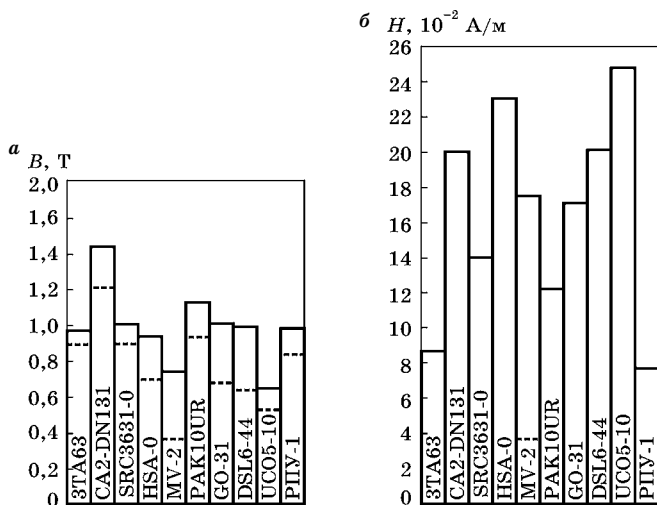


Рис. 5.20

Диаграмма эффективности магнитных систем реле (замкнутая система):

a — магнитная индукция; b — напряженность магнитного поля.

0,668 Т — реле UC05-10. Опытный образец магнитопровода в замкнутой магнитной системе имеет индукцию 1,03 Т. На рисунке 5.20б видно, что наибольшую напряженность магнитного поля 25 А/м имеет реле UC05-10, а минимальную 7,92 А/м — опытный образец магнитопровода, установленного на реле РПУ-1 (рис. 5.21).

На рисунке 5.22 представлены диаграммы эффективности магнитных систем различных типов реле для номинального напряжения при разомкнутой магнитной системе.

На рисунке 5.22а видно, что наибольшую индукцию 0,91 Т имеет реле GO-31, а наименьшую 0,205 Т — реле типа MV-2. Опытный образец магнитопровода имеет индукцию 0,37 Т. На рисунке 5.22б видно, что наибольшую напряженность магнитного поля 179,5 А/м имеет реле CA2-DN131, а наименьшую 21,9 А/м — опытный образец магнитопровода, установленного на реле РПУ-1.

Эти диаграммы интересны тем, что позволяют сразу представить себе размеры магнитных систем и затрачиваемые намагничивающие силы (НС) для их намагничи-

вания. Для больших значений магнитной индукции магнитная система получается меньших размеров, а для малых — больших размеров. При больших уровнях напряженности магнитного поля приходится иметь большие значения НС и, следовательно, расходовать больше обмоточной меди. Чем круче характеристика кривой намагничивания, тем меньше требуется обмоточной меди.

Рис. 5.21

Электромагнитное реле РПУ-1 с Ш-образной слоистой системой на основе спеченного магнитомягкого материала. Слева изображен Ш-образный слоистый сердечник

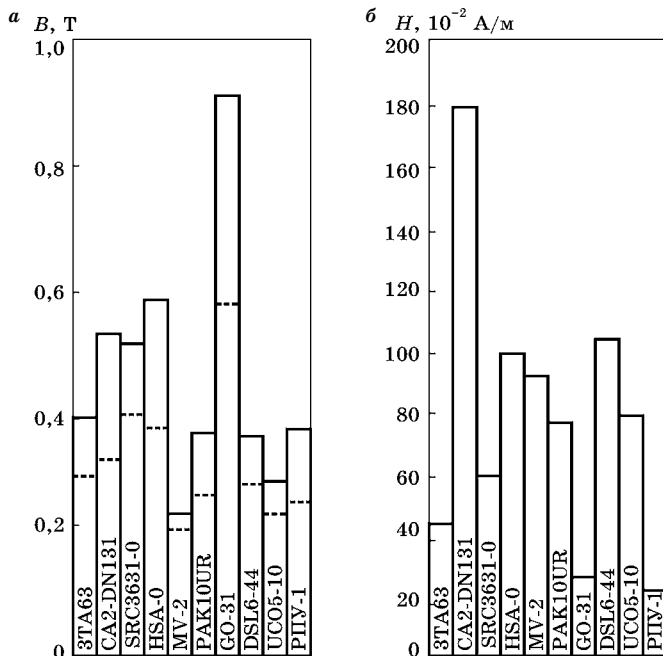
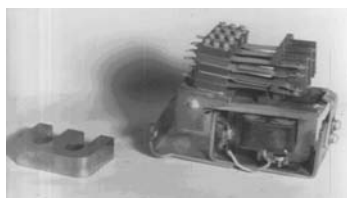


Рис. 5.22

Диаграмма эффективности магнитных систем реле (разомкнутая система):

а — магнитная индукция; б — напряженность магнитного поля.

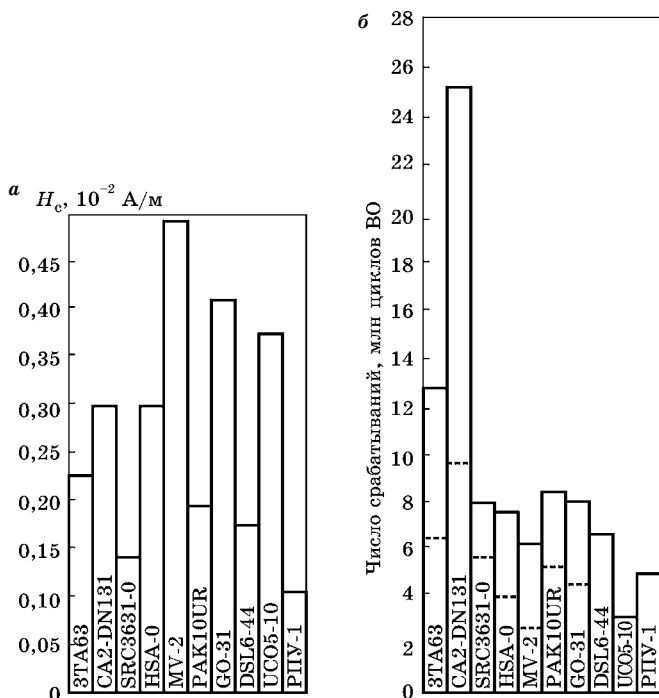


Рис. 5.23

Диаграмма эффективности магнитных систем реле:

a — среднее значение коэрцитивной силы; *б* — механическая износостойкость.

Таблица 5.4

Сведения о наработке на отказ опытных магнитных систем

Номер магнитной системы	1	2	3	4	5
Число срабатываний, млн циклов ВО	1,73	7,34	4,015	8,995	3,02
Номер магнитной системы	6	7	8	9	10
Число срабатываний, млн циклов ВО	9,93	3,57	10,93	11,03	11,03

На рисунке 5.23*a* изображена диаграмма коэрцитивной силы, на которой видно, что наибольшую коэрцитивную силу имеет реле MV-2, наименьшую — реле PAK-10UR, опытное реле РПУ-1 — 0,1 А/м.

Данные о наработке на отказ опытных магнитных систем приведены в таблице 5.4. При этом имелись в виду катастрофические отказы, когда зазор в среднем керне исчезал и в любой момент могло произойти залипание, приводящее к отказу функционирования реле.

Как показывает опыт, совокупность случайных величин опытных магнитных систем T_1, T_2, \dots, T_n распределена по нормальному закону. Определяется статистическое значение среднего срока службы (безотказной работы) магнитных систем:

$$T_{\text{cp}}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = 7,17 \text{ млн ср.аб.}, \quad (5.41)$$

где n — количество испытанных магнитных систем.

Среднее квадратическое отклонение случайной величины T определяется по аналогичной формуле (5.28):

$$\sigma_T^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{\text{cp}}^*)^2}{n-1}} = 3,245 \text{ млн ср.аб.} \quad (5.42)$$

При доверительной вероятности $1 - \alpha = 0,9$ находим [70] параметр распределения Стьюдента $t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1}$, где α — коэффициент опасности отказа. При $t_{0,95; 9} = 2,262$:

- нижний доверительный интервал

$$\begin{aligned} T_{\text{н}} &= T_{\text{cp}} - t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1} \frac{\sigma_T^*}{\sqrt{n}} = \\ &= 7,17 - 2,262 \cdot \frac{3,245}{3,16} = 4,8 \text{ млн ср.аб.}; \end{aligned} \quad (5.43)$$

- верхний доверительный интервал

$$\begin{aligned} T_{\text{в}} &= T_{\text{cp}} + t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1} \frac{\sigma_T^*}{\sqrt{n}} = \\ &= 7,17 + 2,262 \cdot \frac{3,245}{3,16} = 9,5 \text{ млн ср.аб.} \end{aligned} \quad (5.44)$$

Таким образом, средняя наработка на отказ составляет 7,15 млн ср.аб., что соответствует ТУ 16523020-80.



Средний срок службы опытных магнитных систем:

$$4,8 \text{ млн ср.аб.} < T < 9,5 \text{ млн ср.аб.}$$

Реле CA2-DN131 имеет наибольшую механическую износостойкость по сравнению с другими реле. Рассчитанный интервал доверительной вероятности составляет

$$9,7 \text{ млн ср.аб.} < T_{\text{ср}}^* < 21,3 \text{ млн ср.аб.}$$

Диаграмма рассчитанной таким образом механической износостойкости магнитных систем представлена на рисунке 5.23б.

Таким образом, сравнительное исследование показало весьма большие различия в характеристиках магнитных систем переменного тока. Различные магнитные материалы, связанные с разной технологией изготовления, и примерно одинаковые по конструкции магнитные системы демонстрируют, что оптимальные магнитные системы можно получать различными путями.

Опытная магнитная система, имеющая хорошие характеристики и лучшую технологию изготовления, может быть рекомендована для работы в аналогичных конструкциях, например в реле РПУ-1.

Результаты исследования могут быть использованы в конструкторских разработках магнитных систем для применения в реле переменного тока.

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Как частота перемагничивания магнитопровода влияет на температуру его нагрева?
2. Как давление прессования прессовки влияет на магнитную индукцию спеченного магнитопровода?
3. Как давление прессования прессовки влияет на кратность пускового тока катушки?
4. Как пористость спеченной магнитной системы влияет на время срабатывания якоря электромагнита?
5. Перечислите 4 новых класса магнитных систем переменного тока, созданных для расширения функциональных возможностей магнитопроводов.

6. Вычислить давление прессования шестого слоя при монодискретном прессовании элементов магнитных систем по формуле:

$$P_3 = P_{11} - \Delta P(m - 1),$$

где $P_{11} = 1800$ МПа, $\Delta P = 100$ МПа, $m = 5$.

7. Определить давление прессования седьмого слоя при полидискретном прессовании элементов магнитных систем по формуле

$$P_3 = (P_{11} \pm e_i) - \Delta P(m - 1),$$

где $P_{11} = 2300$ МПа, $e_i = -50$ МПа, $\Delta P = 200$ МПа, $m = 6$.

8. При какой разности углов механической обработки рабочих поверхностей якоря и сердечника износ магнитной системы становится наименьшим?
9. Назовите тип реле из иностранных образцов фирм-изготовителей, имеющий наименьшее значение коэрцитивной силы.
10. Как частота срабатываний якоря магнитного пускателя влияет на интенсивность износа магнитной системы?

6 ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДОВ МПМ В СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

6.1. СОЗДАНИЕ СЕРДЕЧНИКА С РАВНОМЕРНОЙ КОЛЛИМАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕХАНИЗМА С ВНЕШНИМ ПОВОРОТНЫМ ЯКОРЕМ КЛАПАННОГО ВИДА

Электромагнитные механизмы (электромагниты) с внешним поворотным якорем клапанного типа широко применяются в различных отраслях промышленности. Основам теоретических расчетов электромагнитов посвящено большое число фундаментальных работ. При проектировании электрических аппаратов до последнего времени ставилась задача создания электромагнитов с оптимальными геометрическими соотношениями объема меди и стали в магнитных системах исходя из условия получения максимального тягового усилия при заданном положении якоря.

В связи с совершенствованием существующих и промышленным освоением новых электромагнитов, а также по причине расширения номенклатуры, объема и программы применяемых электромагнитов вопросы их дальнейшего исследования, разработки и оптимального проектирования не теряют актуальности. При этом практический интерес представляет разработка новых электромагнитов на основе энерго- и ресурсосберегающей технологии с учетом минимизации расхода магнитного материала для магнитопроводов и обмоточной меди для втягивающей катушки при одновременном повышении магнитных, электрических и эксплуатационных характеристик.

Вопросам теории, расчета, физического моделирования и оптимального проектирования электромагнитов посвящены фундаментальные научные исследования. Ав-



тор оригинальной работы М. А. Любчик [81] наибольшее внимание обращает на особенность учета внутренних неиспользованных резервов электромагнитных механизмов, в частности на возможность применения ферромагнитных шунтов с целью рационального перераспределения запасенной в системе электромагнитной энергии и оптимального согласования тяговых и внешних характеристик. Автор другой работы А. Г. Никитенко [95] сосредоточил внимание на изложении разработанных им методов проектирования электромагнитных механизмов, отвечающих поставленным техническим условиям и удовлетворяющих определенному критерию оптимальности. Автор осуществил проектирование электромагнитов постоянного тока на основе оптимальных соотношений размеров, реализующих минимальное время срабатывания. В работе И. И. Пеккера и А. Г. Никитенко [102] показана возможность оптимального проектирования с использованием средств вычислительной техники с целью применения новых методов расчета, повышения точности и эффективности расчетов электромагнитных механизмов и, следовательно, экономии времени для их исследования, испытания и внедрения.

Предварительное исследование показало, что экономическую эффективность электрического аппарата можно значительно повысить, если кардинально изменить магнитную цепь электромагнитного механизма. При этом экономически неоправданно, если под обмоткой втягивающей катушки располагается сердечник, где неэффективно используется магнитное поле.

Цель исследования заключалась в поиске реальной оптимальной геометрической формы магнитопровода для сердечника электромагнита. Объектом исследования послужило промежуточное электромагнитное реле, содержащее электромагнит с внешним поворотным якорем клапанного типа.

В результате предварительной проверки было установлено, что в цилиндрическом сердечнике такого электромагнита распределение магнитного потока подчиняется параболическому закону. Поэтому предметом исследования

стало распределение магнитного потока по высоте и сечению различных вариантов сердечников и его влияние на выходные характеристики реле.

В исследовании проверялась гипотеза, что использование сердечников в виде усеченного параболоида позволит добиться равномерной коллимации магнитного потока по высоте и сечению сердечника, что обеспечит наиболее экономное использование электрической энергии и значительное сокращение количества металла магнитопровода.

Цель, предмет и гипотеза предопределили задачи исследования:

- изучить распределение магнитного потока на основе физического моделирования;
- разработать методику измерения;
- изготовить экспериментальную установку для исследования и измерения характеристик электромагнитов;
- по инновационной технологии изготовления осуществить прессование, спекание и термообработку магнитопроводов;
- спроектировать и изготовить образцы с различными геометрическими формами и размерами;
- измерить и рассчитать магнитные параметры и характеристики различных вариантов набора магнитопроводов для сердечников от электромагнитов, используемых на промежуточных реле;
- произвести анализ результатов измерений и вычислений, обосновать выбор оптимальной геометрической формы сердечника и сделать практические выводы.

Расчет магнитной цепи, основанный на законах Ома и Кирхгофа, применительно к электромагниту с внешним поворотным якорем клапанного типа был в основном произведен для прямого цилиндрического сердечника. Были определены размеры магнитной цепи и рассчитана магнитодвижущая сила (МДС) катушки, что дает основания для проведения исследования электромагнита на базе существующего образца, установленного на реле типа РП-40/44 (рис. 6.1).

Весьма важен правильный выбор формы и размеров сердечника. Сечение сплошного сердечника должно

быть рассчитано таким образом, чтобы значение магнитной индукции находилось на прямолинейном участке кривой намагничивания $B = f(H)$. Обычно сечение сердечника в точке x от начала выражается через магнитный поток и магнитную индукцию:

$$S_x = \frac{\Phi_x}{B_x}. \quad (6.1)$$

С другой стороны, площадь поперечного сечения определяется через геометрический размер сердечника по формуле

$$S_x = \frac{\pi d_x^2}{4}. \quad (6.2)$$

Определим диаметр круглого сечения сердечника в точке x из равенства формул (6.1) и (6.2):

$$S_x = \frac{\Phi_x}{B_x} = \frac{\pi d_x^2}{4}, \quad (6.3)$$

откуда

$$d_x = \sqrt{\frac{4\Phi_x}{\pi B_x}} = K_1 \sqrt{\Phi_x}, \quad (6.4)$$

где $K_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi B_x}}$ при $B_x = \text{const}$.

Магнитная индукция будет иметь постоянную величину лишь в том случае, если сечение сердечника по его длине будет изменяться по тому же закону, что и магнитный поток.

Определим величину магнитного потока для точки, находящейся на расстоянии x от начала магнитопровода [42]:

$$\Phi_x = \Phi_\delta + \Phi_{g(l-x)}, \quad (6.5)$$

где Φ_δ — рабочий поток; $\Phi_{g(l-x)}$ — магнитный поток рассеяния на расстоянии $(l-x)$.



Рис. 6.1
Электромагнит с набором конических сердечников из спеченного материала для реле РП-40/44

МДС в точке магнитопровода, удаленной на расстояние x от начала магнитопровода, равна [42]:

$$F_x = F_\delta \frac{x}{l} = (AW)_\delta \frac{x}{l}, \quad (6.6)$$

где l — длина сердечника.

Величина магнитного потока рассеяния на элементарном участке длиной dx , удаленного на расстояние x от начала магнитопровода, составляет [42]:

$$d\Phi_g = F_x g dx. \quad (6.7)$$

Подставив в выражение (6.7) значение F_x из формулы (6.6), найдем

$$d\Phi_g = \frac{(AW)_\delta g}{l} x dx. \quad (6.8)$$

Интегрируя полученное выражение, найдем магнитный поток на участке $(l - x)$ [42]:

$$\Phi_{g(l-x)} = \int_x^l \frac{(AW)_\delta g}{l} x dx = (AW)_\delta \frac{g}{2l} (l^2 - x^2). \quad (6.9)$$

Подставив $(AW)_\delta = \frac{\Phi_\delta}{G_\delta}$, найдем

$$\Phi_{g(l-x)} = \Phi_\delta \frac{g}{2lG_\delta} (l^2 - x^2), \quad (6.10)$$

откуда после преобразования формул (6.5) и (6.10) получим

$$\Phi_x = \Phi_\delta \left[1 + \frac{g}{2lG_\delta} (l^2 - x^2) \right], \quad (6.11)$$

где G_δ — магнитная проводимость рабочего зазора.

Следовательно, исходя из уравнений (6.4) и (6.11), можно определить диаметр сердечника в любой точке:

$$d_x = K_1 \sqrt{\Phi_\delta \left[1 + \frac{g}{2lG_\delta} (l^2 - x^2) \right]}. \quad (6.12)$$

Если пренебречь паразитным зазором в основании сердечника, что вполне правомерно при разомкнутом якоре, то максимум потока соответствует $x = 0$ и формула (6.11) принимает следующий вид:



$$\Phi_0 = \Phi_\delta \left(1 + \frac{gl}{2G_\delta} \right). \quad (6.13)$$

Здесь

$$1 + \frac{gl}{2G_\delta} = K_p,$$

где K_p — коэффициент рассеяния магнитного потока.

Запишем значение магнитного потока в основании сердечника:

$$\Phi_0 = \Phi_\delta K_p. \quad (6.14)$$

Поэтому сердечник можно выполнить таким образом, чтобы его внешний контур повторял кривую распределения магнитного потока. Объемное тело сердечника будет иметь форму усеченного параболоида, что позволит уменьшить магнитный поток рассеяния магнитной системы вследствие удаления боковой поверхности сердечника от ярма магнитопровода.

В результате уменьшения магнитного потока рассеяния Φ_σ перераспределится общий магнитный поток Φ_0 и, следовательно, возрастет рабочий магнитный поток Φ_δ :

$$\Phi_\delta = \Phi_0 - \Phi_\sigma. \quad (6.15)$$

Последний обеспечивает увеличение тягового усилия в начале хода якоря по формуле Максвелла:

$$F_\delta = \frac{\Phi_\delta^2}{2S\mu_0}, \quad (6.16)$$

где μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость вакуума:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Минимальный магнитный поток равен рабочему магнитному потоку для случая, когда текущее расстояние x равно длине сердечника $x = l$

$$\Phi_{x=l} = \Phi_\delta.$$

Магнитная индукция магнитопровода цилиндрической формы изменяется по тому же закону, что и магнитный поток, т. е. для значения магнитной индукции B_x



в сечении сердечника, удаленной на расстояние x от начала магнитопровода, можно записать:

$$B_x = \frac{\Phi}{S} \left[1 + \frac{g}{2lG_\delta} (l^2 - x^2) \right]. \quad (6.17)$$

Геометрическая форма сердечника, выполненного в виде усеченного параболоида, сложна; для упрощения можно применить усеченный конус, образующая которого является линейной аппроксимацией параболы, максимально приближающейся к ней (авт. свид. № 394858).

Удельная проводимость пути рассеяния магнитопровода между сердечником формы усеченного конуса и расположенным параллельно ему плоским ярмом приблизительно составляет [23]:

$$g = \frac{4\pi K_M}{\ln \left[\left(\frac{2h}{d_{cp}} \right) + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_{cp}} \right)^2 - 1} \right]}, \quad (6.18)$$

где K_M — поправочный коэффициент, полученный Б. К. Булем на основе графического построения картин поля, $K_M = 0,36$; $d_{cp} = (d_1 + d_2)/2$, где d_1, d_2 — соответственно диаметры верхнего и нижнего основания усеченного конуса; h — расстояние от спинки магнитопровода до центра сердечника.

В формуле (6.18) удельная проводимость рассчитана для сердечника цилиндрической формы. Мы же используем указанную формулу для расчета сердечника формы усеченного конуса с применением усредненного размера диаметра.

Для анализа характеристик электромагнитов введем понятие коэффициента отношения диаметров сердечника:

$$K_1 = d_1/d_2. \quad (6.19)$$

Образующая сердечника, выполненного в виде усеченного конуса, наклонена к его основанию под углом α , который можно определить из соотношения тригонометрических функций:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2l}{d_1 - d_2}. \quad (6.20)$$



Соответственно с учетом формулы (6.4) диаметр верхней и нижней части сердечника будет выглядеть следующим образом:

$$d_1 = K_1 \sqrt{\Phi_\delta}, \quad (6.21)$$

$$d_2 = K_1 \sqrt{\sigma \Phi_\delta}. \quad (6.22)$$

С учетом уравнений (6.21) и (6.22) формула (6.20) примет вид

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2l}{K_1 \sqrt{\Phi_\delta} (1 - \sqrt{\sigma})}. \quad (6.23)$$

Следовательно,

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{2l}{K_1 \sqrt{\Phi_\delta} (1 - \sqrt{\sigma})}. \quad (6.24)$$

Форма сердечника, выполненного в виде усеченного конуса, позволяет повысить ряд технических и физических характеристик электромагнита. Уменьшение среднего диаметра сердечника ведет к уменьшению средней длины витка катушки:

$$l_{\text{ср}} = \pi(d_{\text{ср}} + B), \quad (6.25)$$

где $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр сердечника; B — толщина катушки.

Уменьшение сопротивления среднего витка катушки происходит за счет уменьшения средней длины витка:

$$R_{\text{ср}} = \rho \frac{4l_{\text{ср}}}{\pi d_{\text{пр}}^2}, \quad (6.26)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление.

Потребляемая мощность катушки снижается за счет уменьшения сопротивления катушки или сокращения средней длины витка [24]:

$$P = I^2 R = I^2 \rho \frac{4l_{\text{ср}}}{\pi d_{\text{пр}}^2} = (IW)^2 \frac{\rho l_{\text{ср}}}{S_{\text{ок}} K_{\text{зк}}}, \quad (6.27)$$

где I — ток катушки; R — сопротивление катушки; $S_{\text{ок}}$ — площадь обмоточного окна; $K_{\text{зк}}$ — коэффициент заполнения катушки.



Масса обмоточной меди уменьшается за счет сокращения длины среднего витка катушки:

$$G_m = \frac{l_{\text{ср}} W}{1000} g_1, \quad (6.28)$$

где g_1 — удельный вес провода на единицу длины.

Масса стального сердечника снижается за счет уменьшения его среднего сечения:

$$G_{\text{ст}} = \pi R_c^2 l g_2 = S_{\text{ср}} l g_2, \quad (6.29)$$

где g_2 — удельный вес стали.

Добротность катушки повышается за счет уменьшения сопротивления обмотки или средней длины витка катушки [24]:

$$D = \frac{(IW)^2}{P} = \frac{W^2}{R_{\text{об}}} = \frac{S_m}{\rho l_{\text{ср}}}. \quad (6.30)$$

Напряженность магнитного поля, определяемая по закону полного тока, будет снижена за счет уменьшения намагничивающей силы

$$H = IW / l_m, \quad (6.31)$$

где l_m — длина магнитной силовой линии.

Относительная магнитная проницаемость возрастает за счет увеличения магнитной индукции и снижения напряженности магнитного поля:

$$\mu = B / \mu_0 H. \quad (6.32)$$

Индуктивность электромагнита увеличивается за счет возрастания относительной магнитной проницаемости:

$$\begin{aligned} L &= \mu \mu_0 W^2 S_{\text{ср}} / l = \\ &= \mu \mu_0 W^2 \pi R_c^2 / l. \end{aligned} \quad (6.33)$$

На рисунке 6.2 схематически показан известный электромагнит, на рисунке 6.3 приведена эпюра распределе-

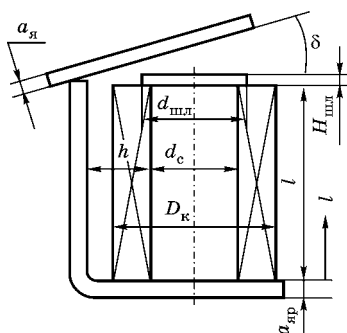


Рис. 6.2
Электромагнит с внешним поворотным якорем клапанного типа

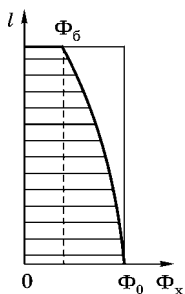


Рис. 6.3
Эюра распределения магнитного потока по длине сердечника

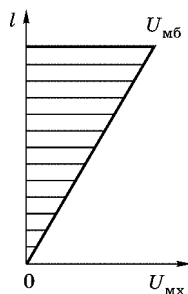
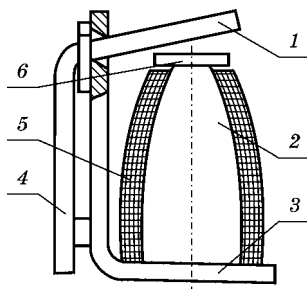


Рис. 6.4
Эюра распределения магнитного потенциала по длине сердечника

Рис. 6.5
Электромагнит с внешним поворотным якорем клапанного типа — поверхности сердечника и катушки выполнены в виде усеченного параболоида:

1 — якорь; 2 — сердечник; 3 — скоба магнитопровода; 4 — хвостовик якоря; 5 — управляющая катушка; 6 — полюсный наконечник.



ния магнитного потока по длине сердечника, на рисунке 6.4 — эюра распределения магнитного потенциала по длине сердечника.

Постоянные геометрические размеры электромагнита:

$$a_{\text{я}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$D_{\text{к}} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$h_{\text{шл}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$a_{\text{яр}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$h = 17 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$d_{\text{шл}} = 34 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$l = 82 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$d_{\text{с}} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Магнитопровод выполнен составным и состоит, как обычно, из сердечника, ярма и якоря.

На рисунке 6.5 изображен электромагнит с внешним якорем клапанного типа. Наружная поверхность сердечника выполнена в виде усеченного параболоида переменного сечения. Обмоточный провод наматывается на сердечник, причем наружная форма катушки должна повторять

внутреннюю, сохраняя толщину катушки одинаковой по всей длине (авт. свид. № 504252).

В таком электромагните значительно сокращен расход магнитного материала по причине уменьшения среднего диаметра сердечника и существенно снижен расход обмоточной меди за счет уменьшения среднего диаметра витка катушки. Кроме того, обмоточная медь экономится благодаря качественной технологии изготовления магнитопровода, так как необходимое тяговое усилие обеспечивается при меньших намагничивающих ампер-витках. Трудности, связанные с технологией обработки магнитных материалов для изготовления сердечников в виде усеченного параболоида, вынуждают отказаться от изготовления магнитопровода идеальной формы и требуют его упрощения. К тому же такая форма сердечника и катушки конструктивно сложна, поэтому для упрощения можно применить сердечник в виде усеченного конуса, образующая которого является линейной аппроксимацией параболы, максимально приближающаяся к ней. На рисунке 6.6 изображен электромагнит, выполненный таким

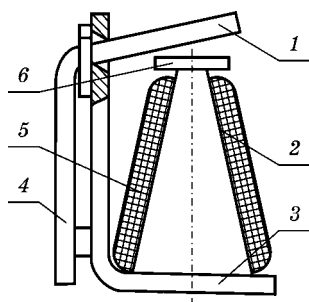


Рис. 6.6

Электромагнит с внешним поворотным якорем клапанного типа — наружные поверхности сердечника и катушки выполнены в виде усеченного конуса:

1 — якорь; 2 — сердечник; 3 — скоба магнитопровода; 4 — хвостовик якоря; 5 — управляющая катушка; 6 — полюсный наконечник.

образом, что внешние контуры сердечника и катушки имеют форму усеченного конуса. Такая форма сердечника значительно уменьшает магнитные потоки рассеяния магнитной системы по сравнению с сердечником в виде усеченного параболоида.

Важный этап производства спеченных изделий — подготовка порошка к прессованию. После поставки распыленного железного порошка марки ПЖР-3 от научно-производственного объединения «Тулачермет» его необходимо было подвергнуть гомогенизирующему отжигу. Отжиг порошка фракции $(-56... 40) \cdot 10^{-6}$ м был осуществлен при

температуре 1380...1410 К в течение 7200 с в вакууме $6,65 \cdot 10^{-1}$ Па ($5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.). Прессование магнитопроводов производилось на гидравлическом прессе типа 2ПГ-500 при давлении 1250 МПа, а спекание, термическая обработка металлов (ТМО) и отжиг прессовок — в камерной вакуумной печи сопротивления типа СНВЛ-1.3.1/16-М2. Исследованию подверглись 9 промежуточных реле, электромагниты которых были укомплектованы сердечниками со следующими размерами верхнего и нижнего диаметра: $(25 \times 25) \cdot 10^{-3}$ м, $(23 \times 25) \cdot 10^{-3}$ м, $(27 \times 25) \cdot 10^{-3}$ м, $(17 \times 25) \cdot 10^{-3}$ м, $(15 \times 25) \cdot 10^{-3}$ м, $(13 \times 25) \cdot 10^{-3}$ м, $(12 \times 25) \cdot 10^{-3}$ м, $(11 \times 25) \cdot 10^{-3}$ м.

На качество магнитопроводов электромагнитов существенно влияют магнитомягкие материалы. На рисунке 6.7 представлены сравнительные кривые намагничивания для спеченного магнитопровода на основе железного порошка марки ПЖР-3 и низкоуглеродистой электротехнической стали (армко-железо). Кривая намагничивания для спеченного магнитопровода проходит круче и выше, чем кривая намагничивания для низкоуглеродистой электротехнической стали (армко-железо).

Для выполнения измерений на испытуемые образцы вдоль всей длины сердечников через каждые $10 \cdot 10^{-3}$ м устанавливали датчики; предварительно с внутренней стороны стальной гильзы втягивающей катушки был снят слой металла. Измерительная обмотка датчика охватывала образец, максимально плотно прилегая к его поверхности, и располагалась таким образом, чтобы витки были перпендикулярны направлению магнитного потока. Магнитные потоки измерялись в процессе движения якоря —

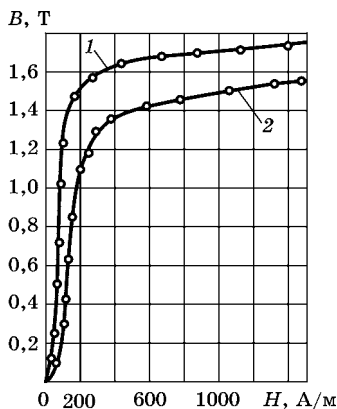


Рис. 6.7
Кривые намагничивания магнитопроводов:

1 — спеченный железокремнистый сплав; 2 — низкоуглеродистая электротехническая сталь (армко-железо).

от разомкнутого положения до полного замыкания при постоянном напряжении питания катушки.

Представляет интерес корреляция магнитной индукции с длиной сердечника. На рисунках 6.8...6.16 показана зависимость кривой магнитной индукции по длине сердечника от коэффициента отношения диаметров. Как было отмечено выше, для цилиндрического сердечника кривая распределения магнитного потока по длине сердечника подчиняется закону параболы (рис. 6.8). Сердечник, выполненный в виде объемного тела усеченного параболоида, идеален по форме. Но с уменьшением коэффициента отношения диаметров сердечника в результате постепенного насыщения кривая распределения магнитной индукции выпрямляется, продолжая, однако, сохранять криволинейную форму (рис. 6.9, 6.10). Преобразование тела магнитопровода из усеченного параболоида в более простую форму усеченного конуса приводит к тому, что магнитная индукция по длине сердечника для $K_d = 0,76$ становится почти постоянной по всей его длине. Такая конструкция электромагнита позволяет эффективно использовать активный материал магнитопровода. С уменьшением коэффициента отношения

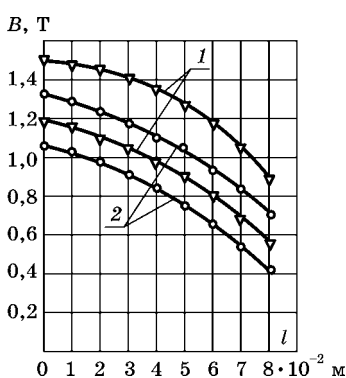


Рис. 6.8

Распределение магнитной индукции в сердечнике вдоль его длины для $K_d = 1$:

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$; ∇ — ∇ $I_W = 1630$ А; \circ — \circ $I_W = 1060$ А.

диаметров до 0,68 из-за насыщения сердечника магнитная индукция в его верхней части в зоне функционирования якоря по сравнению с нижней частью увеличивается (рис. 6.12). С дальнейшим уменьшением коэффициента магнитная индукция все более увеличивается (см. рис. 6.13... 6.15), доходя до глубокого насыщения (см. рис. 6.16).

Установлено, что с увеличением насыщения сердечника поток в нем уменьшается. Например, в результате глубокого насыщения материала магнитопровода магнитные

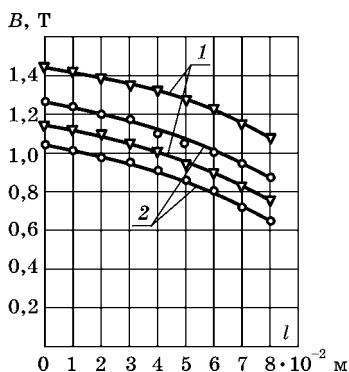


Рис. 6.9

Распределение магнитной индукции в сердечнике вдоль его длины для $K_d = 0,92$:

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$; ∇ — $IW = 1630$ А; \circ — $IW = 1060$ А.

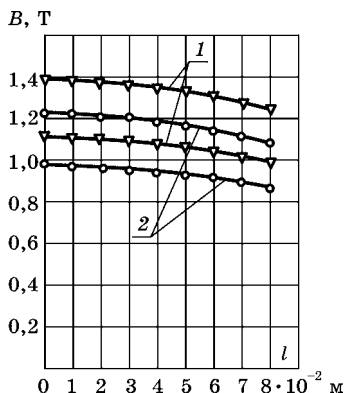


Рис. 6.10

Распределение магнитной индукции в сердечнике вдоль его длины для $K_d = 0,84$:

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$; ∇ — $IW = 1630$ А; \circ — $IW = 1060$ А.

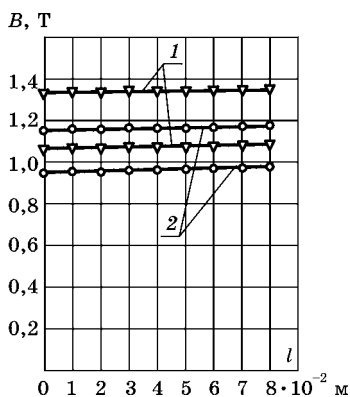


Рис. 6.11

Распределение магнитной индукции в сердечнике вдоль его длины для $K_d = 0,76$:

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$; ∇ — $IW = 1630$ А; \circ — $IW = 1060$ А.

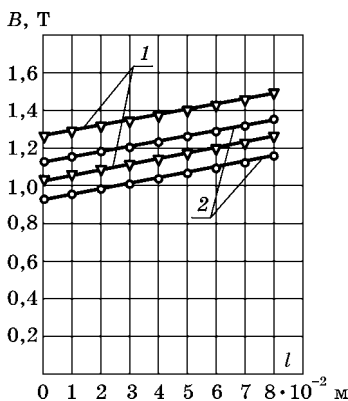


Рис. 6.12

Распределение магнитной индукции в сердечнике вдоль его длины для $K_d = 0,68$:

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$; ∇ — $IW = 1630$ А; \circ — $IW = 1060$ А.

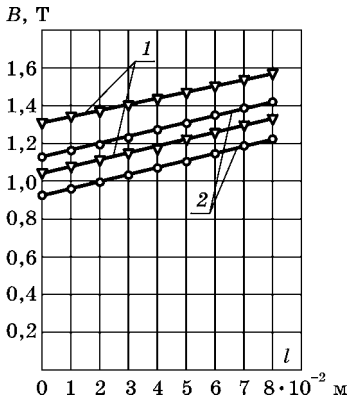


Рис. 6.13
Распределение магнитной индукции в сердечнике вдоль его длины для $K_d = 0,6$:

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$; ∇ — ∇ $IW = 1630$ А; \circ — \circ $IW = 1060$ А.

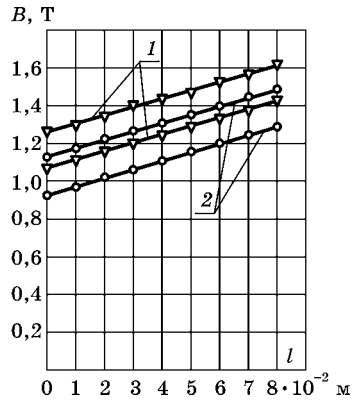


Рис. 6.14
Распределение магнитной индукции в сердечнике вдоль его длины для $K_d = 0,52$:

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$; ∇ — ∇ $IW = 1630$ А; \circ — \circ $IW = 1060$ А.

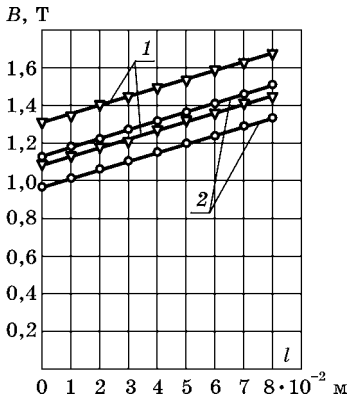


Рис. 6.15
Распределение магнитной индукции в сердечнике вдоль его длины для $K_d = 0,48$:

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$; ∇ — ∇ $IW = 1630$ А; \circ — \circ $IW = 1060$ А.

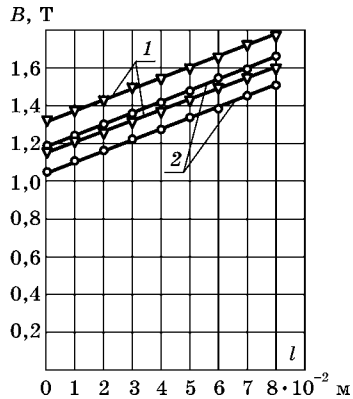


Рис. 6.16
Распределение магнитной индукции в сердечнике вдоль его длины для $K_d = 0,44$:

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$; ∇ — ∇ $IW = 1630$ А; \circ — \circ $IW = 1060$ А.

потоки в зависимости от угла раствора якоря для сердечников с коэффициентами отношения диаметров 0,52 и 0,48 сильно уменьшаются. Изготовленный вариант электромагнита с $K_d = 0,44$ из-за высокой степени насыщения магнитопровода срабатывает очень слабо и медленно. С увеличением угла раствора якоря коэффициент рассеяния магнитного потока, как правило, вначале повышается, достигая некоторой максимальной величины, после чего, с ростом насыщения материала магнитопровода, начинает падать.

Для контроля был изготовлен электромагнит с K_d сердечника, равном 0,36. Однако при подаче напряжения на катушку из-за глубокой степени насыщения сердечника электромагнит перестал функционировать.

Исследования показали, что наиболее благоприятным режимом для электромагнита является такой, когда в процессе включения магнитная система в ходе движения якоря постепенно намагничивается до насыщения, наступающего в момент приближения якоря к сердечнику. В этом случае магнитная система постепенно теряет свои магнитные свойства. При таком режиме якорь плавно подходит к сердечнику, что снижает силу удара. В противном случае механическая износостойкость электромагнита и всего реле мала.

Важной деталью в электромагнитах с внешним поворотным якорем клапанного типа является полюсный наконечник, наличие которого приводит к увеличению магнитного потока в рабочем воздушном зазоре. Особый интерес представляет коммутация магнитного потока в зависимости от коэффициента отношения диаметров сердечника. Магнитный поток в рабочем воздушном зазоре с уменьшением этого коэффициента возрастает на 15%, достигая максимального значения, затем начинает уменьшаться, достигая наименьшего значения, что иллюстрирует кривая экстремальной зависимости на рисунке 6.17. Это связано с тем, что для аналогичного электромагнита с $K_d = 1,0$ магнитное сопротивление между внешней боковой поверхностью сердечника и ярмом магнитопровода имеет малую величину, обуславливая большое значение

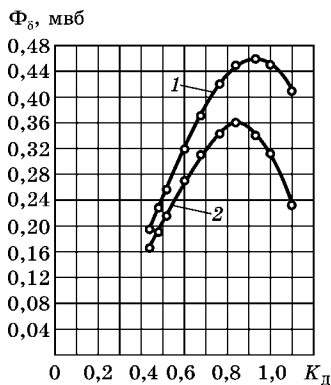


Рис. 6.17

Зависимость магнитного потока в рабочем воздушном зазоре от коэффициента отношения диаметров сердечника K_d :

1 — замкнутое положение якоря $\delta = 0^\circ$; 2 — разомкнутое положение якоря $\delta = 9^\circ$.

ет глубокое насыщение сердечника, которое все больше доминирует над увеличением магнитного сопротивления для магнитного потока рассеяния, препятствуя повышению рабочего магнитного потока.

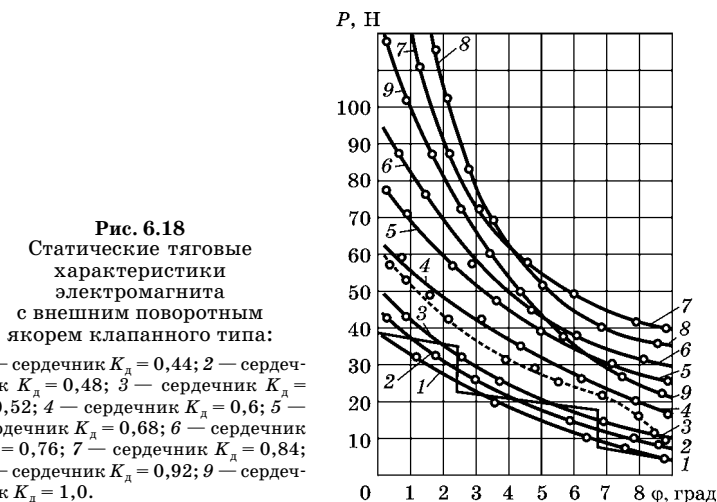
О качестве электромагнита нельзя судить без рассмотрения тяговых характеристик. На рисунке 6.18 представлены статические тяговые характеристики при $IW = \text{const}$. Исследования показывают, что, изменяя угол наклона образующей сердечника к его основанию, можно видоизменять тяговую характеристику. На рисунке 6.18 для сравнения показана кривая 9, соответствующая характеристике электромагнита с цилиндрическим сердечником и цилиндрической катушкой, у которого происходит наиболее резкое изменение силы по ходу якоря. Электромагниты, у которых сердечники имеют коэффициенты отношения диаметров 0,84 и 0,92, также имеют достаточно резко возрастающие характеристики, причем у первого сердечника наиболее высокие значения электромагнитной силы получаются в области больших зазоров, у второго — в области малых зазоров.

магнитного потока рассеяния и малое значение рабочего магнитного потока. Для какого-то варианта электромагнита до момента наступления насыщения рабочий магнитный поток имеет наибольшее значение. Например, для разомкнутого положения якоря максимальное значение магнитного потока наступает при сердечнике с $K_d = 0,84$, для замкнутого — при сердечнике с $K_d = 0,92$, причем для первого сердечника оно равно 0,36 мвб, для второго — 0,46 мвб. Для вариантов электромагнитов с уменьшающимися K_d , равными 0,52, 0,48, 0,44, постепенно наступа-

Установлено, что тяговая сила электромагнита определяется не магнитной индукцией, а магнитным потоком. Например, различные отклонения кривых 1...6 вниз от кривой 9 в конце хода якоря связаны с влиянием различной степени насыщения сердечника, хотя в начале хода якоря тяговые характеристики электромагнитов 5...8, магнитные системы которых намагничены до насыщения, проходят выше кривой 9.

Наиболее плавное изменение тяговой характеристики обеспечивается у электромагнита, которому соответствует кривая 4. Эта кривая более пологая, что способствует лучшему согласованию тяговой и противодействующей характеристик. Из представленных характеристик видно, что оптимальным по запасу кинетической энергии является электромагнит, отраженный на рисунке именно кривой 4, тяговая характеристика которого проходит менее круто, чем в аналоговом электромагните. Таким образом, запас кинетической энергии на срабатывание расходуется гораздо экономнее и, следовательно, износостойкость электромагнита возрастает.

Казалось бы, увеличение рабочих значений магнитной индукции для сердечников с коэффициентами отношения диаметров, равными 0,44 и 0,48, должны привести



к дальнейшему росту тяговых усилий электромагнитов, тем не менее этого не происходит. Такой противоречивый на первый взгляд факт объясняется тем, что для рассматриваемой марки магнитного материала характерно насыщение сердечника, приводящее к уменьшению рабочих магнитных потоков и соответственно к снижению тяговых усилий.

Однако в действительности процесс включения аппарата определяется не статической, а динамической характеристикой, отражающей характер протекания рабочего процесса в зависимости от нарастания тока в катушке. На рисунке 6.18 приведена динамическая характеристика для электромагнита с сердечником, имеющим $K_d = 0,6$ (штриховая линия). Как видно на рисунке, вероятность срабатывания электромагнита обеспечивается надежно, так как кривая динамической характеристики проходит выше кривой противодействующей характеристики.

Характер переходных процессов, протекающих в катушках, исследован осциллографированием токов включения с помощью двухлучевого осциллографа С8-2; результаты представлены на рисунке 6.19. Характер осциллограмм отражает процесс включения электромагнита, а высота перепада тока ab характеризует, по нашим данным, силу удара якоря о сердечник.

По кривым 1...6 видно, что с увеличением K_d от 0,44 до 1,0, т. е. с уменьшением угла наклона образующей сер-

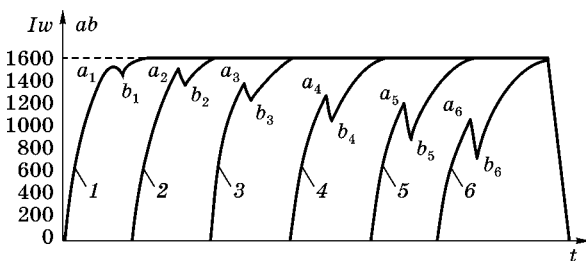


Рис. 6.19

Результаты осциллографирования токов включения при срабатывании электромагнита:

1 — сердечник $K_d = 0,48$; 2 — сердечник $K_d = 0,6$; 3 — сердечник $K_d = 0,68$; 4 — сердечник $K_d = 0,76$; 5 — сердечник $K_d = 0,84$; 6 — сердечник $K_d = 1,0$.

дечника к его основанию электромагнит начинает срабатывать раньше, а высота перепада тока ab , отражающая силу удара якоря о сердечник, возрастает, что обуславливает увеличение кинетической энергии магнитной системы. При $K_d = 1,0$ электромагнит имеет наибольшую кинетическую энергию.

В таблицах 6.1 и 6.2 представлены результаты общих испытаний предлагаемого и традиционных электромагнитов. Из таблицы 6.1 следует, что с уменьшением коэффициента отношения диаметров сердечника ток срабатывания электромагнита вначале снижается, а затем растет, а ток отпадания в диапазоне обозначенных пределов изменения коэффициента методично повышается.

Таблица 6.1

**Зависимость свойств электромагнита
от коэффициента отношения диаметров сердечника**

№ варианта	Диаметр сердечника		Коэффициент отношения диаметров, K_d	Ток, А		Сила, н		Собственное время, с		Коэффициент	
	верхний d_1 , 10^{-3} м	нижний d_2 , 10^{-3} м		срабатывания	отпадания	электромагнитная	приводящая	отпадания	срабатывания	возврата, K_b	запаса, K_c
1	11	25	0,44	0,079	0,028	19,9	33	0,022	0,237	0,35	0,603
2	12	25	0,48	0,972	0,023	25,0	33	0,024	0,216	0,32	0,758
3	13	25	0,52	0,068	0,021	29,0	33	0,026	0,202	0,31	0,879
4	15	25	0,60	0,058	0,016	43,0	33	0,030	0,176	0,27	1,303
5	17	25	0,68	0,051	0,012	51,5	33	0,033	0,155	0,23	1,561
6	19	25	0,76	0,047	0,009	57,0	33	0,036	0,141	0,19	1,727
7	21	25	0,84	0,046	0,0074	64,0	33	0,038	0,136	0,16	1,939
8	23	25	0,92	0,047	0,0064	72,0	33	0,039	0,139	0,13	2,182
9	25	25	1,0	0,049	0,005	61,0	33	0,042	0,152	0,12	1,848

Примечания. 1. Варианты 1...8 — предлагаемой конструкции, вариант 9 — заводской конструкции. 2. Измерения собственного времени срабатывания и отпадания производились при подаче на катушку напряжения, равного $0,63 U_n$ (143 В).



Таблица 6.2

**Зависимость свойств электромагнита
от коэффициента отношения диаметров сердечника**

№ варианта	Диаметр сердечника		Коэффициент отношения диаметров, K_d	Напряжение, В					Мощность катушки, Вт	Вибрация контактов, мс
	верхний d_1 , 10^{-3} м	нижний d_2 , 10^{-3} м		отпадания	трогания	втягивания без ступеньки	четкого втягивания	втягивания без ступеньки		
1	11	25	0,44	64,9	165,3	190,8	258,9	223,7	15,5	5,7
2	12	25	0,48	54,1	152,7	171,6	231,7	206,3	16,0	6,2
3	13	25	0,52	47,8	148,4	158,4	223,2	195,4	16,3	6,6
4	15	25	0,60	37,2	126,2	135,1	187,5	172,5	17,0	7,8
5	17	25	0,68	27,4	110,3	118,9	160,7	153,1	17,8	8,9
6	19	25	0,76	22,3	101,2	109,9	142,5	137,5	18,6	10,2
7	21	25	0,84	17,3	91,1	106,7	138,1	131,9	19,3	11,4
8	23	25	0,92	14,9	82,7	108,3	146,3	136,1	20,1	13,2
9	25	25	1,0	14,2	76,1	114,9	162,9	143,4	20,8	10,8

Коэффициент возврата соответственно зависит от тока срабатывания и от тока отпадания. Как известно, коэффициент возврата определяется по следующей формуле:

$$K_v = I_{отп} / I_{сраб}, \quad (6.34)$$

где $I_{отп}$ — ток отпускания электромагнита; $I_{сраб}$ — ток срабатывания электромагнита.

Электромагнитная сила с уменьшением коэффициента отношения диаметров вначале растет, достигая максимального значения, затем падает.

Полная величина времени срабатывания складывается из времени трогания и времени движения. Оба эти параметра в первую очередь зависят от соотношения между полезной работой, которую должен совершить электромагнит, и мощностью его обмотки [42]. Кроме того, время трогания в значительной степени обусловлено коэффициентом запаса обмотки по току срабатывания, а время движе-

ния — от величины хода якоря и массы движущих частей. Поскольку последние параметры имеют одинаковые величины для всех вариантов электромагнитов, то время срабатывания зависит только от коэффициента запаса обмотки по току срабатывания. Как известно, этот коэффициент определяется по формуле

$$K_3 = P_{эм}/P_{п}, \quad (6.35)$$

где $P_{эм}$ — электромагнитная сила в критическом зазоре; $P_{п}$ — сила противодействия в критическом зазоре.

Результаты других общих испытаний (табл. 6.2) показывают, что применение оптимальных конических сердечников в электромагнитах уменьшает параметры

Таблица 6.3

Сравнительные технико-экономические показатели предлагаемого и аналогового электромагнитов в зависимости от коэффициента отношения диаметров сердечника

№ варианта	Диаметр сердечника		Коэффициент отношения диаметров, K_3	Объем магнитопровода, 10^{-6} м^3	Объем обмоточной меди, 10^{-6} м^3	Объем электромагнита, 10^{-6} м^3	Масса магнитопровода, кг	Масса обмоточной меди, кг	Стоимость магнитопровода, руб.	Стоимость обмоточной меди, руб.	Стоимость активных материалов, руб.
	верхний d_1 , 10^{-3} м	нижний d_2 , 10^{-3} м									
1	11	25	0,44	21,3	75,8	97,1	0,178	0,229	2,06	29,18	31,24
2	12	25	0,48	22,3	77,6	99,9	0,185	0,235	2,15	29,95	32,10
3	13	25	0,52	23,4	78,4	101,8	0,192	0,239	2,23	30,46	32,69
4	15	25	0,60	25,6	81,2	106,8	0,207	0,250	2,40	31,86	34,26
5	17	25	0,68	27,9	85,1	113,0	0,225	0,259	2,61	33,01	35,62
6	19	25	0,76	30,5	88,1	118,6	0,243	0,268	2,82	34,15	36,97
7	21	25	0,84	33,2	91,4	124,6	0,264	0,278	3,06	35,43	38,49
8	23	25	0,92	36,1	94,2	130,3	0,287	0,287	3,33	36,57	39,90
9	25	25	1,0	39,3	97,9	137,2	0,313	0,298	3,63	37,97	41,60

Примечания. 1. Стоимость 1 кг обмоточной меди составляет 3,89 у. е. × × 32,76 руб. = 127,44 руб. 2. Курс 1 доллара равен 32,76 руб. 3. Стоимость 1 кг порошковой массы составляет 11,60 руб.

напряжения втягивания, четкого втягивания, втягивания без ступеньки и увеличивает напряжения отпадания и трогания. В таблице 6.2 также видно, что с уменьшением коэффициента отношения диаметров снижаются энергия втягивающей катушки и вибрация.

Для предлагаемых образцов электромагнитов сокращение объема магнитопровода и обмоточной меди, соответственно уменьшение их массы, а значит, и стоимости находится в прямой зависимости от уменьшения коэффициента соотношения диаметров сердечника, что видно из таблицы 6.3.

Для оптимального электромагнита с $K_d = 0,6$ по сравнению с электромагнитом, имеющим $K_d = 1,0$, масса магнитопровода уменьшилась на 34%, а масса обмоточной меди — на 16%, что привело к снижению стоимости магнитопровода и обмоточной меди на 34 и 16% соответственно. Экономичность возросла не только за счет снижения массы магнитопровода и обмоточной меди, но и благодаря уменьшению потребления электроэнергии на 18% (см. табл. 6.2).

Таким образом, произведен технико-экономический расчет различных вариантов электромагнитов, который показал, что разработанный электромагнит наиболее эффективен и конкурентоспособен.

По результатам анализа теоретических и опытных данных были определены критерии, по которым можно судить об оптимальной форме сердечника:

- максимальная величина магнитного потока, проходящего через верхнюю часть сердечника, которая находится в зоне действия якоря;
- равномерность распределения магнитной индукции по всей высоте сердечника;
- сведение к минимуму избытка кинетической энергии, расходуемой на преодоление противодействующего момента основной (возвратной) и контактных пружин при замыкании якоря.

Сравнивая по таблицам 6.2, 6.3 и рисунку 6.17 магнитные характеристики сердечников с коэффициентами отношения диаметров, равными 0,92 и 0,84, заметим, что

первому критерию оптимальности при нулевом значении угла раствора якоря отвечает соответственно первый сердечник, а при максимальном значении угла раствора якоря — второй. Для этих сердечников тяговые усилия в начале хода якоря наибольшие. Данное утверждение очевидно из рисунка 6.18, где приведены электромагнитные тяговые характеристики исследованных электромагнитов.

Из рисунка 6.11 следует, что второму критерию оптимальности отвечает сердечник с $K_d = 0,76$. Для этого сердечника материал магнитопровода используется наиболее эффективно, так как магнитная индукция по всей длине сердечника имеет почти одинаковую величину.

На рисунке 6.18 видно, что третьему критерию оптимальности отвечают те сердечники, у которых электромагниты имеют тяговые характеристики, наиболее близкие к противодействующей характеристике и в то же время превышающие ее по всему ходу якоря. Этому условию удовлетворяет сердечник с $K_d = 0,6$.

Характеристики электромагнита не могут отвечать одновременно всем трем критериям оптимальности, несмотря на их важность, поэтому в качестве определяющего надо выбрать только один из них. Наиболее важным является третий критерий; остальные лишь частично соответствуют оптимальным характеристикам электромагнита.

6.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ Ш-ОБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ

Особенности разработки магнитных систем переменного тока обусловлены наличием на расщепленном полюсе короткозамкнутого витка, предназначенного для устранения вибрации якоря во включенном состоянии, а также появлением реактивного магнитного сопротивления в магнитной цепи на участках основного магнитопровода и короткозамкнутого витка.

Анализ распределения магнитных потоков в Ш-образных магнитных системах показывает, что для начального

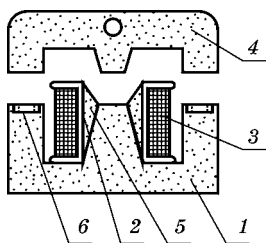


Рис. 6.20

Электромагнит в разомкнутом состоянии:

1 — сердечник магнитной системы; 2 — каркас катушки; 3 — обмотка управления; 4 — якорь; 5 — магнитный шунт; 6 — короткозамкнутый виток.

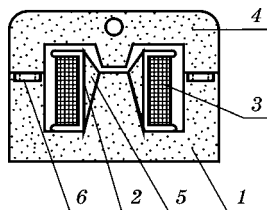


Рис. 6.21

Электромагнит в притянутом состоянии:

1 — сердечник магнитной системы; 2 — каркас катушки; 3 — обмотка управления; 4 — якорь; 5 — магнитный шунт; 6 — короткозамкнутый виток.

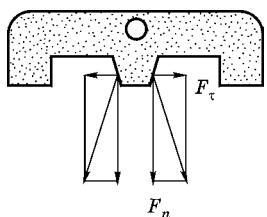


Рис. 6.22

Векторы нормально-го F_n и тангенциально-го F_t потоков на наклонной поверхности среднего полюса якоря

момента работы магнитопровода, когда раствор магнитной системы максимальный, рассеяние основного потока достигает 20...30%, крайние полюса не насыщены и имеют примерно одинаковые потоки Φ_1 и Φ_2 . Поэтому при проектировании электромагнита в целях более эффективного использования магнитного потока в магнитной системе был применен шунт переменного сечения (авт. свид. № 511635). В Ш-образном магнитопроводе средние полюса якоря и сердечника выполнены с сужением в направлении к рабочему воздушному зазору (на рис. 6.20 — в виде равнобокой трапеции), а в образовавшемся пространстве между плоской стенкой каркаса катушки и наклонными стенками среднего полюса размещены ферромагнитные шунты переменного сечения в виде треугольной призмы, которая большой гранью обращена к катушке, одна из боковых граней примыкает к скосу среднего полюса сердечника, другая параллельна скосу среднего полюса якоря, а высота выступающей части призмы над поверхностью разъема магнитопровода равна высоте среднего полюса якоря (рис. 6.20). На рисунке 6.21 изображен Ш-образный электромагнит в притянутом состоянии. Если для обычных электромагнитов переменного тока имеется только вектор нормальной составляющей силы, то для усовер-

шенствованной конструкции — вектор нормальной составляющей силы F_n и тангенциальной составляющей силы F_t (рис. 6.22).

Кроме того, для упрощения технологии изготовления ферромагнитные шунты своими большими гранями могут быть закреплены на двух внутренних противоположных стенках каркаса катушки, обращенных к среднему полюсу сердечника.

В таких Ш-образных магнитопроводах с ферромагнитными шунтами средний полюс почти не участвует в создании минимальной электромагнитной силы, так как экранирующие витки располагаются на крайних полюсах. Кроме того, средний полюс не воспринимает удар якоря о сердечник, так как этому препятствует междуполюсный воздушный зазор порядка $(0,1 \dots 0,2) \cdot 10^{-3}$ м (для Ш-образных магнитопроводов средних величин).

На сердечник 1 магнитной системы насажен каркас 2 с обмоткой возбуждения 3, охватывающей средние полюса и воздушный зазор. Средние полюса сердечника 1 и якоря 4 выполнены в виде равнобочной трапеции. В каркас катушки впрессовываются два шунта 5 призматической формы (рис. 6.23), которые в собранном виде дополняют средний полюс до прямоугольного параллелепипеда и вдобавок имеют в верхней части среднего полюса остроконечные выступы переменного сечения. Подвижный якорь 4, соединенный с траверсой контактной группы, заходит в сферу магнитного действия шунтов 5. Крайние полюса сердечника, как и у всех магнитопроводов переменного тока, имеют короткозамкнутые витки 6 (рис. 6.24).

Результаты сравнительных испытаний опытного и традиционного электромагнитов с Ш-образными магнитопроводами приведены в таблице 6.4.

Испытания показали, что опытный электромагнит с шунтом потребляет тока в 2...2,1 раза меньше, чем традиционный электромагнит

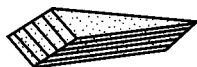


Рис. 6.23

Форма

ферромагнитного шунта

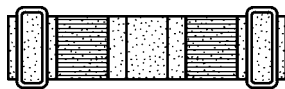


Рис. 6.24

Сердечник магнитной системы (вид сверху)

Сравнительные испытания опытного и традиционного

Параметры электромагнита	Опытный электромагнит с шунтом			
	Замкнутый магнитопровод		Разомкнутый магнитопровод	
U , В	187	220	187	220
I , А	0,065	0,072	0,35	0,39
P , Вт	5,5	7,2	43,2	53,7
S , Ва	11,78	15,84	65,45	85,8
Q , Вар	10,42	14,11	49,17	70,36
$\cos\varphi$	0,467	0,454	0,660	0,626
R , Ом	142,8	142,8	142,8	142,8
Z , Ом	2876,9	3055,6	534,3	564,1
X , Ом	2873,35	3052,26	514,86	545,73
L , Гн	9,15	9,72	1,64	1,74

без шунта для разомкнутой магнитной системы, и в 1,26...1,33 раза меньше — для замкнутой. Потребляемая активная мощность для опытного электромагнита с шунтом значительно меньше, чем для традиционного, потому что катушка для опытного электромагнита потребляет тока значительно меньше, чем катушка для традиционного электромагнита.

Косинус угла сдвига фаз и индуктивность для опытного электромагнита с шунтом больше, чем для традицион-

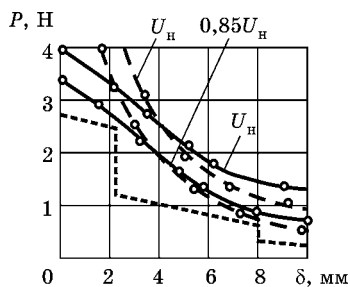


Рис. 6.25
Тяговые и противодействующие характеристики существующего электромагнита (пунктирная линия) и предлагаемого (сплошная линия)

Таблица 6.4

электромагнитов с Ш-образным магнитопроводом

Аналоговый электромагнит			
Замкнутый магнитопровод		Разомкнутый магнитопровод	
187	220	187	220
0,082	0,096	0,71	0,82
59	8,0	75	100
15,33	21,12	130,9	180,4
14,15	19,54	107,28	150,15
0,384	0,378	0,573	0,554
142,8	142,8	142,8	142,8
2280,5	2291,6	263,4	268,3
2276,02	2287,15	221,3	227,14
7,24	7,28	0,70	0,72

ного электромагнита без шунта — как для замкнутой магнитной системы, так и для разомкнутой.

В разомкнутом положении магнитной системы проводимость воздушного зазора δ определяется промежуточным значением воздушного зазора:

$$\delta_1 < \delta < \delta_2,$$

где δ_1 — воздушный зазор без магнитных шунтов; δ_2 — воздушный зазор при замкнутой магнитной системе.

Следовательно, начальное тяговое усилие опытного электромагнита с шунтом больше, чем традиционного электромагнита без шунта (рис. 6.25).

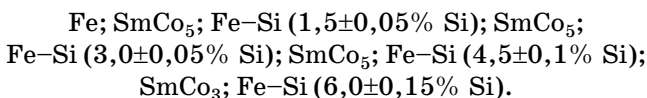
Поскольку в электромагните с предлагаемым шунтом получается повышенное значение начального электромагнитного усилия без уменьшения хода якоря, то потребляемая катушкой энергия и расход обмоточной меди могут быть значительно уменьшены. Конечное тяговое усилие при этом снижается, что приводит к смягчению удара в конце хода якоря и повышению механической износостойкости.



6.3. РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ МАЛОМОЩНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Для изготовления слоистых магнитопроводов создано специальное дозирующее устройство, состоящее из нескольких отдельных камер, с вращением вокруг своей оси для непрерывной подачи порошковой смеси в пресс-форму (авт. свид. № 708165).

Технология дозирования заключается в одновременной подаче в пресс-форму по винтовой линии МММ, содержащего железокремнистый материал с дискретно увеличивающимся ингредиентом кремния, и МТМ, содержащего сплав типа самарий — кобальт, с чередованием слоев по длине ротора в следующей периодической последовательности:



В схемах автоматики и электротехники, в магнитной записи и фотокиноаппаратуре, в программных устройствах и схемах электропривода широко применяются синхронные двигатели, роторы которых содержат постоянные магниты.

Среди многочисленных деталей, изготавливаемых методом порошковой металлургии, особое место занимают детали синхронных двигателей. Применение методов порошковой металлургии для производства магнитных материалов особенно актуально в тех случаях, когда в состав одного изделия входят магнитомягкие и магнитотвердые материалы, а также когда метод порошковой металлургии по сравнению с другими методами, например прокаткой или литьем, позволяет получать изделия с более высокими магнитными характеристиками.

Существующие конструкции синхронных двигателей, имея неиспользуемые резервы, в процессе работы функционируют неэффективно. В результате имеют место большой магнитный поток рассеяния и низкие энергетические показатели.

Кроме того, недостатком синхронных двигателей с постоянными магнитами, лишенных специальных пусковых приспособлений, является отсутствие начального пускового момента. При включении обмотки статора в сеть ротор, обладая определенным моментом инерции, не может разогнаться до синхронной скорости. Техническим результатом разработанного проекта является повышение энергетических показателей синхронного двигателя с постоянными магнитами. На практике были изготовлены синхронные двигатели с ротором, имеющим короткозамкнутую обмотку в виде беличьего колеса, которая выполняется путем заливки пакетов магнитопровода из спеченного кремнистого железа сплавами алюминия при температуре 1166...1226 К.

На основе разработанной технологии изготовления дискретной композиционной магнитной системы сконструирован синхронный двигатель (патент № 2130680), рабочие характеристики которого представлены на рисунке 6.26; здесь же приведены рабочие характеристики серийного двигателя типа ДВС-VI с асинхронным пуском. Они представляют собой зависимости тока I , потребляемой

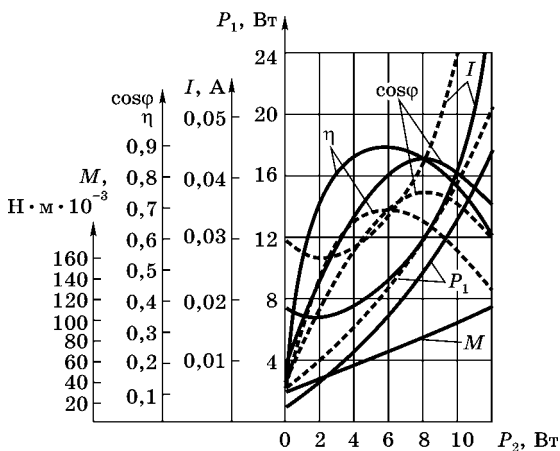


Рис. 6.26

Сравнительные рабочие характеристики синхронного двигателя:

(-- --) — серийный образец; (—) — опытный образец.



электрической энергии P_1 , коэффициента полезного действия (КПД), коэффициента мощности $\cos\phi$ и вращающего момента от отдаваемой энергии P_2 при $U_c = \text{const}$, $f = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$.

Слои прессовались в виде полого диска, наружный диаметр которого составлял $72 \cdot 10^{-3}$ м, внутренний — $46 \cdot 10^{-3}$ м. По наружной образующей диска было выполнено 18 равномерно расположенных отверстий диаметром $6 \cdot 10^{-3}$ м. После того как высота набираемого цилиндрического пакета достигала $61 \cdot 10^{-3}$ м, прессование прекращалось. Для нанесения однофазной обмотки на статоре было предусмотрено 23 паза. Для окончательной сборки ротора в отверстия были вставлены 18 алюминиевых стержней диаметром $5,8 \cdot 10^{-3}$ м, длиной $69 \cdot 10^{-3}$ м, сбоку ротора надевалось по одному диску с таким же количеством отверстий, как на роторе. Зазор между якорем и сердечником составлял $0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Однофазный синхронный электродвигатель (рис. 6.27) включает явнополюсный статор 1 с обмотками возбуждения 2, короткозамкнутый ротор 3, дополнительный магнитопровод 4, который находится внутри ступицы 5, выполненной путем заливки из немагнитного материала, а также вал 6, подшипники 7 и подшипниковые щиты 8. Ротор состоит из многозаходных (в частности, девятизаходных) винтовых композиционных слоев (рис. 6.28).

Слои 9...17 расположены с чередованием МММ с МТМ. Слой 9 выполнен из железного порошка, слои 11, 13, 15 и 17 — из порошка кремнистого железа, причем с различным дискретным содержанием кремния. Слой 11 содержит $1,5 \pm 0,05\%$ Si, слой 13 — $3,0 \pm 0,05\%$ Si, слой 15 — $4,5 \pm 0,1\%$ Si, слой 17 — $6,0 \pm 0,15\%$ Si. Слои, содержащие разное количество кремния в стали, обладают различными магнитными свойствами и, следовательно, позволяют получить разную магнитную проницаемость, причем изменение магнитных свойств происходит от слоя к слою в магнитной цепи ротора. Остальные слои ротора (10, 12, 14, 16) выполнены из одинакового МТМ, в частности SmCo_5 . При достаточно большом диаметре ротора группа слоев может быть повторена (например, от 9 до 17 и снова

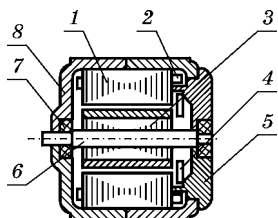


Рис. 6.27
Однофазный
синхронный двигатель

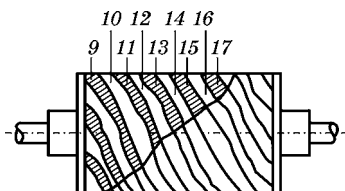


Рис. 6.28
Ротор однофазного
синхронного двигателя

от 9 до 17). Слои ротора 9 и 17 имеют в два раза меньшую ширину, чем остальные слои, и вместе с тем они в сумме равны ширине каждого из остальных слоев, взятых отдельно, т. е. слои 9 и 17 являются совмещенными. По составу они относятся к МММ, только слой 9 состоит из чистого железа, а 17, кроме железа, содержит $6,0 \pm 0,15\%$ Si. Электродвигатель такой конструкции относится к синхронным электродвигателям с магнитной и электрической асимметрией. Поскольку в интервале периодического чередования, как правило, имеются 5 слоев МММ и 4 слоя МТМ, то смещение по окружности слоев первого материала составляет $360^\circ/5 = 72^\circ$, а второго — $360^\circ/4 = 90^\circ$.

При подключении обмотки 2 статора 1 к сети переменного напряжения по ней проходит ток, создающий, например, в слоях 9 и 11 магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 . Вследствие того что активные потери в этих слоях различны, разными будут и фазы магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 во времени. Кроме того, различны и пути движения магнитных потоков: Φ_1 замыкается напрямую через короткозамкнутый ротор 3, в то время как Φ_2 , выходя из статора, ответвляется на дополнительный магнитопровод 4 и замыкается на роторе, что эквивалентно смещению магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 в пространстве относительно друг друга. Аналогичное смещение магнитных потоков происходит и в других смежных слоях.

Взаимодействие магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 с токами ротора от ЭДС, наведенных этими потоками, эквивалентно взаимодействию эллиптического магнитного поля с токами ротора от ЭДС, наведенных этим же магнитным

полем. Таким образом, эти токи, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, создают вращающий момент и в соответствии с законом Ленца приводят «беличье колесо» в асинхронное вращение. До частоты вращения, близкой к синхронной, ротор 3 разгоняется как асинхронный, а затем самостоятельно втягивается в синхронизм и продолжает вращаться с синхронной частотой вращения. В синхронном двигателе магнитный поток в воздушном зазоре практически задан напряжением, подаваемым на статор, и целесообразно регулирование реактивной энергии статора или ротора или их реактивных составляющих тока в зависимости от требований, предъявляемых к двигателю. Эти требования заключаются в обеспечении высоких энергетических показателей — мощности, тока, КПД, коэффициента мощности и других параметров.

Испытания показали, что кривая изменения тока для разработанного двигателя проходит ниже кривой изменения тока для серийного двигателя ДВС-У1 на всем диапазоне изменения нагрузок, так как спеченный магнитопровод имеет высокую магнитную проницаемость и малую коэрцитивную силу, а короткозамкнутая обмотка ротора способствует более свободному прохождению магнитного потока статора. Измеренные токи для обоих двигателей при ХХ являются практически реактивными. По мере роста нагрузок возрастает активная составляющая тока, в связи с чем зависимости общего тока от относительной мощности для сравниваемых двигателей носят нелинейный характер.

Кривая изменения потребления мощности из сети для разработанного двигателя проходит ниже кривой изменения потребления мощности из сети для аналогового двигателя ДВС-У1 на всем диапазоне изменения нагрузок, так как спеченный магнитопровод имеет малые значения электрических потерь и магнитного потока рассеяния. Кривые изменения потребления мощности из сети при небольшой нагрузке для сравниваемых двигателей пропорциональны нагрузке и проходят почти параллельно, однако при увеличивающейся нагрузке для серийного

двигателя эта пропорциональность несколько нарушается вследствие увеличения потерь в меди обмотки.

Кривая изменения КПД для разработанного двигателя проходит выше кривой изменения КПД для серийного двигателя ДВС-У1 во всем диапазоне изменения нагрузок, так как первый имеет низкие потери в стали и меди. Сравнимые кривые демонстрируют одинаковую зависимость: с увеличением нагрузок КПД резко возрастают, достигая одновременно максимального значения, а затем падают, достигая минимального значения.

Кривая изменения коэффициента мощности $\cos\varphi$ для разработанного двигателя проходит выше кривой изменения коэффициента мощности для серийного двигателя ДВС-У1 во всем диапазоне изменения нагрузок, так как первый имеет меньшее значение индуктивного сопротивления обмотки. Сравнимые кривые возрастают с увеличением нагрузки от 0 до 0,8...0,85 от номинальной. Однако $\cos\varphi$ для разработанного двигателя достигает наибольшего значения раньше, чем $\cos\varphi$ для серийного двигателя. При дальнейшем увеличении нагрузки значения $\cos\varphi$ уменьшаются для обоих сравниваемых двигателей, а отдаваемые в сеть реактивные энергии возрастают.

Кривая изменения вращающего момента для разработанного двигателя проходит выше кривой вращающего момента для серийного двигателя ДВС-У1 во всем диапазоне изменения нагрузок. Ход этих кривых связан с нагрузкой (они параллельны друг другу).

Поскольку частота вращения двигателя постоянна и равна 1500 мин^{-1} , зависимость частоты вращения от нагрузки не приводится.

Сравнительное исследование показало, что использование предлагаемого синхронного двигателя уменьшает затраты стали на 33% по сравнению с серийным синхронным двигателем ДВС-У1, повышает КПД на 14%, снижает потребляемую электрическую энергию на 17%, повышает $\cos\varphi$ на 11%, снижает ток ХХ на 24% и увеличивает вращающий момент на 13%, что в совокупности демонстрирует лучшие энерго- и ресурсосберегающие показатели двигателя.



6.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Повышение эффективности работы индукторного генератора, применяемого в автомобильной промышленности, во многом зависит от разработки новой конструкции, однако немаловажным фактором является также создание новой технологии. В настоящее время магнитопроводы статоров и роторов автомобильных генераторов производят шихтованными — собирают из тонких листов электротехнических сталей, внешние контуры, отверстия, пазы и зубцы которых получают методом штамповки. Однако метод штамповки неэкономичен, он ведет к неоправданным затратам дорогой и дефицитной электротехнической стали, а отходы, образующие до 40%, идут в металлолом.

Большие резервы роста технических характеристик кроются в применении новых технологических процессов, в автоматизации и механизации производства, в лучшей организации труда и всего производственного процесса.

Перспективное направление — методы порошковой металлургии [92; 120], позволяющие получать магнитные системы индукторного генератора по безотходной технологии, синтезировать материалы с широким набором химических элементов, выпускать кондиционные изделия сложной формы, прессовать и спекать изделия до класса точности 8. Разработка новой технологии открывает большие возможности по созданию изделий с высокими фи-



Рис. 6.29
Конструкции ротора и статора индукторного генератора типа Г-700 среди деталей пресс-формы

зико-механическими свойствами, не достижимыми путем обычных литейных металлургических процессов [100].

Нашей целью являлась разработка магнитной системы индукторного генератора с повышенными техническими характеристиками.

Магнитные системы индукторного генератора были

изготовлены на основе разработанной критической технологии (см. раздел 4.6), а ТМО произведена по режиму, изложенному в разделе 4.1.

Исследованию был подвергнут опытный образец генератора, изготовленный из спрессованных слоистых магнитопроводов статора и ротора с толщиной слоев $1 \cdot 10^{-3}$ м. Статор имеет следующие размеры: внешний диаметр $120 \cdot 10^{-3}$ м, внутренний — $85,4 \cdot 10^{-3}$ м, длина — $28 \cdot 10^{-3}$ м. Внешний диаметр ротора составляет $85,0 \cdot 10^{-3}$ м, внутренний — $18,0 \cdot 10^{-3}$ м, длина — $30,5 \cdot 10^{-3}$ м. Ротор помещался внутри статора с равномерным по периметру зазором, равным $0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

На рисунке 6.29 представлены конструкции ротора и статора индукторного генератора среди деталей пресс-формы.

Произведем сравнительный расчет на прочность ротора опытного образца генератора и ротора серийного генератора.

Исходные данные:

- модуль упругости сплава $E_1 = 2,15 \cdot 10^{11}$ Н/м²;
- модуль упругости стали 08ПС $E_2 = 1,75 \cdot 10^{11}$ Н/м²;
- относительное удлинение сплава $\varepsilon_1 = 5,7\%$;
- относительное удлинение стали 08ПС $\varepsilon_2 = 26\%$;
- максимальная частота вращения ротора $n = 6000$ об./мин;
- диаметр ротора генератора $d = 85 \cdot 10^{-3}$ м;
- длина ротора $l = 30,5 \cdot 10^{-3}$ м;
- масса ротора $m = 0,75$ кг.

1. Удельная сила на единицу поверхности ротора составляет

$$F_d/S = E\varepsilon.$$

2. Определим поверхность ротора:

$$S = 2\pi rl = 2\pi \cdot 42,5 \cdot 10^{-3} \cdot 30,5 \cdot 10^{-3} = 8140,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

3. Действительная центробежная сила ротора, изготовленного из предлагаемого сплава, будет равна:

$$\begin{aligned} F_r &= E_1 S \varepsilon_1 = \\ &= 2,15 \cdot 10^{11} \cdot 8140,5 \cdot 10^{-6} \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} = 8,4 \cdot 10^6 \text{ Н.} \end{aligned}$$



4. Для сравнения рассчитаем действительную центробежную силу для серийного генератора:

$$F_{\Gamma} = E_2 S \varepsilon_2 = 1,75 \cdot 10^{11} \cdot 8140,5 \cdot 10^{-6} \cdot 22,1 \cdot 10^{-3} = 31,5 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

5. Определим угловую частоту вращения ротора генератора:

$$\omega = 2\pi n / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 10^3 / 60 = 628 \text{ 1/с.}$$

6. Центробежное ускорение ротора равно:

$$a = \omega^2 r = 628^2 \cdot 42,5 \cdot 10^{-3} = 16 \text{ 761 м/с}^2.$$

7. Рассчитаем теоретически центробежную силу ротора по первому закону Ньютона, исходя из максимального центробежного ускорения:

$$F = ma = 0,75 \cdot 16 \text{ 761} = 1,3 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Следовательно, центробежная сила, которую выдерживает ротор, изготовленный из предлагаемого сплава и стали 08ГТС, выдерживает бóльшую центробежную силу, чем центробежная сила, вычисленная теоретически для максимальной частоты вращения ротора генератора.

Свойства индукторного генератора проявляются в его работе и определяются основными характеристиками. На рисунке 6.30 представлена внешняя характеристика выпрямленного напряжения от тока нагрузки $U_d = f(I_d)$ при частоте вращения $n = \text{const}$, токе возбуждения $i_B = \text{const}$ и

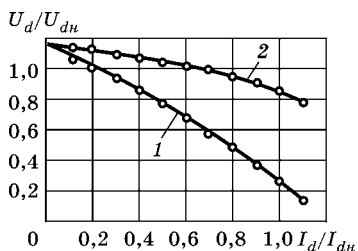


Рис. 6.30

Зависимость относительного напряжения индукторного генератора от тока нагрузки:

1 — серийный образец; 2 — опытный образец.

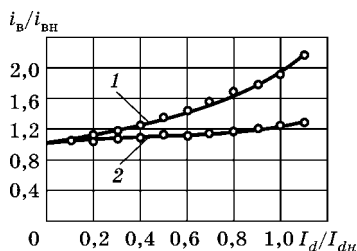


Рис. 6.31

Зависимость относительного тока возбуждения индукторного генератора от тока нагрузки:

1 — серийный образец; 2 — опытный образец.

$\cos\varphi = 1$. Данная характеристика построена в относительных единицах.

Испытания показали, что по мере увеличения нагрузки напряжение падает, так как при этом все более усиливается размагничивающее действие реакции якоря и растет падение напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния. Однако кривая изменения напряжения для опытного образца генератора проходит выше кривой для серийного генератора типа Г-700 на всем диапазоне изменения нагрузок, так как спеченная магнитная система имеет лучшие характеристики: большой магнитный поток, малую коэрцитивную силу и меньшую величину индуктивного сопротивления.

Напряжение для опытного образца генератора при номинальном токе нагрузки в 50 А составляет 0,85 от номинального напряжения, для аналогового генератора — 0,25 от номинального напряжения, что позволяет уменьшить падение напряжения в 3,4 раза.

Для поддержания постоянного напряжения при растущей нагрузке необходимо увеличивать ток возбуждения. На рисунке 6.31 представлена зависимость регуляровочной характеристики тока возбуждения от тока нагрузки $i_b = f(I_d)$ при напряжении $U_d = \text{const}$, частоте вращения $n = \text{const}$ и $\cos\varphi = 1$. Данная характеристика построена в относительных единицах.

Кривая изменения тока возбуждения для опытного образца генератора проходит ниже кривой для серийного генератора типа Г-700 на всем диапазоне изменения тока нагрузки, так как индуктивное сопротивление опытного образца генератора больше, чем у серийного генератора. Это связано с тем, что в спеченной магнитной системе опытного образца доминирует индуктивность из-за высокой магнитной проницаемости сплава над индуктивностью в магнитной системе серийного генератора и, следовательно, ток возбуждения для опытного образца генератора требуется меньшей величины по сравнению с током возбуждения аналогового генератора для поддержания необходимого тока увеличивающейся нагрузки.

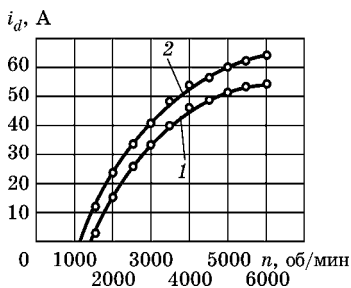


Рис. 6.32

Влияние частоты вращения ротора индукторного генератора на ток нагрузки:

1 — серийного образца; 2 — опытного образца.

генератора $I_d = f(n)$ при напряжении $U_d = \text{const}$, токе возбуждения $i_b = \text{const}$ и $\cos\varphi = 1$ (рис. 6.32). Частоту вращения ротора регистрировали с помощью тахометра № 256 с номинальной частотой измерения 600... 4000 об./мин через передаточное отношение колечатого вала 1:2,5. Питание осуществляли от генератора частоты 600 Гц.

Токоскоростная характеристика генератора имеет экспоненциальную форму кривой нарастания тока нагрузки, и с увеличением частоты вращения отдаваемый генератором ток растет все медленнее. Это связано с тем, что с увеличением частоты вращения ротора генератора возрастает индуктивное сопротивление обмотки статора, пропорциональное квадрату числа витков. Нагрузочные токи в обоих случаях достигают постоянной величины, определяемой параметрами обмоток генератора и величиной магнитного потока.

Испытания показали, что ток нагрузки для серийного генератора типа Г-700 при номинальной частоте вращения ротора 5000 об./мин равен 52 А, для опытного образца генератора — 60,5 А, что позволяет повысить ток нагрузки опытного образца генератора на 16%. В последнем случае отдаваемый генератором ток имеет большую величину вследствие большей величины магнитного потока холостого хода и высокой магнитной проницаемости спеченного магнитопровода.

Испытания показали, что ток возбуждения для опытного образца генератора при номинальном токе нагрузки в 52 А составляет 1,2 от номинального тока возбуждения, для серийного — 1,9, что позволяет снизить ток возбуждения в 1,58 раза.

Для сравнения технического уровня генераторов относительно размеров, массы и мощности снимают токоскоростную характеристику

6.5. РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Актуальная проблема современного электромашиностроения — замена традиционной листовой электротехнической стали спеченным магнитным материалом из порошкового кремнистого железа в асинхронных двигателях переменного тока.

В результате применения инновационных методов исследования были выявлены неиспользованные резервы совершенствования микродвигателей. Одним из направлений совершенствования технологии электротехнических устройств является изготовление изделий методом порошковой металлургии [77]. В настоящее время методика изготовления электротехнических изделий на этой основе, несмотря на ее перспективность, до конца не разработана. Не производятся также изделия из электротехнических сталей, содержащих более 4% кремния. Применение новой технологии открывает большие возможности по созданию изделий с высокими физико-механическими свойствами, не достижимыми путем обычных металлургических процессов [80].

Прессование и спекание роторов и статоров асинхронного двигателя производились по критической технологии, описанной в разделе 4.6, а ТМО — по режиму, рассмотренному в разделе 4.1.

Особенность инновационной технологии состоит в том, что сначала подготовленный железокремнистый порошок подвергают гомогенизирующему отжигу, затем осуществляют дозирование по винтовой линии на специальном дозаторе, после чего выполняют прессование, жидкофазное спекание, ТМО и в завершение процесса — термический отжиг.

Важная операция в процессе изготовления спеченных магнитопроводов — приготовление шихты. Поставка распыленного железного порошка марки PASC 20 (базовый железный порошок ASC 100.29) была осуществлена фирмой «ХЭГАНЕС» (Швеция). Необходимый состав шихты был достигнут смешиванием железного порошка марки PASC 20 с поликристаллическим порошком кремния



КПС-1 (ТУ 48-4-319-84). В окончательном виде шихта имела следующий состав (масс. %): 93,29 Fe, 6,5 Si, 0,2 P, 0,01 C. Железокремнистый порошок фракции $(-56...+40) \cdot 10^{-6}$ м перед дозированием подвергался гомогенизирующему отжигу при температуре 1470...1520 К в течение 7200 с в вакууме $6,65 \cdot 10^{-1}$ Па ($5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.).

Дозирование однородных порошкообразных материалов производилось в промышленных дозаторах, однако для изготовления слоистых магнитопроводов было создано специальное устройство, состоящее из двух отдельных камер, с вращением вокруг своей оси для непрерывной подачи порошковой смеси в пресс-форму (авт. свид. № 708165). Технология дозирования состояла в одновременной подаче в пресс-форму по винтообразной линии поочередно магнитомягкого порошка, содержащего железокремнистый материал, и изоляционного порошка. По достижении общей массой порошка заданной высоты весовая головка опускалась и замыкала контакты, которые подавали сигнал к закрытию электромагнитных шторок. Как только последние перекрывали непрерывный поток порошка, пресс-форма автоматически отводилась в сторону и производилось прессование на гидравлическом прессе типа 2ПГ-500. Таким образом формовалось прессованное изделие, состоящее из чередующихся винтообразных слоев ферромагнитного материала и диэлектрика.

Исследование асинхронного двигателя осуществлялось на спрессованных слоистых магнитопроводах статора с толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Статор состоял из двух деталей и выполнялся следующим образом: отдельно изготавливались обойма в форме полого цилиндра, спрессованного по винтообразному контуру, и цельноспрессованный ободок зубчатой формы. Ободок вставлялся в обойму так, что открытые пазы статора в двигателе находились со стороны ободка, т. е. магнитопровод статора получался с закрытыми пазами. В собранном виде статор имел следующие размеры: внешний диаметр — $62 \cdot 10^{-3}$ м, внутренний — $51 \cdot 10^{-3}$ м, длина — $22 \cdot 10^{-3}$ м.

Внутри статора размещался ротор с равномерным по периметру зазором, равным $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Магнитная систе-

ма ротора состояла из одной детали, спрессованной на вал по винтообразному контуру с толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. На практике были изготовлены двигатели с ротором, имеющим короткозамкнутую обмотку в виде беличьей клетки, которая была выполнена из отдельных алюминиевых стержней, равномерно установленных по окружности ротора. Стержни замыкались с торцов с помощью колец из того же материала. Ротор этой конструкции был выполнен следующих размеров: внешний диаметр — $50,5 \cdot 10^{-3}$ м, внутренний — $16 \cdot 10^{-3}$ м, длина — $22 \cdot 10^{-3}$ м.

При зазоре между статором и ротором, равном $0,5 \times 10^{-3}$ м, асинхронная машина имеет относительно большой воздушный зазор по сравнению с трансформатором, у которого он практически отсутствует. Большой зазор приводит к увеличению тока ХХ двигателя, уменьшению КПД и снижению $\cos\phi$. Возможно также, что магнитный поток будет замыкаться непосредственно через поверхность статора, что приведет к соответствующему увеличению магнитного потока рассеяния. Однако измерения показали, что при зазоре $0,5 \cdot 10^{-3}$ м между статором и ротором магнитная индукция серийного образца равна 0,46 Тл, опытного — 1,23 Т.

С увеличением содержания кремния магнитные свойства существенно изменяются. На рисунке 6.33 представлена зависимость изменения максимальной магнитной проницаемости от доли кремния при температурах спекания 1573 и 1683 К. При содержании кремния 6,5% наблюдается экстремальное увеличение максимальной магнитной проницаемости [52]. Такое повышение в диапазоне обозначенных пределов изменения содержания кремния коррелирует с близким к нулю значением двух физических констант: постоянной магнитной анизотропии и постоянной магнитострикции. Максимальная магнитная проницаемость после спекания при температуре 1573 К достигает 98 780, после спекания при температуре 1683 К — 132 500, после спекания при температуре 1683 К в магнитном поле — до 271 610. Дальнейшие испытания показали, что наиболее эффективно функционирует в асинхронном двигателе магнитная система, содержащая 6,5% кремния.

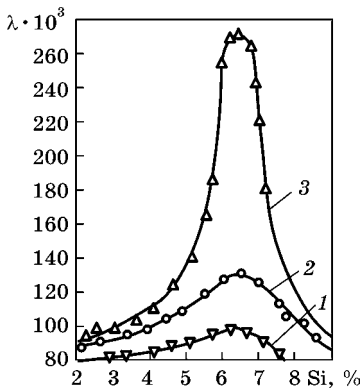


Рис. 6.33

Зависимость изменения максимальной магнитной проницаемости от увеличения содержания кремния:

1 — спекание при 1573 К; 2 — спекание при 1683 К в вакууме; 3 — спекание при 1683 К в вакууме, при охлаждении с 1050 К в магнитном поле 3180 кА/м.

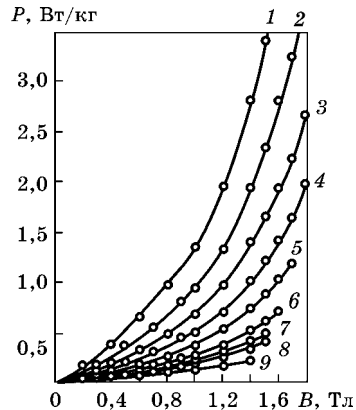


Рис. 6.34

Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции для образцов, изготовленных при различном содержании кремния:

1 — 1%; 2 — 2%; 3 — 3%; 4 — 4%; 5 — 5%; 6 — 6%; 7 — 6,5%; 8 — 1%; 9 — 8%.

Кроме того, с повышением содержания кремния возрастает удельное сопротивление и соответственно удельные потери. Увеличение удельных потерь вызывает повышение температуры магнитопровода, которая не должна превосходить допустимого значения. Высокая температура может стать причиной выхода из строя проводов обмотки и изоляции и не позволит повысить рабочую индукцию, что не дает возможности уменьшить габаритные размеры и массу магнитопровода.

Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции для образцов с различным содержанием кремния в кремнистом железе представлена на рисунке 6.34.

Для магнитопровода, изготовленного из кремнистого сплава с содержанием 3,0% кремния, с толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, частотой перемагничивания 50 Гц для магнитной индукции 1,0 Т удельные потери составляют 0,69 Вт/кг, т. е. удельные потери в 2,6 раза ниже, чем для тех же параметров электротехнической стали марки 1411,

содержащей также 3,0% кремния. Удельные потери для магнитной индукции 1,5 Т составляют 1,68 Вт/кг, т. е. в 2,3 раза ниже, чем для тех же параметров электротехнической стали марки 1411. Для магнитопровода, изготовленного из кремнистого сплава с содержанием кремния 6,5%, с толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, частотой перемагничивания 50 Гц для магнитной индукции 1,0 Т удельные потери составляют 0,23 Вт/кг, т. е. в 7,8 раза ниже, чем для тех же параметров электротехнической стали марки 1411. Удельные потери для магнитной индукции в 1,5 Т составляют 0,52 Вт/кг, т. е. в 7,5 раза ниже, чем для тех же параметров электротехнической стали марки 1411.

Судить об эффективности работы асинхронного двигателя опытного образца можно по его рабочим характеристикам, представленным на рисунке 6.35. Здесь же приводятся рабочие характеристики предлагаемого асинхронного двигателя УАД-54.

При увеличении нагрузки частота вращения ротора незначительно снижается, в то время как скольжение возрастает. Характеристика $n = f(P_2)$ сравниваемых асинхронных

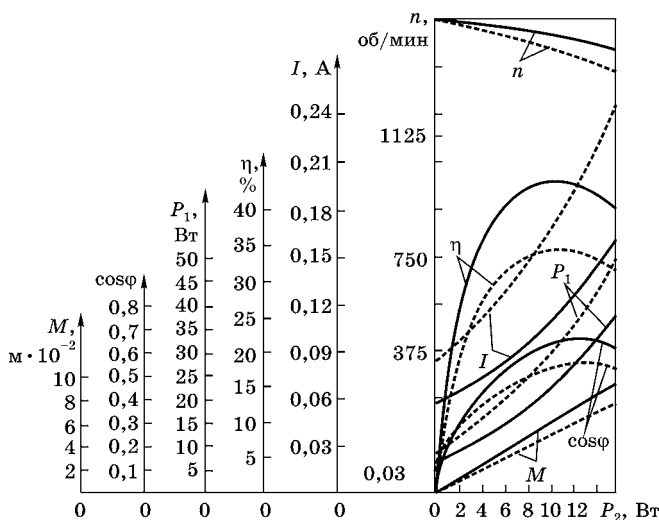


Рис. 6.35

Рабочие характеристики серийного асинхронного двигателя (---) и предлагаемого асинхронного двигателя (—)

двигателей — жесткая: относительно синхронной скорости 1500 об./мин при максимальной нагрузке частота вращения ротора для предлагаемого двигателя УАД-54 составляет 1340 об./мин, для двигателя опытного образца — 1408 об./мин.

Полный ток статора с увеличением нагрузки растет из-за того, что активная составляющая тока пропорциональна полезной мощности. Реактивная же составляющая в диапазоне рабочих нагрузок почти не претерпевает изменения, так как она определяется главным образом током ХХ. Для двигателей серийного и опытного образцов тока ХХ имеют разные значения, хотя воздушные зазоры выполнены одинаковыми: $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Ток ХХ для серийного двигателя УАД-54 равен 0,089 А, для двигателя опытного образца — 0,053 А. С увеличением содержания кремния падает коэрцитивная сила, которая адекватно зависит от физического значения постоянной магнитной анизотропии, а оно с ростом доли кремния уменьшается. Постоянная магнитной анизотропии кремнистого сплава, содержащего 3% Si, составляет $365 \cdot 10^3$ эрг/см, а сплава, содержащего 6,5% Si, — $206 \cdot 10^3$ эрг/см³.

Зависимость энергии, поступающей из сети в обмотку статора, от полезной энергии на валу имеет возрастающий характер. При небольших нагрузках потребляемая энергия пропорциональна нагрузке, однако при больших нагрузках эта пропорциональность нарушается из-за увеличения потерь в меди обмоток статора и ротора. Электрические потери в обмотках статора и ротора, а также добавочные потери изменяются пропорционально квадрату тока нагрузки. Потребляемая энергия при номинальной нагрузке для серийного двигателя УАД-54 составляет 36 Вт, для двигателя опытного образца — 28 Вт.

Формы кривых КПД для серийного и опытного образцов двигателя примерно идентичны. В начальный момент КПД равны нулю, так как полезная энергия отсутствует. При увеличении нагрузки КПД обоих двигателей возрастают. Максимальный КПД для каждого двигателя имеет свое значение. Например, для серийного двигателя УАД-54 равенство постоянных и переменных потерь дос-

тигается при несколько большем КПД, чем для двигателя опытного образца. Максимальное значение КПД для серийного двигателя УАД-54 составляет примерно 36%, для двигателя опытного образца — 45%. При дальнейшем росте нагрузки КПД серийного двигателя УАД-54 снижается до 31%, опытного — до 41%.

Обычно характеристика $\cos\varphi = f(P_2)$ лежит в области значений, меньших единицы, так как асинхронный двигатель всегда потребляет ток ХХ, определяемый коэрцитивной силой и зазором между статором и ротором и не зависящий от нагрузки в диапазоне мощностей от нуля до номинального значения. При ХХ обычно $\cos\varphi < 0,4$, так как он в основном содержит реактивную составляющую. Коэффициент мощности при ХХ для серийного двигателя УАД-54, выполненного из электротехнической стали марки 1411, составляет 0,11; для двигателя опытного образца, выполненного из спеченного магнитопровода, — 0,15. При увеличении нагрузки $\cos\varphi$ возрастает для обоих двигателей и достигает максимального значения 0,52 для серийного двигателя УАД-54 и 0,63 для двигателя опытного образца. При дальнейшем росте нагрузки $\cos\varphi$ для обоих двигателей уменьшается: для серийного двигателя УАД-54 до 0,49, для двигателя опытного образца до 0,59, так как при этом возрастает скольжение и частота тока в роторе, т. е. повышается индуктивное сопротивление обмотки ротора и происходит усиление полей рассеяния. Таким образом, при работе в обмотках двигателя серийного образца доминирует реактивная энергия, а в двигателе опытного образца — активная.

Вращающий момент на валу двигателя связан прямой зависимостью с полезной энергией. В результате малого изменения частоты вращения зависимость вращающего момента от полезной энергии близка к линейной. Для номинальной энергии вращающий момент в серийном двигателе УАД-54 составляет примерно $5,75 \cdot 10^{-2}$ Н·м, в двигателе опытного образца — $7,4 \cdot 10^{-2}$ Н·м.

Таким образом, исследования показали, что разработанный опытный образец асинхронного двигателя по техническим характеристикам успешно конкурирует с серийным двигателем типа УАД-54.

6.6. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Известно, что трансформаторы малой мощности (10...350 ВА) используют в разных отраслях производства: в реактивной технике и автоматике, радиоэлектронике и телемеханике, в вычислительной технике и устройствах релейной защиты [96].

В качестве материала для магнитопровода обычно применяется нормативная листовая электротехническая сталь толщиной 0,35 и $0,5 \cdot 10^{-3}$ м (ГОСТ 21427.0-75), покрытая изоляцией из жаростойкого лака. Магнитопровод трансформатора набирается из штампованных стальных пластин внахлест. Пластины укладываются так, чтобы у лежащих рядом полос разрезы находились в разных местах. Магнитное сопротивление таких пластин значительно меньше, так как они плотно прилегают друг к другу. Однако метод штамповки — недешевый технологический способ, ведущий к неоправданным затратам дорогой и дефицитной электротехнической стали. Отходы, образующие до 21,8%, идут в металлолом.

В современном трансформаторостроении назрела проблема замены электротехнической стали магнитным материалом из специального сплава. В магнитных системах трансформаторов можно успешно применять слоистые магнитопроводы. На рисунке 6.36 представлена партия слоистых сердечников для трансформаторов напряжения малой мощности.

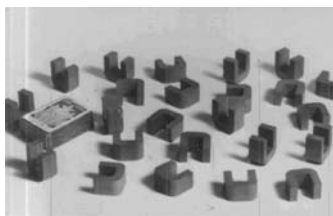


Рис. 6.36
Партия слоистых сердечников для трансформаторов напряжения малой мощности

Методы порошковой металлургии позволяют изготавливать магнитные системы по безотходной технологии, синтезировать материалы с набором химических элементов в широком диапазоне, выпускать кондиционные изделия сложной формы, прессовать и спекать изделия до класса точности 8 [112]. Разработка но-

вой технологии открывает широкие возможности по созданию изделий с высокими физико-механическими свойствами, которые нельзя получить в ходе обычных литейных металлургических процессов [120].

Конструкция сердечника трансформатора, изготовленного методом порошковой металлургии, наиболее проста и технологична, так как изделие производится качественное и с оптимальными расходами — малыми энерго- и материальными затратами и низкой стоимостью. Количественная оценка технологичности конструкции трансформатора также высока, так как она характеризуется малой трудоемкостью и высокой производительностью.

Свойства и инновационные технологии магнитных материалов в значительной мере определяют такие технические характеристики, как мощность, падение напряжения, КПД, $\cos\varphi$, а также внешние характеристики: габариты, масса, стоимость. Поэтому улучшению магнитных свойств спеченных сплавов, освоению новой технологии изготовления и повышению характеристик трансформатора уделяется большое внимание.

На практике спеченные магнитные системы переменного тока получают способом порошковой металлургии цельнопрессованными. Технология их изготовления при этом не учитывает дислокационной и доменной структур [92]. В этом случае мы пренебрегаем вихревыми токами, явлением гистерезиса и действием магнитных потоков рассеяния. В реальном трансформаторе все эти явления влияют на происходящие процессы.

Нашей целью являлась разработка магнитопровода для трансформатора малой мощности с повышенными техническими характеристиками. Прессование и спекание сердечников трансформатора было произведено по критической технологии, изложенной в разделе 4.6, а ТМО была осуществлена по режиму, указанному в разделе 4.1.

Для эксплуатации были изготовлены трансформаторы следующих конструктивных исполнений: стержневые, броневые, кольцевые. Исследование магнитных свойств производилось на трансформаторах со стержневыми



магнитопроводами следующих размеров: общая ширина составляла $80 \cdot 10^{-3}$ м, высота — $120 \cdot 10^{-3}$ м, ширина каждого керна — $25 \cdot 10^{-3}$ м. Все магнитопроводы были выполнены одинаковой толщины ($40 \cdot 10^{-3}$ м), имели 80 слоев толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м каждый. Жидкофазное спекание, ТМО и отжиг прессовок производили в вакуумной электропечи типа СНВЛ-1.3.1/1-М2. Синтез железокремнистого сплава осуществляли в вакууме $0,065 \cdot 10^{-2}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) при температуре 1608 К. После того как в процессе отжига свойства магнитопроводов достигли определенной кондиции, были изготовлены две обмотки, обе из провода ПЭВ-2. Первичную обмотку трансформатора навивали 440 витками и диаметром $1 \cdot 10^{-3}$ м, вторичную обмотку — 44 витками и диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Рабочие характеристики трансформатора определяют магнитные свойства материала. На рисунке 6.37 представлены сравнительные кривые намагничивания стали с толщиной листа (слоя) $0,5 \cdot 10^{-3}$ м в постоянном поле. Кривая намагничивания спеченной стали с 6,5% Si до магнитной напряженности около

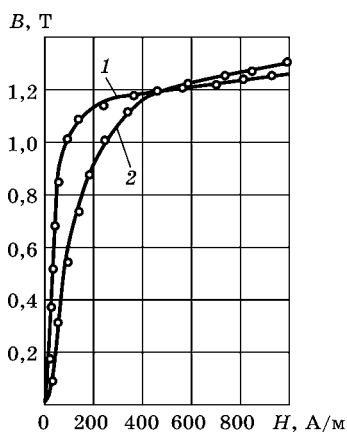


Рис. 6.37

Сравнительные кривые намагничивания кольцевых магнитопроводов на постоянном токе:

1 — спеченный магнитопровод с 6,5% Si и 93,5% Fe; 2 — магнитопровод из электротехнической стали 1511.

200 А/м проходит круче кривой намагничивания электротехнической стали 1511. Такой характер кривой позволяет для намагничивания спеченной стали затрачивать меньшую магнитодвижущую силу, чем для намагничивания листовой электротехнической стали 1511. Чтобы создать в магнитопроводе индукцию в 1,0 Тл, для электротехнической стали 1511 требуется напряженность магнитного поля 220 А/м, для спеченной стали — примерно 100 А/м. Такое соотношение значений напряженности магнитного поля позволило при

выполнении обмотки трансформатора уменьшить расход обмоточной меди на 24%.

При расположении рабочей точки магнитной индукции на кривой намагничивания $B = f(H)$ в верхних крайних пределах прямолинейного участка габариты магнитопровода получаются оптимальными. На рисунке 6.37 видно, что прямолинейный участок кривой намагничивания для электротехнической стали 1511 заканчивается на индукции около 0,6 Т, для спеченной стали — около 0,9 Т.

В области магнитных полей выше зоны колена намагничивания (магнитная напряженность более 400 А/м) кривая намагничивания электротехнической стали 1511 проходит выше кривой намагничивания спеченной стали вследствие повышенного значения магнитной индукции насыщения. Проектирование трансформатора для функционирования в этой зоне нецелесообразно, так как в данном случае расчеты демонстрируют нерациональный расход магнитного материала и обмоточной меди.

В таблице 6.5 показано влияние толщины пластин (слоев) магнитопровода на удельные потери. Удельные потери магнитопроводов, изготовленных из спеченного материала, в два раза ниже, чем для магнитопроводов, изготовленных из пластин электротехнической стали марки 1511.

Известно, что, в отличие от электрических машин, у трансформатора нет движущихся частей, поэтому он не имеет и механических потерь при функционировании. К потерям, имеющим место при функционировании трансформатора, относятся потери на гистерезис, вихревые токи

Таблица 6.5

Удельные потери магнитопроводов, Вт/кг

Трансформатор	Толщина пластин (слоев), 10^{-3}								
	0,05	0,08	0,1	0,15	0,2	0,35	0,5	0,8	1,0
Опытный образец	0,7	0,73	0,75	0,8	0,9	1,25	1,65	3,4	5,1
Аналоговый образец ТБС-2	1,5	1,64	1,67	1,75	1,99	3,1	3,6	7,1	11,5

Примечание. Удельные потери определялись при магнитной индукции 1,5 Т на частоте перемагничивания 50 Гц.



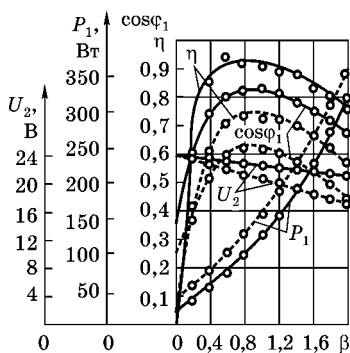


Рис. 6.38

Сравнительные рабочие характеристики трансформатора малой мощности в зависимости от коэффициента нагрузки: (---) — серийный образец; (—) — опытный образец.

Здесь же приведены рабочие характеристики трансформатора серийного образца ТБС-2.

Зависимость энергии $P_1 = f(\beta)$, поступающей от сети в обмотку трансформатора, начинается с энергии холостого хода как для серийного трансформатора, так и для опытного образца, и в дальнейшем с увеличением коэффициента нагрузки зависимость носит возрастающий характер. Энергия суммарных потерь (на гистерезис и вихревые токи) в стали магнитопровода пропорциональна квадрату магнитной индукции и, следовательно, квадрату магнитного потока. Электрические потери в обмотках трансформатора и добавочные потери изменяются пропорционально квадрату коэффициента нагрузки. Энергия потерь в стали магнитопровода для трансформатора серийного образца превышает энергию потерь в стали магнитопровода для трансформатора опытного образца. Потребляемая энергия при номинальной нагрузке для трансформатора серийного образца ТБС-2 составляет 157 Вт, для трансформатора опытного образца — 120 Вт. При дальнейшем росте коэффициента нагрузки до $\beta = 2$ потребляемая мощность повышается для трансформаторов серийного образца ТБС-2 до 350 Вт, опытного — до 320 Вт. Таким образом,

и нагревание обмоток. Другие потери в статическом аппарате трансформатора практически отсутствуют.

Для трансформатора малой мощности характерны определенные особенности, касающиеся потребляемой энергии, внешней характеристики, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности и режима ХХ. На рисунке 6.38 представлены рабочие характеристики трансформатора малой мощности в зависимости от коэффициента нагрузки $\beta = I_2/I_{2н}$.

при эксплуатации трансформатора опытного образца из сети потребляется меньше энергии, чем при функционировании трансформатора серийного образца.

Характеристика падения напряжения $\Delta U = f(\beta)$ для вторичной обмотки связана прямой зависимостью с коэффициентом нагрузки и коэффициентом мощности нагрузки. Последний из них практически равен единице. Вторичный ток создает магнитный поток рассеяния, который, в свою очередь, индуцирует ЭДС рассеяния, создающую падение напряжения на индуктивном сопротивлении вторичной обмотки. Магнитный поток рассеяния для трансформатора серийного образца имеет большую величину по сравнению с магнитным потоком рассеяния для трансформатора опытного образца, в результате падение напряжения на вторичной обмотке трансформатора серийного образца имеет большую величину по сравнению с падением напряжения на вторичной обмотке трансформатора опытного образца. Испытания показали, что падение напряжения на вторичной обмотке в номинальном режиме для трансформатора серийного образца ТБС-2 равно 14,6%, для трансформатора опытного образца — 6,25%. При дальнейшем росте коэффициента нагрузки до $\beta = 2$ падение напряжения снижается для трансформатора серийного образца до 29,2%, для опытного — до 12,5%.

С увеличением коэффициента нагрузки для сравниваемых трансформаторов коэффициент мощности $\cos\varphi = f(\beta)$ возрастает и при ХХ для трансформатора серийного образца ТБС-2, выполненного из электротехнической стали марки 1511, составляет 0,25, а для трансформатора опытного образца, выполненного из спеченного магнитопровода, — 0,32. Для повышения коэффициента мощности следует увеличивать активную нагрузку, при этом $\cos\varphi$ возрастает для обоих трансформаторов и достигает максимального значения 0,64 для трансформаторов серийного образца ТБС-2 и значения 0,83 для трансформатора опытного образца.

При дальнейшем росте коэффициента нагрузки до $\beta = 2 \cos\varphi$ для обоих трансформаторов уменьшается: для трансформатора серийного образца ТБС-2 — до 0,43, для



трансформатора опытного образца — до 0,67. Таким образом, при функционировании трансформатора серийного образца в обмотке больше доминирует реактивная мощность, в обмотке трансформатора опытного образца — активная.

Кривые КПД $\eta = f(\beta)$ для трансформаторов опытного и серийного образцов имеют идентичную форму. В начальный момент КПД равны нулю, так как полезная мощность отсутствует. С увеличением коэффициента нагрузки до $\beta = 0,4$ и по мере роста коэффициента мощности КПД трансформатора растет и в дальнейшем с увеличением коэффициента нагрузки до $\beta = 2$ изменение КПД происходит соответственно изменению коэффициента мощности.

С другой стороны, по мере увеличения коэффициента нагрузки примерно до $\beta = 0,6 \dots 0,8$ КПД обоих трансформаторов повышаются по причине того, что определенная составляющая потерь в стали магнитопровода в энергетическом балансе имеет меньшую величину по сравнению с потерями в обмотке трансформатора. Затем по мере роста коэффициента нагрузки происходит увеличение электрических потерь в обмотке трансформатора пропорционально квадрату тока, в результате чего КПД достигает наибольшей величины при равенстве переменных потерь в обмотке трансформатора и постоянных потерь в стали магнитопровода.

Для трансформатора опытного образца КПД достигает максимального значения раньше и составляет 92%, для трансформатора серийного образца — позднее и составляет 73%. При дальнейшем росте коэффициента нагрузки до $\beta = 2$ КПД снижается для трансформатора опытного образца до 75%, для трансформатора серийного образца — до 58%. Таким образом, при функционировании трансформатор опытного образца имеет меньшие электрические потери по сравнению с серийным.

Сравнительные испытания показали, что для трансформатора опытного образца ток холостого хода в первичной обмотке составляет 0,09 А, для серийного — 0,165 А, так как коэрцитивная сила для опытного образца равна 13 А/м, для серийного — 24 А/м.

В опыте холостого хода определяли потери в стали трансформатора, т. е. потери на гистерезис и вихревые токи. Для трансформатора опытного образца они составляют 6,05 Вт, для серийного — 15,85 Вт. В опыте короткого замыкания определяли в основном тепловые потери в проводах обмоток трансформатора. Для трансформатора опытного образца они составляют 15,63 Вт, для серийного — 23,85 Вт.

Таким образом, исследования показали, что трансформаторы, произведенные по методу порошковой металлургии, обладают рядом преимуществ по сравнению с трансформаторами, изготовленными по базовой технологии: сокращен расход стали (на 21,8%) и меди (на 24%), вдвое снижены удельные потери, рабочая точка магнитной индукции повышена примерно на 0,3 Т.

6.7. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОДНОФАЗНОГО ИНДУКЦИОННОГО СЧЕТЧИКА

Актуальной проблемой современной электротехнической промышленности является замена традиционной прокатанной листовой электротехнической стали серией спеченных порошковых железокремнистых сплавов, составляющих основу электротехнических материалов. Энергетическая стратегия России предусматривает, что главной задачей и направлением энергосбережения должна стать структурно-технологическая перестройка энергоемких отраслей.

Существенный рост тарифов на электрическую энергию стимулирует поиск новых технических решений по снижению энергетической составляющей в калькуляции себестоимости изделий. Решение этой задачи связано с внедрением более эффективных методов, в частности с разработкой инновационных энерго- и ресурсосберегающих технологических процессов.

В настоящее время серийное производство сборных магнитных систем переменного тока от индукционных счетчиков осуществляется из прокатанных листов электротехнических сталей, т. е. сборные магнитопроводы



выполняются шихтованными: набираются из тонких листов электротехнических сталей, контуры, отверстия, выступы и пазы которых получаются путем штамповки на вырубных штампах. Затем производится снятие заусениц, отжиг, изоляция пластин, сборка пакетов и склеивание пластин в пакет [115].

Существуют три очевидные причины, по которым индукционные счетчики требуют модернизации. Первая — уже упомянутый экономический аспект. Вторая — разработка на основе исследования физических свойств магнитных материалов эффективной технологии изготовления. Третья — необходимость улучшения комплекса свойств, характеристик и класса точности изделия.

Для освоения современных изделий нужны магнитные материалы, которые могут быть получены методами порошковой металлургии, интенсивно развивающейся в настоящее время [120]. Новая технология позволяет создавать изделия с высокими физико-механическими свойствами, что невозможно при использовании обычных литейных металлургических процессов [108; 119]. Методы порошковой металлургии позволяют изготавливать эффективные магнитопроводы сложной формы почти без потерь исходного материала при минимальном числе технологических операций и оборудования. Слоистые магнитопроводы могут быть с успехом применены в магнитных системах бытовых электросчетчиков (рис. 6.39).

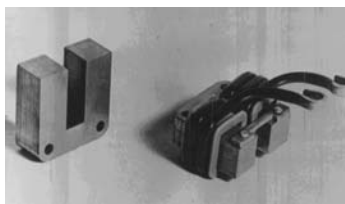


Рис. 6.39
Слоистый магнитопровод (слева) и укомплектованный электромагнит токовой системы индукционного счетчика типа СО-И446 (справа)

В нашей работе учитываются принципы усовершенствованных конструкций индукционных счетчиков [86; 34; 148]. Однако в создании современной конструкции еще не исчерпаны инновационные возможности с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, новой технологии изготовления, экологической чистоты. В частности, при разработке магнитных сис-

тем не учитывается значение структурных дефектов, взаимодействие доменных границ с дислокациями, их влияние на магнитные свойства и удельные потери.

Особенность инновационной технологии состоит в том, что подготовленный железокремнистый порошок подвергают гомогенизирующему отжигу, после чего производят дозирование. Получение спеченных слоистых магнитопроводов включало несколько операций. Сначала в пресс-форму засыпали шихту в количестве, необходимом для получения слоя толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, и производили прессование при соответствующем давлении. Затем на поверхность основного материала аэрозольным напылением наносили диэлектрическую прослойку из марганцовоцинкового феррита толщиной $0,04 \cdot 10^{-3}$ м, после чего выполняли жидкофазное спекание (см. раздел 4.6), ТМО (раздел 4.1) и в завершение процесса — термический отжиг [120].

Многokратные испытания показали, что физической основой для получения наилучших магнитных свойств электротехнических материалов является формирование оптимальной дислокационной и доменной структуры. Дислокации и их группировки возникают в процессе кристаллизации, механической и технологической обработки, при больших скоростях нагрева и охлаждения, а также при облучении ядерными частицами высоких энергий. Для того чтобы освободиться от части подобных структурных дефектов, необходимо уменьшить эти влияния.

Взаимодействие доменной и дислокационной структур не оказывает влияния на магнитную индукцию насыщения, но в большой степени определяет начальную и максимальную магнитную проницаемость и коэрцитивную силу. Магнитная индукция насыщения — это основной магнитный параметр материала, который целиком зависит от его химического состава и не зависит от режима кристаллизации, механических напряжений и облучения частицами высоких энергий. Если начальная магнитная проницаемость в основном незначительно влияет на характеристики электротехнических устройств, то максимальная магнитная проницаемость и коэрцитивная сила играют определяющую роль.

Эксперименты показали, что скорость движения доменных границ с понижением содержания кремния адекватно уменьшается. Чем больше плотность дислокаций и чем меньше содержание кремния в сплаве, тем ниже скорость движения доменных границ.

Скорость перемещения доменов находится в прямой зависимости от подвижности доменных границ. С повышением содержания кремния в сплаве подвижность доменов существенно возрастает. Увеличение подвижности доменов в диапазоне полученных пределов изменения плотности дислокаций коррелирует с близким к нулю значением двух физических констант: постоянной кристаллической магнитной анизотропии и постоянной магнитострикции [52].

Физическая сущность повышения магнитных свойств состоит в том, что дислокации определяют кинематические характеристики движения доменных границ.

Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции для образцов с различным содержанием кремния в кремнистом железе представлена на рисунке 6.40. Для магнитопровода, изготовленного из железокремнистого сплава с содержанием кремния 1,9%, толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, частотой перемагничивания 50 Гц для магнитной индукции 1,0 Тл, удельные потери составляют 1,05 Вт/кг, что в 3,1 раза ниже, чем для тех же параметров горячекатаной стали марки 1211, содержащей примерно 1,9% кремния. Удельные потери для магнитной индукции 1,5 Тл составляют 2,55 Вт/кг, что в 3 раза ниже, чем для тех же параметров горячекатаной стали марки 1211.

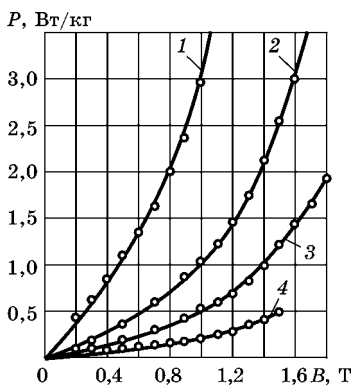


Рис. 6.40

Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции для различных магнитных материалов:

- 1 — Fe; 2 — Fe-1,9% Si; 3 — Fe-4% Si;
4 — Fe-6,5% Si.

Для магнитопровода, изготовленного из железокремнистого сплава с содержанием

ем 4,0% кремния, толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, частотой перемагничивания 50 Гц для магнитной индукции 1,0 Тл, удельные потери составляют 0,52 Вт/кг, что в 2,5 раза ниже, чем для тех же параметров холоднокатаной изотропной стали марки 2411, содержащей примерно 4,0% кремния. Удельные потери для магнитной индукции 1,5 Тл составляют 1,25 Вт/кг, что в 2,48 раза ниже, чем для тех же параметров холоднокатаной изотропной стали марки 2411.

Для магнитопровода, произведенного из железокремнистого сплава с долей кремния 6,5%, толщиной слоев $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, частотой перемагничивания 50 Гц для магнитной индукции 1,0 Тл, удельные потери составляют 0,23 Вт/кг, что в 6,74 раза ниже, чем для тех же параметров горячекатаной стали марки 1511, содержащей примерно 6,5% кремния, удельные потери для магнитной индукции в 1,5 Тл составляют 0,51 Вт/кг, что в 6,86 раза ниже, чем для тех же параметров горячекатаной стали марки 1511.

Для испытания и эксплуатации были выбраны магнитные системы Ш- и П-образной формы как наиболее конструктивные и технологичные. Электромагнит системы напряжения сети расположен по хорде вращающегося диска счетчика, имеет Ш-образную форму следующих номинальных размеров: общая длина — $6,3 \cdot 10^{-3}$ м, общая высота — $50 \cdot 10^{-3}$ м, ширина крайних кернов — $11 \cdot 10^{-3}$ м, ширина среднего керна — $9 \cdot 10^{-3}$ м, ширина основания — $7 \cdot 10^{-3}$ м; в зоне ответвлений имеются два косых зазора под углом 45° по $1 \cdot 10^{-3}$ м на пути прохождения магнитных потоков.

С противоположной стороны диска под Ш-образным магнитом расположен электромагнит токовой системы счетчика с П-образным сердечником следующих номинальных размеров: общая длина — $40 \cdot 10^{-3}$ м, общая высота — $34 \cdot 10^{-3}$ м, ширина каждого керна — $13 \cdot 10^{-3}$ м. Все магнитные системы выполнены одинаковой толщины ($11 \cdot 10^{-3}$ м), имеют 22 слоя, каждый толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Намагничивающие катушки электромагнитов с Ш-образным сердечником имели 10 000 витков провода диаметром $0,14 \cdot 10^{-3}$ м, с П-образным — 14 витков провода с диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Так как величина напряжения сети постоянна, то магнитный поток системы напряжения счетчика также



постоянен. Механический момент счетчика определяется в основном магнитным потоком электромагнита токовой схемы и зависит только от тока нагрузки.

Регулировка индукционного счетчика производится при нагрузках и значениях $\cos\phi$ в соответствии с требованиями ГОСТ 6570-96. Все регулировки взаимосвязаны: регулируя счетчик в одном режиме, дополнительно проводят регулировку при другом. Кривая погрешностей, построенная для всех режимов экспериментально, определяет нагрузочную кривую. Для суждения об эффективности и точности функционирования индукционных счетчиков опытных образцов с магнитными системами, изготовленными из различных материалов, служат их нагрузочные кривые, представленные на рисунке 6.41.

Пунктирной линией показана нагрузочная кривая для серийного образца индукционного счетчика типа СО-И446, магнитная система которого изготовлена из холоднокатаной изотропной стали марки 2412 толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Самую большую погрешность (более 4%) имеет индукционный счетчик с магнитной системой из технического

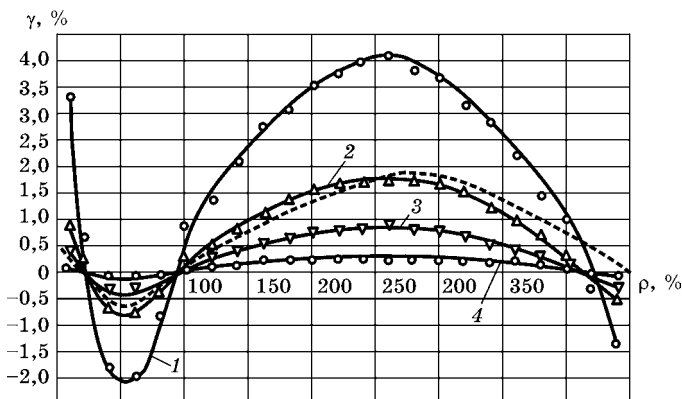


Рис. 6.41

Нагрузочные характеристики опытных индукционных счетчиков для электромагнитов, изготовленных из различных магнитных материалов, и серийного индукционного счетчика (пунктирная линия):

1 — Fe; 2 — Fe-1,9% Si; 3 — Fe-4% Si; 4 — Fe-6,5% Si.

железа (кривая 1). В области малых нагрузок кривая 1 имеет глубоко седлообразный вид, в области больших нагрузок — эллипсообразный.

Нагрузочная характеристика 2 обеспечивает вполне удовлетворительную погрешность 2%, соизмеримую с погрешностью для серийного индукционного счетчика СО-И446. При нагрузочной характеристике 3 погрешность доходит до 1%. Нагрузочная характеристика 4 обеспечивает самую большую точность: погрешность составляет менее 0,5%. В интервале от 0 до 25% погрешность почти нулевая; от 25 до 100% — отрицательная и составляет менее 0,25%. После примерно 100%-ной нагрузки характеристика переходит в положительную область, где максимальная погрешность также не превышает 0,25%. Переход в область отрицательных значений погрешности наступает после нагрузки в 400%.

Кроме индукционных счетчиков, отечественная промышленность выпускает электронные однофазные счетчики типа СОЭ-2Т того же назначения. В таблице 6.6 приведены сравнительные технические характеристики счетчиков электрической энергии.

Таблица 6.6

Сравнительные технические характеристики счетчиков электрической энергии

Тип счетчика	Параметр									
	Номинальное напряжение, В	Ток, А		Класс точности	Мощность			Число тарифов	Масса, кг	Стоимость, руб.
		Номинальный	Максимальный		Активная, Вт	полная, ВА				
						в цепи напряжения	в цепи тока			
С порошковой магнитной системой	220	10	40	0,5	0,6	2,7	0,2	1	1,2	375
С магнитной системой из электротехнической стали типа СО-505	220	10	40	2,0	1,3	5	0,4	1	1,2	465
Электронного типа СОЭ-2Т	220	20	50, 60	1,0, 2,0	2,0	10	2,5	1,2	0,6	930

Индукционные счетчики с магнитными системами, изготовленными по порошковой технологии, имеют малую потребляемую мощность, низкую стоимость и высокий класс точности и могут составить конкуренцию электронным счетчикам, несмотря на функциональные преимущества последних (малая масса, телеметрический выход, одно- или двухтарифный управляемый режим работы).

Индукционные или электронные счетчики аналогичного класса можно использовать в той или иной отрасли с учетом их преимуществ и недостатков.

6.8. СОЗДАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО АППАРАТА С ПОЛЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Электромагнитные механизмы постоянного тока применяются в металлургической промышленности, производстве химических и строительных материалов, энергетических установках, устройствах автоматического привода, схемах управления металлорежущими станками и автоматическими линиями.

Известны конструкции электромагнитных аппаратов со сквозным каналом в магнитопроводе для прохождения охлаждающего агента. В этих аппаратах исполнительные элементы, такие как блок-контакты, и подвижные детали, например скобы и пластины, передающие движение якоря к исполнительному органу, расположены по наружному периметру втягивающей катушки параллельно ее образующей или под углом к ней. Такие электромагнитные аппараты, установленные на панелях низковольтных комплектных устройств, имеют большие размеры, усложняют монтаж и обслуживание в условиях производства и эксплуатации. Электромагниты аппаратов имеют сердечники большого диаметра, что приводит к увеличению потребляемой энергии и, значит, к дополнительному расходу серебра контактов, коммутирующих цепь данной катушки. Такие электромагниты обладают значительной массой и поэтому имеют большую энергоемкость, что обуславливает низкую механическую износостойкость.

Электромагниты с внешним притягивающимся якорем клапанного типа были изготовлены на основе порошковой металлургии. Железосилицистый порошок был получен методом распыления расплава. Порошок фракции $(-56...+40)\cdot 10^{-6}$ м перед прессованием подвергался гомогенизирующему отжигу при температуре $1320...1370$ К в течение 7200 с на гидравлическом прессе 2ПГ-500 при давлении 1100 МПа. Спекание, ТМО и отжиг прессовок производили в камерной вакуумной печи сопротивления типа СНВЛ-1.3.1/16-М2. После того как в процессе термической обработки деталей свойства магнитопроводов были доведены до определенной кондиции, были изготовлены вытягивающие катушки. Обмотки катушек были выполнены из провода ПЭЛ диаметром $(0,27...0,29)\cdot 10^{-3}$ м и имели 14 000 витков и сопротивление 850 Ом.

На рисунках 6.42 и 6.43 представлен предложенный электромагнит с сердечником в виде эллиптического параболоида и усеченного конуса (патент № 2040811 РФ); на рисунке 6.44 — тяговые характеристики опытного и аналогового электромагнитов (КТПВ-624).

Якорь 3 и траверса 5 соединены с помощью шарнира 7. Якорь одним концом поджат к упору 8 возвратной пружиной 9. Скоба 10 служит направляющей траверсы 5 контактного блока 6. Сердечник 2 большим основанием установлен на яреме 4, меньшим обращен к якорю 3. Внутренняя поверхность А и наружная поверхность В сердечника 2 выполнены в виде эллиптических параболоидов (см. рис. 6.42) или усеченных конусов (см. рис. 6.43) Поверхности А и В образуют стенку h переменного по толщине сердечника 2 (сечения m, e, q на рис. 6.42 и 6.43), причем значения m, e, q соответствуют формуле

$$h_{m,e,q} = \sqrt{9,5(d_2/d_1) + 8,3(\Phi_2/\Phi_1)^2}, \quad (6.36)$$

где $h_{m,e,q}$ — толщина стенки в сечениях m, e, q ; d_1 — наружный диаметр верхней части сердечника; d_2 — наружный диаметр основания сердечника; Φ_1 — магнитный поток в верхней части сердечника; Φ_2 — магнитный поток в основании сердечника.

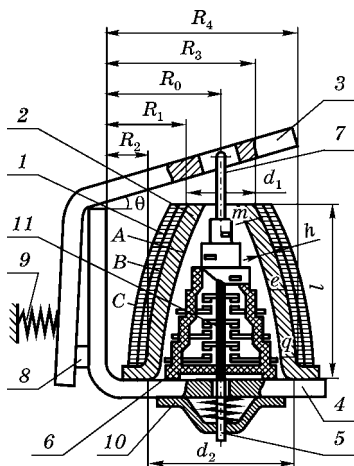


Рис. 6.42

Электромагнит
с сердечником в виде
эллиптического параболоида:

1 — электрическая катушка; 2 — по-
лый сердечник; 3 — якорь; 4 — ярмо;
5 — траверса; 6 — контактный блок;
7 — шарнир; 8 — упор; 9 — возвратная
пружина; 10 — скоба; 11 — контак-
тная пружина; А — внутренняя и В —
наружная поверхности сердечника 2;
С — наружная поверхность катушки 1;
h — стенка сердечника 2.

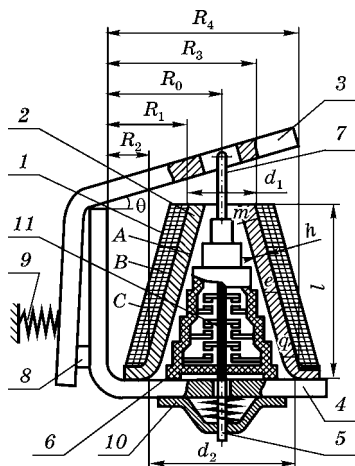


Рис. 6.43

Электромагнит
с сердечником в виде конуса:

1 — электрическая катушка; 2 — по-
лый сердечник; 3 — якорь; 4 — ярмо;
5 — траверса; 6 — контактный блок;
7 — шарнир; 8 — упор; 9 — возвратная
пружина; 10 — скоба; 11 — контак-
тная пружина; А — внутренняя и В —
наружная поверхности сердечника 2;
С — наружная поверхность катушки 1;
h — стенка сердечника 2.

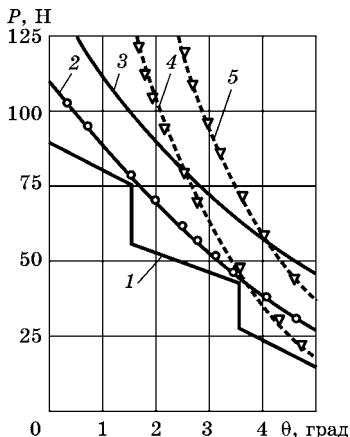


Рис. 6.44

Тяговые характеристики
электромагнита:

1 — результирующая противодейст-
вующая характеристика электромаг-
нита; 2 — электромагнитная характе-
ристика предлагаемого электромагнита
при 0,65 номинальной намагничиваю-
щей силы (НС); 3 — электромагнитная
характеристика предлагаемого элек-
тромагнита при номинальной НС; 4 —
электромагнитная характеристика се-
рийного электромагнита при 0,65 но-
минальной НС; 5 — электромагнитная
характеристика аналогового электро-
магнита при номинальной НС.

Катушка 1 имеет наружную поверхность C , соответствующую по форме наружной поверхности B сердечника (см. рис. 6.42 и 6.43).

Электромагнит с внешним притягивающимся якорем работает следующим образом. При подаче на катушку 1 напряжения в ней появится ток, который в сердечнике создает магнитный поток. При прохождении через рабочий зазор магнитный поток создает тяговую электромагнитную силу, достаточную для преодоления усилия возвратной 9 и контактной 11 пружин. Якорь 3, сжимая возвратную пружину 9, одновременно воздействует через траверсу 5 на контактный блок 6, замыкая или размыкая неподвижные контакты контактного блока. В начальный момент трогания якоря 3 магнитный поток в верхней части сердечника 2 имеет меньшее значение, чем в средней части, но он достаточен для того, чтобы тяговая характеристика 2 проходила выше противодействующей характеристики 1 (рис. 6.44). Затем происходит перераспределение рабочего магнитного потока и магнитного потока рассеяния. В процессе притягивания якоря к сердечнику магнитный поток верхней части сердечника увеличивается быстрее, чем средней, за счет большего снижения магнитного потока рассеяния по сравнению с заводским электромагнитом. Это приводит к тому, что магнитная индукция в верхней части сердечника становится больше магнитной индукции в средней части (толщина стенки $m < e$) и, следовательно, тяговая характеристика 2 приближается к расчетной противодействующей характеристике 1, проходя намного ниже тяговой характеристики 4 заводского электромагнита. Магнитный поток в основании сердечника увеличивается меньше, чем магнитный поток в средней части, и рабочая точка находится на прямолинейном участке кривой намагничивания, не доходя до колена кривой. Это приводит к тому, что магнитная индукция в основании сердечника становится меньше магнитной индукции в средней части (толщина стенки $q > e$). Таким образом, если в начале хода якоря тяговая характеристика предлагаемого электромагнита 2 проходит выше тяговой характеристики заводского электромагнита 4,

то в конце хода якоря, наоборот, тяговая характеристика предлагаемого электромагнита 2 проходит намного ниже тяговой характеристики серийного электромагнита 4.

В предлагаемом электромагните при уменьшении имеющихся резервов по тяговой характеристике и расположении рабочей точки магнитной индукции на кривой намагничивания $B = f(H)$ в пределах прямолинейного участка получается оптимальная форма сердечника.

Магнитная проводимость рабочего воздушного зазора (между якорем и кольцевым полюсом сердечника):

$$G = \frac{2\mu_0\pi}{\theta} \ln \frac{R_4}{R_3} (R_0 - \sqrt{R_1 R_2}), \quad (6.37)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; θ — угол поворота якоря; R_0 — расстояние от ярма до оси симметрии сердечника; R_1 — расстояние от ярма до ближнего края верхней части сердечника; R_2 — расстояние от ярма до ближнего края нижней части сердечника; R_3 — расстояние от ярма до дальнего края верхней части сердечника; R_4 — расстояние от ярма до дальнего края нижней части сердечника.

Удельная магнитная проводимость для потоков рассеяния предлагаемого электромагнита составляет $4,125 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, в то время как удельная магнитная проводимость для потоков рассеяния серийного электромагнита — $6,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, т. е. более чем в 1,5 раза выше, чем у предлагаемого электромагнита.

Сечение сердечника на расстоянии x от основания определяется как отношение магнитного потока в этом сечении к магнитной индукции:

$$S_x = \frac{\Phi_\delta}{B} + \frac{Iw}{2Bl} \lambda (l^2 - x^2), \quad (6.38)$$

где Φ_δ — магнитный поток в рабочем зазоре; B — магнитная индукция; I — ток в катушке; w — число витков катушки; l — высота сердечника; λ — магнитная проводимость стали.

Сечение сердечника в его основании получим, положив $x = 0$:

$$S_0 = \frac{\Phi_\delta}{B} + \frac{Iw\lambda l}{2B}. \quad (6.39)$$

Сила тяги электромагнита определяется следующим выражением:

$$P = - \frac{0,5 I^2 w^2 dG}{d\delta},$$

где $G = \frac{\mu_0 S \delta}{2\delta}$ — магнитная проводимость рабочего воздушного зазора; δ — рабочий воздушный зазор.

Если известна зависимость $G = f(\delta)$, то $dG/d\delta$ определяется аналитически.

Испытания электромагнитов проводились на контакторах, для которых был изготовлен комплект сердечников. Четкое втягивание контактора определялось при подаче напряжения на катушку толчком. Значения напряжения втягивания, трогания, отпадания и втягивания без ступеньки определялись при плавной регулировке.

Результаты испытаний контактора приведены в таблице 6.7.

Таблица 6.7

Параметры срабатывания контактора с полым сердечником

Номер варианта сердечника	$d_{1в}/d_{1н}$	$d_{2в}/d_{2н}$	Напряжение срабатывания, В					Масса сердечника, кг	Собственное время, с	
			втягивания	отпадания	трогания	втягивания без ступеньки	четкого втягивания		втягивания	отпадания
1	0/54	0/54	142	6	61	155	187	2,29	0,278	0,115
2	20/44	30/54	125	22	77	138	163	0,915	0,209	0,041
3	18/42	30/54	122	27	82,5	135	158	0,82	0,195	0,032
4	16/40	30/54	118	35	88	131	155	0,73	0,184	0,026
5	14/38	30/54	116	43	97	129	152	0,64	0,170	0,021
6	12/36	30/54	113	53	106	126	149	0,56	0,167	0,015
7	10/34	30/54	128	61	117	143	167	0,49	0,155	0,012
8	8/32	30/54	153	82	132	167	208	0,42	0,142	0,009

Примечания. 1. Вариант 1 — заводской конструкции; варианты 2..8 — предлагаемой конструкции. 2. $d_{1в}/d_{1н}$ — внутренний и наружный диаметры верхней части сердечника. 3. $d_{2в}/d_{2н}$ — внутренний и наружный диаметры нижней части сердечника. 4. Измерения собственного времени втягивания и отпадания производились при подаче на катушку напряжения, равного $0,65U_{ном}$ (143 В).



Из таблицы 6.7 видно, что с уменьшением внутреннего и наружного диаметров верхней части сердечника напряжения втягивания, втягивания без ступеньки, четкого втягивания для сердечников вариантов 2...5 уменьшаются, достигая наименьшего значения для сердечника варианта 6, а затем увеличиваются, достигая наибольшего значения для сердечника варианта 8. Это связано с тем, что внешняя боковая поверхность сердечника все более отдаляется от ярма магнитопровода, постепенно увеличивая магнитное сопротивление, что приводит к уменьшению магнитного потока. Кроме того, с уменьшением внутреннего и наружного диаметров верхней части сердечника напряжения отпадания и трогания увеличиваются, начиная от сердечника варианта 2 и до сердечника варианта 8. При увеличении напряжения отпадания вероятность залипания якоря к сердечнику уменьшается, в результате чего механическая износостойкость контактора для сердечника варианта 6 увеличивается до 32...35 млн циклов ВО, в то время как в заводском варианте якорь залипает через 4...5 млн циклов ВО. По ГОСТ 11206-83 контактор должен срабатывать при напряжении $0,65U_{\text{ном}}$. Этому параметру удовлетворяют контакторы, сердечники которых относятся к вариантам 2...7, в то время как сердечник варианта 8 не удовлетворяет требованиям ГОСТ 11206-83 по этому параметру. С уменьшением внутреннего и наружного диаметров верхней части сердечника его масса уменьшается, в результате чего сокращается собственное время втягивания и отпадания.

В испытываемых магнитных системах измерялись магнитные потоки у основания сердечника и под полюсным наконечником при подаче на катушку номинального напряжения $U_{\text{ном}}$ и $0,65U_{\text{ном}}$ в двух положениях якоря: замкнутом и разомкнутом. Результаты измерений магнитных потоков и вычисленные по ним значения магнитных индукций для разомкнутого и замкнутого положений якоря приведены соответственно в таблицах 6.8 и 6.9.

Из таблицы 6.8 видно, что для разомкнутого состояния магнитной системы с уменьшением внутреннего и наружного диаметров сердечника магнитный поток в его

верхней части вначале увеличивается с большим интервалом для вариантов 2...5, а затем его увеличение постепенно замедляется, достигая наименьшего значения в сердечнике варианта 8. Это связано с тем, что в первоначальный момент в контакторе рост магнитного сопротивления между внешней боковой поверхностью сердечника и ярмом магнитопровода происходит быстрее, что приводит к быстрому уменьшению магнитного потока рассеяния и соответственно к быстрому увеличению рабочего магнитного потока. Затем наступает насыщение сердечника, которое все более доминирует над увеличением сопротивления магнитному потоку рассеяния, препятствуя быстрому увеличению рабочего магнитного потока. В нижней части сердечника рабочий магнитный поток возрастает незначительно.

В таблице 6.8 представлены также магнитные потоки для втягивающей катушки, рассчитанной на напряжение 220 В, но измеренные при напряжении 143 В. В этом режиме с уменьшением внутреннего и наружного диаметров верхней части сердечника магнитный поток как в верхней его части, так и в нижней постепенно увеличивается. В сердечнике варианта 6 магнитная индукция в верхней и нижней его частях имеет одинаковое значение. Рабочая точка находится на прямолинейном участке кривой намагничивания при питании катушки как напряжением 143 В, так и напряжением 220 В.

Из таблицы 6.9 видно, что при замкнутом состоянии магнитной системы с уменьшением внутреннего и наружного диаметров верхней части сердечника магнитный поток в его верхней части постепенно увеличивается, достигая наибольшего значения в сердечнике варианта 6, а затем уменьшается, достигая наименьшего значения в сердечнике варианта 8. Это связано с тем, что вначале контактор имеет малое магнитное сопротивление между внешней боковой поверхностью сердечника и ярмом магнитопровода, что определяет большой магнитный поток рассеяния и малый рабочий магнитный поток. В какой-то момент, когда только наступает насыщение сердечника, рабочий магнитный поток для сердечника варианта 6 имеет наибольшее значение. В дальнейшем, когда сопротивление

Разомкнутое состояние

Вариант сердечника	$d_{1н}/d_{1н}$	$d_{2н}/d_{2н}$	$U_{кат} = 220 В$		
			$\Phi, 10^{-4} Вб$	k_p	$S, 10^{-4} м^2$
1	0/54	0/54	8,03/20,4	2,54	22,9/22,9
2	20/44	30/54	10,36/20,4	1,96	12,06/15,83
3	18/42	30/54	10,82/20,4	1,88	11,3/15,83
4	16/40	30/54	11,26/20,4	1,81	10,55/15,83
5	14/38	30/54	11,62/20,5	1,76	9,80/15,83
6	12/36	30/54	11,96/20,6	1,72	9,04/15,83
7	10/34	30/54	12,14/20,7	1,70	8,29/15,83
8	8/32	30/54	12,30/20,8	1,68	7,54/15,83

Примечания. 1. Высота сердечника электромагнита составляет $128 \cdot 10^{-3}$ м. 2. k_p — коэффициент рассеяния магнитного потока. 3. На катушку, выпол-

Замкнутое состояние

Вариант сердечника	$d_{1н}/d_{1н}$	$d_{2н}/d_{2н}$	$U_{кат} = 220 В$		
			$\Phi, 10^{-4} Вб$	k_p	$S, 10^{-4} м^2$
1	0/54	0/54	13,3/22,5	1,69	22,9/22,9
2	20/44	30/54	14,8/22,5	1,52	12,06/15,83
3	18/42	30/54	15,1/22,4	1,48	11,3/15,83
4	16/40	30/54	15,2/22,4	1,47	10,55/15,83
5	14/38	30/54	16,6/22,4	1,44	9,80/15,83
6	12/36	30/54	15,8/22,4	1,42	9,04/15,83
7	10/34	30/54	15,3/22,4	1,46	8,29/15,83
8	8/32	30/54	13,9/22,4	1,61	7,54/15,83

между внешней боковой поверхностью сердечника и ярмом магнитопровода становится больше и еще увеличивается, рабочий магнитный поток для сердечника варианта 7 уменьшается из-за его глубокого насыщения, и далее, для сердечника варианта 8, рабочий магнитный поток уменьшается еще больше. В нижней части сердечника магнитный поток почти не изменяется.

При подаче на катушку напряжения 143 В с уменьшением внутреннего и наружного диаметров верхней части сердечника магнитный поток в его верхней части постепенно увеличивается, достигая наибольшего значения в

Таблица 6.8

магнитной системы

		$U_{\text{кат}} = 143 \text{ В}$			
	$B, \text{ Т}$	$\Phi, 10^{-4} \text{ Вб}$	k_p	$S, 10^{-4} \text{ м}^2$	$B, \text{ Т}$
	0,35/0,89	5,9/14,3	2,42	22,9/22,9	0,26/0,62
	0,86/1,29	7,13/14,2	1,99	12,06/15,83	0,59/0,90
	0,96/1,29	7,54/14,4	1,91	11,3/15,83	0,67/0,91
	1,07/1,29	7,93/14,6	1,84	10,55/15,83	0,75/0,92
	1,19/1,29	8,26/14,8	1,79	9,80/15,83	0,84/0,93
	1,30/1,30	8,53/14,9	1,75	9,04/15,83	0,94/0,94
	1,46/1,31	8,80/15,1	1,72	8,29/15,83	1,06/0,95
	0,86/1,31	9,05/15,3	1,69	7,54/15,83	1,20/0,97

ненную на напряжение 220 В, подавалось напряжение 143 В ($0,65U_{\text{ном}}$).

4. S — площадь сечения сердечника.

Таблица 6.9

магнитной системы

		$U_{\text{кат}} = 143 \text{ В}$			
	$B, \text{ Т}$	$\Phi, 10^{-4} \text{ Вб}$	k_p	$S, 10^{-4} \text{ м}^2$	$B, \text{ Т}$
	0,58/0,98	11,1/17,6	1,59	22,9/22,9	0,48/0,77
	1,23/1,42	12,5/17,7	1,42	12,06/15,83	1,04/1,12
	1,34/1,41	13,1/17,9	1,37	11,3/15,83	1,16/1,30
	1,44/1,41	13,3/17,7	1,33	10,55/15,83	1,26/1,12
	1,59/1,41	13,4/17,5	1,31	9,80/15,83	1,37/1,10
	1,75/1,41	13,7/17,5	1,28	9,04/15,83	1,51/1,10
	1,84/1,41	13,8/17,5	1,27	8,29/15,83	1,66/1,10
	1,84/1,41	13,5/17,5	1,30	7,54/15,83	1,79/1,10

сердечнике варианта 7, затем уменьшается. В этом режиме магнитный поток в его нижней части претерпевает небольшие изменения, вначале монотонно увеличиваясь к сердечнику варианта 3, затем монотонно уменьшаясь к сердечнику варианта 5, после чего продолжает оставаться на том же уровне в сердечниках вариантов 6...8.

Предлагаемая конструкция и технология изготовления позволяют сократить расход стали и меди, снизить энергоёмкость устройства, увеличить механическую износостойкость и магнитный поток и в конечном итоге уменьшить габариты электромагнитного аппарата.

Итак, исследования показали, что новая конструкция электромагнита с внешним поворотным якорем клапанного типа имеет высокие технические параметры. Посредством управляемой инновационной технологии изготовления электромагнитов формируются лучшие физико-магнитные свойства.

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Какова оптимальная геометрическая форма сердечника электромагнита постоянного тока с внешним поворотным якорем клапанного типа?
2. Перечислите комплекс положительных характеристик, приводящих к смене цилиндрического сердечника на оптимальную геометрическую форму сердечника в электромагните постоянного тока с внешним поворотным якорем клапанного типа.
3. С какой целью в электромагнитном механизме переменного тока с Ш-образным сердечником используется призматический шунт переменного сечения?
4. Какие энерго- и ресурсосберегающие показатели повышаются при использовании новой конструкции ротора синхронного двигателя?
5. За счет какой характеристики в индукционном счетчике электрической энергии можно снизить погрешность (повысить класс точности)?
6. Почему трансформатор, в отличие от электрической машины, не имеет механических потерь?
7. С какой целью в электромагните постоянного тока с внешним поворотным якорем клапанного типа применяется полый сердечник?
8. Вычислите намагничивающую силу вдоль замкнутой кольцевой магнитной цепи по формуле

$$IW = \varphi l_{\text{фер}} / \mu_a S,$$

где $\varphi = 0,7 \cdot 10^{-4}$, $l = 88 \cdot 10^{-3}$ м, $S = 45 \cdot 10^{-4}$ м², $\mu_a = 900$.

9. Вычислите тяговое усиление электромагнита постоянного тока с внешним поворотным якорем клапанного типа по формуле Максвелла

$$F = \varphi^2 / (2S\mu_0),$$

где $\varphi = 0,5 \cdot 10^{-4}$ Вδ, $S = 0,7$ м², $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

10. Какие процессы происходят при перемагничивании сплава Fe-Si?

ПРИЛОЖЕНИЯ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИСТОВАЯ И ЛЕНТОЧНАЯ СТАЛЬ

До настоящего времени изготовление различной электрометаллургической продукции было основано на промышленном производстве следующих видов электротехнической стали: холоднокатаной анизотропной тонколистовой (ГОСТ 21427.1-75), холоднокатаной изотропной тонколистовой (ГОСТ 21427.2-75), горячекатаной тонколистовой (ГОСТ 21427.3-75), ленты холоднокатаной анизотропной (ГОСТ 21427.4-78). По государственному стандарту эти материалы называются электротехническими сталями, являются основными магнитомягкими материалами массового потребления и применяются в электротехнических изделиях и в энергетическом машиностроении.

В соответствии с классификацией электротехнических сталей по ГОСТ 21427.1-75, ГОСТ 21427.3-75 приводим комплекс магнитных свойств горячекатаной и холоднокатаной изотропной электротехнических сталей различных марок (табл. П.1) и холоднокатаной анизотропной стали (см. табл. П.2). Основными критериями, положенными в основу систем маркировки стали, являются: ее химический состав; механические свойства (предел прочности); порядковый номер с обозначением группы сталей, исходя из области ее применения; комбинация указанных признаков.

Обозначение марки стали состоит из четырех цифр и одной-двух букв и расшифровывается следующим образом:

а) по структурному состоянию и виду прокатки стали делятся на классы (первая цифра марки): 1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой;

б) по содержанию кремния (вторая цифра марки) различают: 0 — с содержанием кремния по 0,4% включительно (нелегированная); 1 — свыше 0,4 по 0,8%; 2 — свыше 0,8 по 1,8%; 3 — свыше 1,8 по 2,8%; 4 — свыше 2,8 до 3,8% включительно; 5 — свыше 3,8 по 4,8% включительно;

в) по основной нормируемой характеристике (третья цифра марки): 0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$); 1 — при 1,5 Тл и 50 Гц ($P_{1,5/50}$); 2 — при 1,0 Тл и 400 Гц ($P_{1,0/400}$); 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при 10 А/м (B_{10});

г) по порядковому номеру типа стали и уровню основной нормируемой характеристики (четвертая цифра марки): 1 — нормальный; 2 — повышенный; 3 — высокий; 4...6 — более высокие уровни. В стали 8-го типа 4-я и 5-я цифры показывают целые значения H_c , А/м.

Таблица П.1

**Магнитные свойства электротехнической тонколистовой
горячекатаной и холоднокатаной изотропной стали
(ГОСТ 21427.3-75, ГОСТ 21427.2-75)**

Мар-ка стали	Тол-щина листа, мм	Магнитная индукция B , Тл, при напряженности магнитного поля H , кА/м					Удельные потери, Вт/кг (не более)		P , мкОм·м
		B_1	$B_{2,5}$	B_5	B_{10}	B_{30}	$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	
Горячекатаная сталь									
1211	1,0	—	1,53	1,63	1,76	2,00	5,8	13,4	0,25
1212	1,0	—	1,53	1,62	1,76	2,00	5,4	12,5	0,25
1211	0,50	—	1,53	1,64	1,76	2,00	3,3	7,7	0,25
1212	0,50	—	1,50	1,62	1,75	1,98	3,1	7,2	0,25
1213	0,50	—	1,50	1,62	1,75	1,98	2,8	6,5	0,25
1311	0,50	—	1,48	1,59	1,73	1,95	2,5	6,1	0,4
1312	0,50	—	1,48	1,59	1,73	1,95	2,2	5,3	0,4
1411	0,50	—	1,46	1,57	1,72	1,94	2,0	4,4	0,5
1412	0,50	—	1,46	1,57	1,71	1,92	1,8	3,9	0,5
1411	0,35	—	1,46	1,57	1,71	1,92	1,6	3,6	0,5
1412	0,35	—	1,46	1,57	1,71	1,92	1,4	3,2	0,5
1511	0,50	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90	1,55	3,5	0,6
1512	0,50	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	1,4	3,1	0,6
1513	0,50	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,25	2,9	0,5
1514	0,50	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,15	2,7	0,6
1511	0,35	1,30	1,46	1,57	1,7	1,9	1,35	3,0	0,6
1512	0,35	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	1,2	2,8	0,6
1513	0,35	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,05	2,5	0,6
1514	0,35	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	0,9	2,2	0,6
Холоднокатаная изотропная сталь									
2111	0,65	1,48	1,60	1,70	1,80	2,02	3,8	9,0	0,17
2112	0,50	1,49	1,60	1,70	1,80	2,02	3,5	8,0	0,17
2211	0,50	1,38	1,54	1,64	1,74	1,96	1,9	4,4	0,25
2411	0,50	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95	1,3	3,1	0,5
2412	0,35	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95	1,15	2,5	0,5

Таблица П.2

**Магнитные свойства электротехнической тонколистовой
холоднокатаной анизотропной стали (ГОСТ 21427.1-75)**

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, А/м		
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	2500
3411	0,50	1,10	2,45	3,20	—	—	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	—	—	1,75
3412	0,50	0,95	2,10	2,80	—	—	1,85
	0,35	0,70	1,50	2,20	—	—	1,80
3413	0,50	0,80	1,75	2,50	—	—	1,85
	0,35	0,60	1,30	1,90	—	—	1,85
	0,30	—	1,19	1,75	—	—	1,85
3414	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88
	0,30	—	1,03	1,50	1,60	1,70	1,88
	0,28	—	1,05	1,55	—	—	1,85
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	1,90
	0,30	—	0,97	1,40	1,61	1,71	1,90
	0,28	—	0,95	1,38	1,61	1,71	1,90
3416	0,28	—	0,89	1,30	1,61	1,70	1,90

Первые три цифры вместе обозначают тип стали, четвертая — уровень основной нормируемой характеристики.

Сталь поставляется с незащищенной металлической поверхностью или с электроизоляционным покрытием. Термостойкость покрытия обозначается в марке буквой «Т», улучшение штампуемости стали — буквой «Ш», нетермостойкое покрытие — буквой «Н».

Лента холоднокатаная анизотропная применяется для изготовления электромагнитных тороидальных сердечников. В соответствии с классификацией стали по ГОСТ 21427.4-78 данной ленте холоднокатаной анизотропной из электротехнической стали присваивают марки 3421...3425 (табл. П.3).

В зависимости от значения рабочей частоты сердечников выбирают толщину проката. При использовании в технике частоты 400 Гц рекомендуется применять холоднокатаную анизотропную ленту толщиной 0,15 мм, при частотах в пределах

400...1000 Гц выбирают более тонкую ленту толщиной 0,08 мм, при частотах в пределах 1000...3000 Гц — еще более тонкую ленту толщиной 0,05 мм.

Сталь подразделяют:

1) по термической обработке:

а) на термически обработанную (ТО);

б) без термической обработки (нагартованную) (БТО).

2) по виду покрытий:

а) с термостойким электроизоляционным покрытием (ЭТ);

б) без покрытия (БП).

Таблица П.3

Магнитные свойства электротехнической ленточной стали (ГОСТ 21427.4-78)

Марка	Толщина, мм	Удельные потери		Коэффициентная сила H_c , А/м, не более	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м, не менее					
		$P_{1,0/100}$	$P_{1,5/100}$		B_{10}	B_{50}	B_{200}	B_{400}	B_{1000}	B_{1500}
3421	0,20	—	—	0,28	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70
	0,15	10,0	23,0	0,34	0,50	0,80	1,10	1,30	1,45	1,70
	0,08	10,0	22,0	0,36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
	0,05	10,0	21,0	0,36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
3422	0,15	9,0	20,0	0,32	0,60	0,95	1,25	1,40	1,55	1,75
	0,08	8,5	19,0	0,32	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
	0,05	8,5	19,0	0,36	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
3423	0,15	8,0	19,0	0,26	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	7,5	17,0	0,28	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
3423	0,05	—	17,0	—	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
3424	0,15	—	18,0	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	—	16,0	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,05	7,5	16,0	0,32	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
3425	0,15	—	17,0	—	1,10	1,35	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,08	—	15,0	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,05	—	15,0	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
		$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$							
3411	0,20	1,5	2,2	0,28	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70



Пример условного обозначения ленты толщиной 0,05 мм, шириной 10 мм, термически обработанной (ТО), с термостойким электроизоляционным покрытием (ЭТ), из стали марки 3422: лента 0,05×10-ТО-ЭТ-3422 ГОСТ 21427.4-78.

Технологический процесс изготовления электротехнических изделий обычно включает следующие основные операции: штамповку пластин или резку ленты, рихтовку пластин или снятие заусениц, электроизоляционное покрытие между пластинами или витками ленты, сборку листов в пакеты или навивку сердечника.

После механических операций производят отжиг сердечника. Применяют три вида отжига: в контейнерах (защитных ящиках), в водороде и в вакууме. Последний процесс наиболее простой и предпочтительный.

Стандартный режим отжига для электротехнических сталей следующий: вначале производится нагрев в вакууме до 720...780°C, затем следует выдержка при температуре нагрева в течение 1...1,5 ч, далее осуществляют охлаждение в вакууме до 200...250°C со скоростью не более 50°C в час. После этого охлаждение ведут на воздухе.

Режим отжига зависит от марки стали, формы и размеров изделий. Незначительным отклонением режима отжига добиваются изменения тех или иных характеристик материала.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТОПРОВОДА
ИЗ СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

1. Назначение.

1.1. Настоящая инструкция устанавливает технологический процесс термической обработки деталей магнитопроводов из спеченных материалов.

1.2. Отжиг применяется в целях снятия внутренних напряжений, возникающих в процессе механической обработки, восстановления и улучшения магнитных свойств материала.

1.3. Инструкция предназначена для технологов, конструкторов, разрабатывающих и изготавливающих электромагнитные элементы электрических машин, приборов и аппаратов.

2. Оборудование и приспособления.

2.1. Вакуумные электропечи типов СНВЛ-1.3.1/16М2, СЭВ2,5/203, «Отжиг 1» либо другие аналогичные электропечи с форвакуумными или паромасляными насосами, обеспечивающие рабочую температуру не ниже 1720 К и вакуум не ниже $133,32 \cdot 10^{-3}$ Па.

2.2. Стальные коробки или титановые контейнеры.

2.3. Термостат или сушильный шкаф с температурой не ниже 370...420 К.

2.4. Ванночка для бензина.

2.5. Резиновые перчатки.

3. Материалы.

3.1. Титановые перегородки под размер контейнера для изоляции одного ряда деталей от другого. Бензин марки БР-1 (ГОСТ 443-86) или Б-70 (ГОСТ 1012-84). Проволока нихромовая ГОСТ 8803-88.

4. Контрольно-измерительная аппаратура.

4.1. Потенциометр постоянного тока типа П-63 ГОСТ 9245-88.

4.2. Вакуумметр ВТ-2А или ВИТ-1-А.

4.3. Баллистическая установка для определения магнитных свойств типа БУ-3.

4.4. Электронный ваттметр Ф-530.

5. Приемка, выдача материалов в производство и подготовка деталей к термообработке.

5.1. Материалы, применяемые для изготовления, принимаются в производство только при наличии сертификатов или копий с них на каждую поступающую партию.

5.2. Детали должны быть без заусенцев, очищены от грязи, ржавчины. При наличии жировых пятен обезжиривание производится обработкой водными растворами в ультразвуковом поле или промывкой в бензине до исчезновения пятен.



5.3. Детали сушить на воздухе либо в струе сжатого воздуха с последующей сушкой в термостате или сушильном шкафу при температуре 350...370 К в течение 3600 с (не менее).

5.4. Укладка деталей в сушильном шкафу или термостате должна обеспечивать свободную циркуляцию воздуха между деталями.

5.5. После просушки детали вынуть и охладить на воздухе до комнатной температуры.

5.6. Технологическому контролю на каждую принятую партию открыть паспорт (форма не устанавливается) и отправить партию на отжиг.

6. Технологический процесс.

6.1. Детали подвергнуть термическому оксидированию или лакированию.

6.2. При необходимости детали обезжирить в бензине, высушить на воздухе до полного высыхания. Промывать следует в резиновых перчатках во избежание попадания на детали жира с рук.

6.3. Термическую обработку деталей производить в пакетах высотой до $(60...70) \cdot 10^{-3}$ м.

6.4. Детали, собранные в пакеты, уложить в тщательно промытые и просушенные контейнеры. Приспособления с размещенными на них деталями установить в контейнеры в вертикальном положении. Одновременно с каждой партией деталей термически обработать контрольные образцы из той же партии металла. Контрольный образец представляет собой пакет спрессованных колец размером $33 \times 27 \times 5 \cdot 10^{-3}$ м или полоски размером $280 \times 30 \cdot 10^{-6}$ м массой 1 кг (0,5 кг вырезанных вдоль прокатки + 0,5 кг вырезанных поперек прокатки).

6.5. Подготовленный контейнер погрузить в печь при комнатной температуре. Закрывать люк печи.

6.6. Произвести откачку воздуха и довести вакуум до $(133,32...13,332) \cdot 10^{-2}$ Па.

6.7. Произвести нагрев печи с произвольной скоростью до температуры 1650...1690 К при непрерывном откачивании воздуха.

6.8. Выдержать детали при температуре 1650...1690 К в течение 600...900 с в зависимости от массы детали.

6.9. Охладить детали вместе с печью со скоростью 0,1...0,11 К/с при непрерывном поддержании вакуума $(133,32...13,332) \cdot 10^{-2}$ Па до температуры 1170...1110 К, после чего охладить до температуры 970...910 К со скоростью 0,08...0,09 К/с. Дальнейшее охлаждение до температуры 370...290 К производить со скоростью 390...420 К/с.

6.10. При температуре 370...290 К впустить в печь воздух.

6.11. Открыть люк печи.

6.12. Выгрузить из печи контейнер с деталями.

6.13. Охладить контейнер с деталями до температуры окружающей среды.

6.14. Выгрузить детали из контейнера и передать на контроль. Не разрешается охлаждать детали в интервале от 1110...1170 К до 910...970 К со скоростью 0,08...0,09 К/с.

7. *Контроль.*

7.1. Все стадии термообработки должны быть зафиксированы в журнале и сверены с диаграммами самописца.

7.2. Режим отжига деталей контролировать по показаниям терморегистрирующих приборов. Детали после отжига подвергаются внешнему осмотру для выявления поверхностных дефектов. Вмятины, отслоения и прогибы не допускаются. Допустимы цвета побежалости, но не наличие окалины.

7.3. Контроль магнитных свойств производить на контрольных образцах по ГОСТ 12119-86.

7.4. При транспортировке, загрузке и выгрузке ударные воздействия на детали (броски, встряхивания, механические удары) недопустимы. В случае получения неудовлетворительных свойств допускается повторный отжиг.

8. *Техника безопасности.*

8.1. К работе на установке допускаются лица, прошедшие инструктаж, обучение на рабочем месте и имеющие группу электробезопасности не ниже второй.

8.2. При первичном монтаже печи и ежедневно перед включением путем наружного осмотра проверять исправность защитного зануления, монтажа и органов управления.

8.3. Во избежание термических ожогов проверку охлаждения производить без выемки из контейнера путем касания детали мокрой тканью; при отсутствии испарения — пальцем через мокрую ткань.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрикосов, А. А.* Методы квантовой теории поля в статистической физике / А. А. Абрикосов, Л. П. Горьков, И. Е. Дзялошинский. — М. : Физматгиз, 1962. — 475 с.
2. *Абрикосов, А. А.* Основы теории металлов. — М. : Наука, 1987. — 520 с.
3. *Адам, Н. К.* Физика и химия поверхностей : пер. с англ. — М. : Изд-во ин. лит., 1947. — 173 с.
4. *Айзенкольт, Ф.* Успехи порошковой металлургии : пер. с нем. — М. : Металлургия, 1969. — 325 с.
5. *Аксенов, Г. И.* Основы порошковой металлургии. — Куйбышев : Куйбышевское книжное издательство, 1962. — 296 с.
6. *Акулов, Н. С.* Ферромагнетизм. — М. ; Л. : ОНТИ, 1939. — 282 с.
7. *Альтман, А. Б.* Металлокерамика в электропромышленности. — М. : ЦНТИ, 1961. — 123 с.
8. *Альтман, А. Б.* Электротехнические металлокерамические изделия / А. Б. Альтман [и др.] — М. : Информэлектро, 1972. — 175 с.
9. *Альтман, А. Б.* Электротехнические металлокерамические изделия. — М. : Изд-во ЦБТИ НИИ Электропромышленности, 1959. — 211 с.
10. *Амелинкс, С.* Методы прямого наблюдения дислокаций. — М. : Мир, 1968. — 440 с.
11. *Аркадьев, В. К.* Электромагнитные процессы в металлах. — М. : ОНТИ. — Т. I. — 1934. — Т. II. — 1936.
12. *Архаров, В. И.* Окисление металлов. — М. : Металлургия, 1945. — 183 с.
13. *Астафьев, В. Е.* Экономика электротехнической промышленности / В. Е. Астафьев [и др.] — М. : Энергия, 1975. — 247 с.
14. *Балбашов, А. М.* Магнитные материалы для микроэлектроники / А. М. Балбашов, А. Я. Червоненкис. — М. : Энергия, 1979. — 236 с.
15. *Бальшин, М. Ю.* Порошковая металлургия. — М. : Mashizdat, 1948. — 252 с.
16. *Бальшин, М. Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. — М. : Металлургия, 1972. — 213 с.
17. *Баннх, О. А.* Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа : справочник / О. А. Баннх, М. Е. Дриц. — М. : Металлургия, 1986. — 413 с.
18. *Белов, К. П.* Магнитные превращения. — М. : Физматиздат, 1959. — 238 с.
19. *Блантер, М. Е.* Фазовые превращения при керамической обработке стали. — М. : Metallurgizdat, 1962. — 432 с.



20. *Богатин, Д. Е.* Производство металлокерамических деталей. — М. : Металлургия, 1968. — 213 с.
21. *Бодяко, М. Н.* Термокинетика рекристаллизации / М. Н. Бодяко, С. А. Астапчик, Г. Б. Ярошевич. — Минск : Наука и техника, 1968. — 315 с.
22. *Бозорт, Р.* Ферромагнетизм. — М. : Изд-во ин. лит., 1956. — 522 с.
23. *Буль, Б. К.* Основы теории и расчета магнитных цепей. — М. : Энергия, 1964. — 352 с.
24. *Буль, Б. К.* Основы теории электрических аппаратов / Б. К. Буль, Г. В. Буткевич, А. Г. Годжелло // под ред. Г. В. Буткевича. — М. : Высш. шк., 1970. — 562 с.
25. *Бурке, Д. Е.* Успехи физики металлов / Д. Е. Бурке, Д. Тарибалл. — М. : Металлургия, 1956. — Т. I. — 312 с.
26. *Бюрен, В.* Дефекты в кристаллах. — М. : Мир, 1962. — 413 с.
27. *Виноградов, Г. А.* Прессование и прокатка металлокерамических материалов / Г. А. Виноградов, И. Д. Радомысельский. — М. : Машиздат, 1963. — 202 с.
28. *Виноградов, Г. А.* Теория листовой прокатки металлических порошков / Г. А. Виноградов, Ю. Н. Семенов. — М. : Metallurgizdat, 1979. — 336 с.
29. *Виноградов, Г. А.* Прокатка металлических порошков / Г. А. Виноградов [и др.] — М. : Металлургия, 1969. — 416 с.
30. *Виттенберг, М. И.* Расчет электромагнитных реле. — Л. : Энергия, 1975. — 715 с.
31. *Вонсовский, С. В.* Магнетизм. — М. : Наука, 1971. — 1032 с.
32. *Вонсовский, С. В.* Ферромагнетизм / С. В. Вонсовский, Я. С. Щур. — М. ; Л. : Гостехиздат, 1948. — 816 с.
33. *Вострокнутов, Н. Г.* Испытание электрических счетчиков / Н. Г. Вострокнутов, А. М. Илюкович. — М. ; Л. : ГЭИ, 1962. — 172 с.
34. *Вострокнутов, Н. Г.* Электрические измерения. — М. : Высш. шк., 1966. — 274 с.
35. *Вязников, Н. Ф.* Металлокерамические материалы и изделия / Н. Ф. Вязников, С. С. Ермаков. — Л. : Машиностроение, 1967. — 224 с.
36. *Гасанов, Б. Г.* Исследования структурообразования порошковых магнитомягких материалов в процессе ДПП : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новочеркасск, 1975. — 17 с.
37. *Гегузин, Я. Е.* Физика спекания. — М. : Наука, 1967. — 312 с.
38. *Гершман, Р. В.* Влияние пластической деформации изгибом и растяжением и последующего отжига на удельные потери холоднокатаной стали. — Челябинск, 1966. — 249 с.
39. *Глестон, С.* Теория абсолютных скоростей реакции : пер. с англ. / С. Глестон, К. Лейдлер, Г. Эйринг. — М. : Изд-во ин. лит., 1948. — 213 с.
40. *Гольдман, М. А.* Электрические микромашины с металлокерамическим магнитопроводом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1976. — 18 с.
41. *Гордон, А. В.* Электромагниты переменного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. — М. : Энергия, 1968. — 200 с.
42. *Гордон, А. В.* Электромагниты постоянного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. — М. : Госэнергоиздат, 1960. — 447 с.
43. *Горбатьюк, В. А.* Магнитные материалы : конспект лекций. — Киев, 1973. — 139 с.
44. *Горлач, И. А.* Влияние неметаллических включений на магнитные свойства электротехнической стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М. : ЦНИИЧМ, 1970. — 18 с.
45. *Грацианов, Ю. А.* Металлические порошки из расплавов / Ю. А. Грацианов [и др.] — М. : Металлургия, 1970. — 317 с.



46. Григорьев, А. К. Численный анализ и экспериментальное исследование технологических параметров процессов прокатки : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Л., 1970. — 35 с.
47. Де-Гроат, Д. Производство изделий из металлического порошка : пер. с англ. — М. : Машгиз, 1960. — 192 с.
48. Джонс, В. Д. Основы порошковой металлургии. Прессование и спекание. — М. : Мир, 1965. — 403 с.
49. Дорощев, Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. — М. : Металлургия, 1977. — 216 с.
50. Драгошанский, Ю. Н. Формирование доменной структуры в магнитноодноосных и магнитотрехосных кристаллах : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Свердловск : ИФМ АН СССР, 1968. — 17 с.
51. Дружинин, В. В. Справочник магнитных и электрических характеристик горячекатаной электротехнической стали / В. В. Дружинин, А. З. Векслер, А. К. Куренных. — М. : Изд-во стандартов, 1982. — 123 с.
52. Дружинин, В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. — М. : Энергия, 1974. — 240 с.
53. Дубров, Н. Ф. Электротехнические стали / Н. Ф. Дубров, Н. И. Лапкин. — М. : Металлургиздат, 1963. — 384 с.
54. Дунаев, Ф. Н. Структура и свойства текстурованных металлов и сплавов / Ф. Н. Дунаев [и др.] — М. : Наука, 1969. — 237 с.
55. Еременко, В. Н. Спекание в присутствии жидкой металлической фазы / В. Н. Еременко [и др.] — Киев : Наукова думка, 1968. — 347 с.
56. Ермаков, С. С. Металлокерамические детали в машиностроении / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. — Л. : Машиностроение, 1975. — 278 с.
57. Ермаков, С. С. Физика металлов. — Л., 1975. — 272 с.
58. Жданович, Г. М. Теория прессования металлических порошков. — М. : Металлургия, 1979. — 224 с.
59. Казаджан, Л. Б. Физические предпосылки улучшения магнитных свойств трансформаторной стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1968. — 19 с.
60. Казарновский, Л. Ш. Листовая электротехническая сталь. — М. : Электротехника и энергетика, 1969. — 193 с.
61. Каганов, Л. М. Основы теории пластичности. — М. : Наука, 1969. — 314 с.
62. Кандаурова, Г. С. Доменная структура магнетиков / Г. С. Кандаурова, Л. Г. Оноприенко. — Свердловск, 1988. — 213 с.
63. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. — М. : Энергоатомиздат, 1995. — 539 с.
64. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. — М. : Металлургия, 1972. — 496 с.
65. Киттель, Ч. Квантовая теория твердого тела. — М. : Наука, 1967. — 372 с.
66. Кифер, И. И. Испытания ферромагнитных материалов. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1969. — 342 с.
67. Кларк, Ф. Новейшие методы порошковой металлургии : пер. с англ. — М. : Атомиздат, 1965. — 224 с.
68. Кондорский, Е. И. Зонная теория магнетизма. — М. : МГУ, 1977. — Ч. I. — 271 с.
69. Кондорский, Е. И. Зонная теория магнетизма. — М. : МГУ, 1977. — Ч. II. — 296 с.
70. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. — СПб. : Издательство «Лань», 2003. — 411 с.
71. Коттрелл, А. Х. Дислокация и пластическое течение в кристаллах. — М. : Металлургиздат, 1958. — 372 с.



72. *Коттрелл, А. Х.* Дислокация и пластическое течение в металлах. — М. : Мир, 1968. — 183 с.
73. *Кринчик, Г. С.* Физика магнитных явлений. — М. : МГУ, 1976. — 347 с.
74. *Круг, К. А.* Основы электротехники. — М. ; Л. : ОНТИ, 1936. — 378 с.
75. *Кубашевский, О.* Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гопкинс. — М. : Изд-во ин. лит., 1955. — 341 с.
76. *Кузнецов, Р. С.* Аппараты распределения электрической энергии до 1000 В. — М. : Энергия, 1970. — 234 с.
77. *Куклин, А. А.* Технология и экономика порошковой металлургии / А. А. Куклин [и др.] — М. : Наука, 1989. — 224 с.
78. *Курбатов, П. А.* Численный расчет электромагнитных полей / П. А. Курбатов, С. А. Аринчин. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 198 с.
79. *Кустов, Е. Ф.* Редукционная симметрия кристаллов : автореф. дис. ... д-ра физ. наук. — М., 1990. — 35 с.
80. *Либенсон, Г. А.* Основы порошковой металлургии. — М. : Металлургия, 1975. — 207 с.
81. *Любчик, М. А.* Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. — М. : Энергия, 1974. — 392 с.
82. *Маклин, Д.* Границы зерен в металлах. — М. : Металлургия, 1965.
83. *Мескин, В. С.* Ферромагнитные сплавы. — М. ; Л. : ОНТИ, 1937. — 413 с.
84. *Тимофеев, И. А.* Металлические порошки и порошковые материалы : справочник / И. А. Тимофеев [и др.] / под ред. Ю. В. Левинского. — М. : Экомет, 2005. — 520 с.
85. Методика (основные понятия) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений / под общ. рук. Н. П. Федоренко, А. В. Вачурина, С. М. Тихомирова. — М. : Экономика, 1977. — 59 с.
86. *Минин, Г. П.* Измерение электроэнергии. — М. : Энергия, 1974. — 134 с.
87. *Миронов, В. А.* Магнитно-импульсное прессование порошков. — Рига : Зинатне, 1980. — 196 с.
88. *Миронов, Л. В.* Фазовые превращения и свойства электротехнических сталей / Л. В. Миронов [и др.] — М. : Металлургиздат, 1962. — 164 с.
89. *Михеев, М. Н.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов. — М. : Наука, 1993. — 137 с.
90. *Мицек, А. И.* Реальные кристаллы с магнитным порядком / А. И. Мицек, В. Н. Пушкарь. — Киев : Наукова думка, 1978. — 128 с.
91. *Мицкевич, Р. И.* Термическое окислирование магнитных сплавов / Р. И. Мицкевич, А. Г. Гауптман. — М. : Машиностроение, 1973. — 273 с.
92. *Мишин, Д. Д.* Магнитные материалы. — М. : Высш. шк., 1981. — 342 с.
93. *Могилевский, Г. В.* Проверочный расчет электромагнитов с внешним поворотным якорем. — Харьков : Изд-во ХПИ, 1959. — 342 с.
94. *Нестерин, В. А.* Оборудование для импульсного намагничивания и контроля постоянных магнитов. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 88 с.
95. *Никитенко, А. Г.* Проектирование оптимальных электромагнитных механизмов. — М. : Энергия, 1974. — 135 с.
96. *Никитский, В. З.* Трансформаторы малой мощности. — М. : Энергия, 1976. — 172 с.



97. *Новик, Ф. С.* Математические методы планирования экспериментов в металлведении. — М. : МИСиС, 1970. — 304 с.
98. *Новиков, И. И.* Дефекты кристаллической решетки металлов. — М. : Metallurgizdat, 1976. — 412 с.
99. *Орлов, А. Н.* Введение в теорию дефектов в кристаллах. — М. : Высш. шк., 1983. — 144 с.
100. *Павлов, Н. Н.* Прессование и прокатка металлических порошков : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Л., 1975. — 37 с.
101. *Панченко, Е. В.* Лаборатория металлографии / Е. В. Панченко [и др.] — М. : Металлургия, 1965. — 313 с.
102. *Пеккер, И. И.* Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. — М. : Энергия, 1967. — 165 с.
103. *Поливанов, К. М.* Теоретические основы электротехники. — М. : Энергия, 1969. — 396 с.
104. *Поливанов, К. М.* Ферромагнетизм. — М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1957. — 256 с.
105. *Преображенский, А. А.* Магнитные материалы и элементы. — М. : Высш. шк., 1976. — 336 с.
106. *Радомысльский, И. Д.* Пресс-формы для порошковой металлургии / И. Д. Радомысльский [и др.] — Киев : Техника, 1970. — 263 с.
107. *Райнз, Ф.* Диаграммы фазового равновесия в металлургии. — М. : Metallurgizdat, 1962. — 214 с.
108. *Раковский, В.* Порошковая металлургия в машиностроении. — М. : Машиностроение, 1973. — 253 с.
109. *Рейнбот, Г.* Магнитные материалы и их применение : пер. с нем. — Л. : Энергия, 1974. — 356 с.
110. *Рид, В. Г.* Дислокации в кристаллах. — М. : Metallurgizdat, 1957. — 417 с.
111. *Розанов, Ю. К.* Электрические и электронные аппараты / Ю. К. Розанов, Е. Г. Акимов, Н. А. Ведешников. — М. : Информэлектро, 2001. — 475 с.
112. *Руднер, Л.* Электротехнические металлокерамические изделия. — М. : ЦНТИ, 1964. — 231 с.
113. *Савицкий, А. П.* Жидкофазное спекание систем с взаимодействующими компонентами. — Новосибирск : Наука, 1991. — 180 с.
114. *Салтыков, С. А.* Стереометрическая металлография. — М. : Металлургия, 1976. — 317 с.
115. *Сахаров, П. В.* Технология и оборудование производства электрических аппаратов. — М. : Энергия, 1972. — 463 с.
116. *Сирота, Н. Н.* Термодинамика и статическая физика. — Минск : Вышэйшая школа, 1969. — 459 с.
117. *Смирнов, В. С.* Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. — М. : Металлургия, 1984. — 236 с.
118. *Скороход, В. В.* Реологические основы теории спекания. — Киев : Наукова думка, 1972. — 392 с.
119. *Степанчук, А. Н.* Технология порошковой металлургии / А. Н. Степанчук, И. И. Билых, П. А. Бойко. — Киев : Виша школа, 1989. — 415 с.
120. *Тимофеев, И. А.* Инновационная технология изготовления электротехнических изделий. — Чебоксары : Чуваш. гос. пед. ун-т, 1997. — 217 с.
121. *Тимофеев, И. А.* Технология производства магнитных материалов и изделий. — М. : МЭИ (ТУ), 2004. — 176 с.
122. *Уманский, А. М.* Прессование порошковых материалов. — М. : Металлургия, 1981. — 81 с.
123. *Федорченко, И. М.* Основы порошковых материалов. — Киев : АН УССР, 1961. — 420 с.



124. *Филиппов, Б. Н.* Динамические эффекты в ферромагнетике с доменной структурой / АН СССР УНЦ Институт физики металлов. — М.: Наука, 1987. — 216 с.
125. *Френкель, Я. И.* Введение в теорию металлов. — М.: Физматгиз, 1958. — 368 с.
126. *Фридель, Ж.* Дислокации. — М.: Мир, 1967. — 413 с.
127. *Хак, Д.* Введение в дислокации. — М.: Атомиздат, 1968. — 391 с.
128. *Хек, К.* Магнитные материалы и их техническое применение. — М.: Энергия, 1973. — 249 с.
129. *Хирт, Д.* Теория дислокаций / Д. Хирт, И. Лоте. — М.: Мир, 1982. — 241 с.
130. *Чернышев, Е. Т.* Магнитные измерения на постоянном и переменном токе / Е. Т. Чернышев [и др.] — М.: Стандартиздат, 1962. — 264 с.
131. *Чехов, О. А.* Магнитомягкие металлокерамические материалы. — Киев: АН УССР, 1959. — 232 с.
132. *Чечерников, В. И.* Магнитные измерения. — М.: Энергия, 1969. — 219 с.
133. *Шоффа, Б. Н.* Анализ полей магнитных систем электрических аппаратов: учеб. пособие / Б. Н. Шоффа, Г. Г. Нестеров. — М.: МЭИ, 1990. — 263 с.
134. *Эшелби, Д.* Континуальная теория дислокаций. — М.: Иностранная литература, 1965. — 296 с.
135. *Аксенов, Г. И.* Исследование магнитомягких металлокерамических сплавов системы / Г. И. Аксенов, Ю. П. Орехов // Физика металлов и металловедение. — 1961. — Т. 12. — Вып. 2. — С. 22–27.
136. *Аксенов, Г. И.* Методы улучшения магнитных свойств металлокерамического сплава / Г. И. Аксенов, Ю. П. Орехов // Электротехнические металлокерамические изделия. — М.: Информэлектро, 1965. — С. 32–40.
137. *Альтман, А. Б.* Электрометаллокерамические материалы и изделия в электропромышленности / А. Б. Альтман [и др.] // Электротехнические материалы и изделия в электропромышленности. — М., 1972. — Вып. II-12. — С. 17–22.
138. *Альтман, А. Б.* Процесс в области производства электрометаллокерамических материалов и изделий / А. Б. Альтман [и др.] // Электротехнические материалы. — М., 1977. — Вып. 10/87. — С. 16–21.
139. *Альтман, А. Б.* О применении металлокерамических магнитопроводов в устройствах переменного тока / А. Б. Альтман, П. А. Гладышев, И. Д. Ростанаев // Тр. III Всесоюз. конф. по прогрессивным методам производства деталей из порошков. — Минск: Вышэйшая школа, 1966. — С. 19–25.
140. *Альтман, А. Б.* Технические магнитные свойства магнитомягких металлокерамических сплавов / А. Б. Альтман, П. А. Гладышев, И. Д. Ростанаев // Электротехнические металлокерамические изделия. — М.: Информэлектро, 1965. — С. 22–31.
141. *Бабаян, Л. Г.* Исследования магнитных свойств магнитопроводов из металлокерамических магнитомягких материалов в переменных полях частотой 50–1000 Гц / Л. Г. Бабаян [и др.] // Новое в электрометаллокерамике. — М.: Информэлектро, 1971.
142. *Бабичев, Л. П.* Исследование динамики доменной структуры в объеме массивных кристаллов Fe + 3% Si методом рентгеновской дифракционной топографии / Л. П. Бабичев [и др.] // Тр. междунар. конф. по магнетизму МКМ-73. — М.: Наука, 1974. — Т. 4. — С. 173–177.
143. *Бейтс, Л. И.* Магнитная структура ферромагнетиков / Л. И. Бейтс, Д. Маргин. — М.: Иностранная литература, 1959. — С. 28–34.



144. *Брашеван, Г. А.* Влияние химического состава неметаллических включений на магнитные свойства трансформаторной стали : сб. / Г. А. Брашеван [и др.] // Прецизионные сплавы. — М. : Металлургия, 1969. — Вып. 71. — С. 124–130.
145. *Вахитов, Р. М.* Влияние дефектов на спин-переориентационный фазовый переход в ферромагнитной пластине (001) с комбинированной анизотропией / Р. М. Вахитов, В. Е. Кучеров // Физика металлов и металловедение. — 2001. — Т. 91. — № 4. — С. 10–14.
146. *Введенский, Б. А.* // Журнал Русского физико-химического общества. Часть физ. — 1926. — Т. 58. — С. 241–246.
147. *Вильямс, Х.* Доменная структура перминвара с прямоугольной петлей гистерезиса : пер. // Магнитная структура ферромагнетиков : сборник. — М. : Иностранная литература, 1959. — С. 314–330.
148. *Горюнов, П. Н.* Методы определения дополнительных моментов в индукционных счетчиках / П. Н. Горюнов, С. М. Пигин // Электричество. — 1949. — № 9. — С. 26–31.
149. *Григорьев, А. К.* Вопросы технологии металлических гранул / А. К. Григорьев, И. Н. Колпаков // Тр. ЛПИ. — Л., 1977. — № 359. — С. 38–43.
150. *Драгошанский, Ю. Н.* О влиянии упругого растяжения на доменную структуру кристаллов кремнистого железа и кобальта / Ю. Н. Драгошанский, В. А. Зайкова, Я. С. Щур // Физика металлов и металловедение. — 1968. — Т. 25. — № 2. — С. 289–297.
151. *Драгошанский, Ю. Н.* Влияние кристаллографической ориентации и упругой деформации на электромагнитные потери монокристаллов Fe–3% Si / Ю. Н. Драгошанский [и др.] // Тр. междунар. конф. по магнетизму МКМ-73. — М. : Наука, 1974. — Т. 4. — С. 518–522.
152. *Драгошанский, Ю. Н.* Влияние совершенства кристаллографической текстуры (ПО) [001] на величину электромагнитных потерь в трансформаторной стали / Ю. Н. Драгошанский [и др.] // Физика металлов и металловедение. — 1978. — Т. 45. — № 4. — С. 723–728.
153. *Драгошанский, Ю. Н.* О формировании доменной структуры кристаллов кремнистого железа / Физика металлов и металловедение. — 1966. — 21. — № 5. — С. 678–687.
154. *Каган, Я. И.* Металлокерамические матнитопроводы для электрических аппаратов переменного тока / Электротехнические металлокерамические изделия. — М. : ВНИЭМ, 1965. — С. 41–48.
155. *Кондорский, Е. И.* К вопросу теории коэрцитивной силы сталей / Доклады АН СССР. — 1948. — Т. 63. — № 5. — С. 48–53.
156. *Кривоносова, Е. Г., Лившиц, Б. Г.* / Физика металлов и металловедение. — М., 1963. — Вып. 4. — С. 15–21.
157. *Кривоносова, Е. Г., Лившиц, Б. Г., Молотиллов, В. В.* / Известия вузов. Черная металлургия. — 1963. — № 3. — С. 21–26.
158. *Кривоносова, Е. Г.* Физика металлов и металловедение / Е. Г. Кривоносова, Б. Г. Лившиц. — 1962. — Вып. 6. — С. 14–19.
159. *Кузнецов, И. А.* Физико-механические свойства и структура порошковых материалов системы Fe–Si / И. А. Кузнецов [и др.] // Физика металлов и металловедение. — 2006. — Т. 101. — № 3. — С. 272–279.
160. *Кустов, Е. Ф.* Влияние изменения концентрации доменов на магнитные свойства ферромагнетиков / Е. Ф. Кустов [и др.] // Инженерная физика. — 2007. — № 6. — С. 34–35.
161. *Лившиц, Б. Г.* Соповещение по ферромагнетизму : тез. докл. — Л., 1963. — С. 31–34.
162. *Меерсон, Г. А.* [и др.] / Порошковая металлургия. — 1970. — № 2. — С. 38–44.
163. *Меерсон, Г. А.* / Порошковая металлургия. — 1962. — № 5. — С. 3–6.



164. *Мишин, Д. Д.* / Изв. АН СССР. Сер. физическая. — 1970. — 2, 29. — С. 233–236.
165. *Мишин, Д. Д.* Зависимость характеристик электромагнитов переменного тока от режима прессования металлокерамических магнитопроводов / Д. Д. Мишин, И. А. Тимофеев // Электротехника. — 1979. — № 1. — С. 46–48.
166. *Мишин, Д. Д.* Изготовление металлокерамических магнитопроводов для систем переменного тока / Д. Д. Мишин, И. А. Тимофеев // Технология электротехнического производства. — М.: Информэлектро, 1978. — Вып. 1(104). — С. 1–3.
167. *Молотиллов, Б. В.* Магнитная структура деформированного и полигонизированного железокремнистого сплава / Прецизионные сплавы: сб. — М.: Металлургия, 1962. — Вып. 25. — С. 24–32.
168. *Молотиллов, Б. В.* Углеродо- и азотосодержащие включения в трансформаторной стали / Б. В. Молотиллов, Л. Б. Казаджан, Ю. Ф. Попова // Тр. Института стали и сплавов. Металловедение, термообработка и физические свойства металлов и сплавов. — Липецк, 1970. — Ч. 1. — Вып. VII. — С. 18–25.
169. *Молотиллов, Б. В.* Магнитная и дислокационная структура сплавов / Б. В. Молотиллов, Л. Н. Федотов // Прецизионные сплавы: сб. — М.: Металлургия, 1962. — Вып. 25. — С. 5–23.
170. *Намитокоев, К. К.* Влияние активированного спекания на магнитные свойства металлокерамических железных материалов / К. К. Намитокоев, Э. П. Бундур, Л. Н. Волощенко // Электротехнические металлокерамические изделия. — М.: Информэлектро, 1965. — С. 34–38.
171. *Николаев, А. Н.* / Порошковая металлургия. — 1962. — № 3. — С. 23–27.
172. *Орехов, Ю. П.* Получение металлокерамических железокремнистых магнитопроводов с плоскими диэлектрическими прослойками / Ю. П. Орехов, П. С. Маринин // Тр. КАИ. — 1966. — Вып. 23. — С. 150–151.
173. *Панасюк, О. А., Радомысльский, И. Д.* / Порошковая металлургия. — 1973. — № 3. — С. 47–53.
174. *Панасюк, О. А., Радомысльский, И. Д.* / Порошковая металлургия. — 1973. — № 4. — С. 29–36.
175. *Патрина, Н. А.* Магнитомягкий металлокерамический материал для изделий автотракторного электрооборудования / Электротехнические металлокерамические изделия. — М.: ЦИНТИЭ, 1962. — С. 163–168.
176. *Попов, В. С.* Измерение мощности способом равных температур / Электричество. — 1958. — № 9. — С. 42–47.
177. *Радомысльский, И. Д.* Принципы конструирования пресс-форм для деталей сложной формы электротехнического назначения / И. Д. Радомысльский, Е. Л. Печентковский // Электротехнические металлокерамические изделия. — М.: ЦИНТИЭ, 1962. — С. 17–23.
178. *Роман, О. В., Дорошкевич, Е. А.* / Порошковая металлургия. — Рига: Машпром, 1963. — С. 22–27.
179. *Тимофеев, И. А.* Особенности инновационной технологии изготовления маломощного синхронного двигателя / И. А. Тимофеев, Н. Н. Павлов // Автоматизация и современные технологии. — 1999. — № 3. — С. 11–15.
180. *Тимофеев, И. А.* Электромагнитный аппарат с полым сердечником на основе безотходной технологии / И. А. Тимофеев, В. Н. Мадеев, В. Д. Максимов // Электротехника. — 1999. — № 1. — С. 24–30.
181. *Тимофеев, И. А.* Физико-механические свойства железокремнистых сплавов / И. А. Тимофеев, Н. Н. Павлов // Литейное производство. — 1999. — № 12. — С. 17–19.



182. Тимофеев, И. А. Разработка асинхронного двигателя на основе энергосберегающей технологии / И. А. Тимофеев, Е. И. Ефименко // Электротехника. — 2001. — № 8. — С. 38–44.
183. Тимофеев, И. А. Ресурсосберегающая инновационная технология изготовления магнитопроводов / И. А. Тимофеев, Н. Н. Павлов // Автоматизация и современные технологии. — 2000. — № 7. — С. 17–22.
184. Тимофеев, И. А. Применение матричной схемы для создания технологии спеченных композиционных магнитных систем / Технология металлов. — 2003. — № 12. — С. 18–22.
185. Тимофеев, И. А. К динамике процесса намагничивания и перемагничивания Fe–Si ферромагнетика / И. А. Тимофеев [и др.] // Физика металлов и металловедение. — 2005. — Т. 100. — № 4. — С. 35–39.
186. Тимофеев, И. А. Технологические возможности изготовления дискретных спеченных магнитных систем / Автоматизация и современные технологии. — 2003. — № 10. — С. 32–36.
187. Тимофеев, И. А. К теории динамического намагничивания и перемагничивания ферромагнетика / И. А. Тимофеев, Е. Ф. Кустов // Известия вузов. Физика. — Томск, 2006. — Т. 49. — № 3. — С. 26–33.
188. Тимофеев, И. А. Экономическая эффективность технологии изготовления автомобильного электрогенератора / И. А. Тимофеев, А. Ю. Мирошниченко // Автомобильная промышленность. — 2007. — № 9. — С. 6–8.
189. Тимофеев, И. А. Разработка магнитной системы индукционного счетчика на основе энерго- и ресурсосберегающей технологии / И. А. Тимофеев, Е. Ф. Кустов // Электричество. — 2006. — № 2. — С. 22–28.
190. Тимофеев, И. А. Влияние дислокаций на магнитные свойства железокремниевых сплавов / И. А. Тимофеев [и др.] // Вестник МЭИ. — 2007. — № 5. — С. 41–44.
191. Тимофеев, И. А. Разработка критической технологии для производства магнитных систем / И. А. Тимофеев, Е. Ф. Кустов, М. В. Петров // Технология металлов. — 2007. — № 2. — С. 25–31.
192. Тимофеев, И. А. Диагностика удельных потерь в ферромагнетике / Изв. вузов. Физика. — Томск, 2008. — Т. 51. — № 1. — С. 23–29.
193. Тимофеев, И. А. К теории намагничивания и перемагничивания ферромагнетика / Инженерная физика. — 2007. — № 3. — С. 2–7.
194. Тимофеев, И. А. Порошковая магнитная система индукторного генератора / Автомобильная промышленность. — 2008. — № 1. — С. 3–7.
195. Тимофеев, И. А. К разработке магнитопровода для маломощного трансформатора напряжения / И. А. Тимофеев, Е. Ф. Кустов // Электротехника. — 2008. — № 2. — С. 38–44.
196. Тимофеев, И. А. Физико-технические основы изготовления магнитопроводов для систем переменного тока / И. А. Тимофеев, Ю. П. Кузнецов // Технология металлов. — 2008. — № 3. — С. 26–30.
197. Тимофеев, И. А. Инновационное явление сдвига магнитных потоков по фазе и амплитуде / Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. — Чебоксары, 2010. — № 4(68). — С. 197–204.
198. Тимофеев, И. А. Электролизная система питания ДВС водой / И. А. Тимофеев, Г. В. Ильин // Автомобильная промышленность. — 2011. — № 7. — С. 8–12.
199. Тимофеев, И. А. Фазоамплитудное явление сдвига магнитных потоков в сердечнике / Инженерная физика. — 2011. — № 8. — С. 52–55.
200. Тиунов, В. Ф. Об особенностях динамического поведения 180-градусной доменной структуры и магнитных потерь монокристаллов



- Fe-3% Si во вращающихся магнитных полях / Физика металлов и металловедение. — 2001. — Т. 91. — № 1. — С. 20-28.
201. *Щур, Я. С.* Влияние малых упругих напряжений на восприимчивость ферромагнетиков / Д. Д. Мишин, Я. С. Щур // Изв. АН СССР. Сер. физическая. — 1952. — Т. XVI. — № 6. — С. 53-57.
202. *Щур, Я. С.* Доменная структура монокристаллов кремнистого железа и электромагнитные потери / Я. С. Щур, Е. Б. Хан, В. А. Зайкова // Физика металлов и металловедение. — 1971. — Т. 31. — Вып. 2. — С. 286-292.
203. *Юферов, Ф. М.* Асинхронный микродвигатель с металлокерамическим статором / Ф. М. Юферов, Б. П. Шорохов // Электрические машины и аппараты. — Чебоксары, 1970. — Вып. 1. — С. 34-39.
204. *Barret, W. F., Brown, W., Hardfild, R. A.* / Sci. Trans. Roy Dublin Soc. — 1900. — V. 7. — P. 67-69.
205. *Barret, W. F., Brown, W., Hardfild, R. A.* / J. Inst. Electr. Eng. — 1902. — V. 31. — P. 647-652.
206. *Bates, L. F.* Ferromagnetic Domain Nucleation in Silicon Iron / L. F. Bates, D. H. Martin // Proc. Phys. Soc. — 1956. — V. 69B. — P. 497-502.
207. *Bates, L. F.* Magnetization Curves and Domain Structure / L. F. Bates, A. Hart // Proc. Phys. Soc. — 1956. — V. 69B. — P. 145-149.
208. *Bergmann, W.* Zs. / Angew. Phys. — 1956. — V. 8. — P. 559-564.
209. *Bilger, H.* Temperatur und Verformungsabhängigkeit der Koerzitivfeldstärke von Eisen-Einkristallen / H. Bilger, H. Trauble // Phys. Stat. Sol. — 1965. — V. 10. — P. 755-759.
210. *Bilger, H.* Temperatur und Verformungsabhängigkeit der Koerzitivfeldstärke von Eisen-Einkristallen / Phys. Stat. Sol. — 1966. — V. 18. — P. 207-211.
211. *Carr, W. I.* Use of Non-Orthogonal Wase Functions in the Treatment of Solids with Application to Ferromagnetism / W. I. Carr, R. Smolukhovski // Phys. Rev. — 1953. — V. 83. — № 3. — P. 113-117.
212. *Cnicazumi, S.* On the Maze Domain of Silicon-Iron Crystal / S. Cnicazumi, K. Suzuki // J. Phys. Soc. Japan. — 1955. — V. 10. — P. 523-528.
213. *Craik, D. I.* A Study of Bitter Figures Using the Electron Microscope / Proc Phys. Rev. — 1956. — V. 69B. — P. 647-651.
214. *Dijkstra, L. I.* Effect of Inclusion on Coercive Force of Iron / L. I. Dijkstra, C. Wert // Phys. Rev. — 1950. — V. 79. — P. 979-985.
215. *Elwood, W. B., Legg, V. E.* / J. Appl. Phys. — 1937. — V. 8. — P. 351-357.
216. *Fallot, M. Ann.* / Phys. — 1936. — V. 6. — P. 305-309.
217. *Farguhar, M. C.* X-Ray Study of Iron-Rich Iron-Silicon Alloys / M. C. Farguhar, H. Lipson, A. R. Weill // J. Iron Steel Inst. — 1945. — V. 152. — P. 457-461.
218. *Frenkel, I. I., Dorfmann, I. G.* / Nature. — 1930. — V. 126. — P. 274-278.
219. *Freidrich, E.* Versetzungsabildung Wehzend des Sintern 6 INT Pulvermetall Tag. / E. Freidrich, W. Shaft. — DDR, Dresden, 1977. — Bd. 1. — P. 191-196.
220. *Ichiyama, T.* Structure and Control of Magnetic Domain in Crain-oriented Silicon Steel / J. of the Iron and Steel Institute of Japan. — 1983. — V. 69. — № 8. — 1983. — P. 895-902.
221. *Goertz, M.* Iron-Silicon Alloys Heat Treated in Magnetic Field / J. Appl. Phys. — 1951. — 22. — № 7.
222. *Goodenough, J. B.* Interpretation of Domain Patterns Recently Found in BiMn and SiFe Alloys / Phys. Rev. — 1956. — V. 102. — I. 2. — P. 356-365.



223. *Goss, N. P.* New development in electrical strip steel characterized by fine grain structure approaching the properties of a Single crystal / *TASM*, 1935. — VI. — V. 23. — № 2. — P. 511–544.
224. *Gumlich, E.* *Wissendh / Abhandlungen d. Phys. Techn.* — Reichsant, 1918.
225. *Greiner, E. S.* Notes on Microstructure and Hardness of Alloys Consisting Essentially of Iron, Chromium and Silicon / *E. S. Greiner, E. R. Jette // Trans. Amer Inst. Mining Met.* — 1937. — P. 125, 437.
226. *Hardfield, R. A.* *Metallurgy and its Influence on Modern Progress.* — New York, 1926.
227. *Iensen, T. D.* The magnetic and other properties of some vacuum melted iron alloys / *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* — 1915. — V. 34.
228. *Kersten, M.* Fish-Scaling in Sheet Ground Enamels / *Cer. Soc. Bull.* — 1944. — P. 23, 86.
229. *Landau, L. D., Lifshitz, E. M.* / *Sow. Phys.* — 1935. — P. 8, 153.
230. *Malek, Z.* / *Czech. Jour. Phys.* — 1957. — P. 7, 97. — 1957. — P. 7, 152.
231. *Martin, D.* / *Proc. Phys. Soc.* — 1957. — P. 70B, 77.
232. *Morrish, A., Watt, L.* / *Phys. Rev.* — 1957. — P. 105, 1476.
233. *Nakamura, Y.* / *J. Phys. Soc. Japan.* — 1961. — P. 16, 1888.
234. *Neel, L.* Remarks on the Theory of the Magnetic Properties of Thin Layers and Fine Grains / *J. Phys. Radium.* — 1956. — P. 17, 250.
235. *Nozawa, T.* / *IEEE Trans. Magne.* — 1978. — MAG-14. — P. 252–257.
236. *Nozawa, T.* [et al.] / *IEEE Trans. Magne.* — 1979. — MAG-15. — № 2. — P. 972–981.
237. *Paxton, W. S.* Domain Configurations and Crystallion Orientation in Grain-Oriented / *W. S. Paxton, T. G. Nilan // Appl. Phys.* — 1955. — P. 26, 994.
238. *Polucarova, C.* / *Czech // J. Phys.* — 1967. — P. 1.
239. *Rickett, R. L.* Constitution of Commercial Low-Carbon Iron-Silicon Alloys / *R. L. Rickett, N. C. Pick // Trans. Amer. Inst. Mining Eng.* — 1946. — P. 167, 346.
240. *Rostoker, W.* Magnetic Properties of Sintered Iron and Iron Base Alloys Metals / *Technol.* — 1948. — P. 15, 891.
241. *Sakai, T.* Magnetic Properties of Fe-Si Alloys by Power Metallurgy / *T. Sakai [et al.] // IEEE Trans. Magn.* — 1977. — P. 13, 1445.
242. *Stephan, Y.* Characteristic Bitter Figures on Silicon-Iron Crystals with Internal Strains / *Ann. Phys.* — 1955. — P. 15, 337.
243. *Seeger, A.* In *Modern Problem der Metallophysic* / *A. Seeger [et al.] // J. Appl. Phys.* — 1966. — P. 35, 740.
244. *Shilling, J. W.* [et al.] / *IEEE Trans. Magne., MAG-14.* — 1978. — P. 101–111.
245. *Tarasov, L. P.* Ferromagnetic Anisotropy of Iron and Iron-Rich Silicon Alloys / *Phys. Rev.* — 1962. — P. 56, 211.
246. *Tebble, R. S.* Ferromagnetic Domains. — Amsterdam : North-Holland Publ. Co., 1969. — P. 98.
247. *Trauble, H. Z.* *Magnetisierungskurve und magnetische Hysterese ferromagnetischer Einkristall.* — Berlin; Heidelberg; New York : Springer, 1966. — P. 318.
248. *Trauble, H. Z.* / *Metallkunde.* — 1962. — P. 53, 211.
249. *Vicena, F.* On the Connection Between the Coercive Force of Ferromagnetic and Internal Stress / *Czech. J. Phys.* — 1955. — P. 5, 480.
250. *Williams, H. I.* Magnetic Domain Patterns on Single Crystals of Silicon Iron / *H. I. Williams [et al.] // Phys. Rev.* — 1949. — P. 75, 155.
251. *Williams, W. J., Goertz, M.* / *J. Appl. Phys.* — 1952. — 23. — P. 216–221.
252. *Yamamoto, T.* [et al.] / *Saitaku Kanku.* — 1979. — № 299. — P. 13191–13203.



253. *Ying-C., F. Domain Patterns on Fe-Si Crystals / F. Ying-C. [et al.] // Lett. in Phys. Rev. — 1952. — P. 86, 133.*
254. А. с. 294195. Многоконтактное электромагнитное реле / В. И. Кудрявцев, А. Г. Зеленов, И. А. Тимофеев // Открытия. Изобретения. — 1971. — № 6. — 2 с.
255. А. с. 394858. Электромагнит с внешним притягивающимся якорем / И. А. Тимофеев, В. И. Кудрявцев, Ш. Х. Усманов // Открытия. Изобретения. — 1973. — № 34. — 3 с.
256. А. с. 449387. Шихтованный электромагнит переменного тока / А. В. Таврин, В. И. Кудрявцев, И. А. Тимофеев // Открытия. Изобретения. — 1974. — № 41. — 5 с.
257. А. с. 504252. Электромагнитный механизм с внешним притягивающимся якорем клапанного типа / И. А. Тимофеев, А. В. Таврин, В. И. Кудрявцев // Открытия. Изобретения. — 1976. — № 7. — 4 с.
258. А. с. 511635. Электромагнит переменного тока / И. А. Тимофеев, А. В. Таврин, В. И. Кудрявцев // Открытия. Изобретения. — 1976. — № 15. — 3 с.
259. А. с. 609126. Способ обработки рабочих поверхностей слоистых металлокерамических и шихтованных магнитных систем / Д. Д. Мишин, И. А. Тимофеев // Открытия. Изобретения. — 1978. — № 20. — 4 с.
260. А. с. 624721. Способ изготовления магнитопровода / И. А. Тимофеев, Д. Д. Мишин // Открытия. Изобретения. — 1978. — № 35. — 5 с.
261. А. с. 708165. Дозатор для непрерывной подачи порошка в прессформу / Д. Д. Мишин, И. А. Тимофеев // Открытия. Изобретения. — 1980. — № 1. — 5 с.
262. А. с. 712902. Способ изготовления спеченного магнитопровода / И. А. Тимофеев, Д. Д. Мишин, А. Н. Болотов // Открытия. Изобретения. — 1980. — № 4. — 3 с.
263. А. с. 725820. Способ изготовления спеченных многослойных изделий / Д. Д. Мишин, И. А. Тимофеев // Открытия. Изобретения. — 1980. — № 13. — 4 с.
264. А. с. 851503. Магнитная система / И. А. Тимофеев // Открытия. Изобретения. — 1981. — № 28. — 3 с.
265. А. с. 986596. Способ изготовления спеченного многослойного магнитопровода / И. А. Тимофеев // Открытия. Изобретения. — 1983. — № 1. — 4 с.
266. А. с. 1028511. Устройство для контроля работы пресса / И. А. Тимофеев, А. Н. Троицкий // Открытия. Изобретения. — 1983. — № 26. — 5 с.
267. А. с. 1098801. Устройство для регулирования заполнения прессформ / А. Н. Троицкий [и др.] // Открытия. Изобретения. — 1984. — № 23. — 6 с.
268. А. с. 1110538. Устройство для автоматического регулирования формуемости смеси / А. Н. Троицкий, И. А. Тимофеев, В. Н. Никитин // Открытия. Изобретения. — 1984. — № 32. — 4 с.
269. Патент 2040811 РФ. Электромагнит с внешним притягивающимся якорем клапанного типа / И. А. Тимофеев [и др.] // Открытия. Изобретения. — 1995. — № 21. — 5 с.
270. Патент 2130680 РФ. Однофазный асинхронный электродвигатель / И. А. Тимофеев [и др.] // Открытия. Изобретения. — 1999. — № 14. — 5 с.
271. Патент 2196660 РФ. Способ изготовления изделий из магнитных материалов / И. А. Тимофеев [и др.] // Открытия. Изобретения. — 2003. — № 2. — 6 с.



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
1. Основные сведения о разработке материалов для магнитопроводов	8
1.1. Диаграмма состояния и кристаллическая структура сплава кремния с железом	8
1.2. Физические свойства слиткового сплава кремния с железом	10
1.3. Свойства спеченных материалов, полученных из железного порошка	13
1.4. Свойства спеченных магнитомягких изделий из сплава кремния с железом	17
1.5. Классификация дефектов кристаллической решетки магнитных материалов	25
1.6. Влияние дислокаций на свойства магнитных материалов	26
1.7. Доменная структура сплава кремния с железом	31
1.8. Выводы по обзору литературы и постановка задачи исследования	36
2. Экспериментальные методы исследования	40
2.1. Способы получения исходных материалов	40
2.2. Пресс-формы для изготовления магнитных материалов методом порошковой металлургии	42
2.3. Методика изготовления элементов магнитных систем	43
2.3.1. Приготовление шихты	43
2.3.2. Дозирование порошковой шихты	44
2.3.3. Формирование изделий из порошковой шихты	47
2.3.4. Сушка пресованных изделий	47
2.3.5. Спекание и термическая обработка элементов магнитных систем	48



2.3.6. Получение монокристаллов	48
2.4. Диагностика элементов магнитных систем	48
2.4.1. Измерение пористости	48
2.4.2. Определение влажности	49
2.4.3. Оценка формуемости	49
2.4.4. Исследование ферромагнитных свойств полученных материалов	50
2.4.5. Методика исследования удельных магнитных потерь	51
2.5. Диагностика микроструктуры элементов магнитных систем	52
2.5.1. Подготовка шлифов для прямого наблюдения микроструктуры	53
2.5.2. Выявление дислокационной структуры	53
2.5.3. Выявление доменной структуры	55
2.6. Диагностика механической прочности	55
2.6.1. Механические испытания спеченных образцов	55
2.6.2. Испытание спеченных магнитных систем на механическую износостойкость	56
3. Влияние структуры материалов, полученных методом порошковой металлургии (МПМ), на магнитные свойства	59
3.1. Спекание материалов для магнитопроводов	59
3.2. Влияние температуры спекания на дислокационную структуру материалов, полученных МПМ	60
3.3. Влияние времени спекания на дислокационную структуру материалов, полученных МПМ	64
3.4. Зависимость коэрцитивной силы и максимальной магнитной проницаемости от плотности дислокаций и концентрации доменов для материалов, полученных МПМ	69
3.5. Исследование удельных потерь материалов, полученных МПМ	81
4. Разработка технологического процесса для изготовления элементов магнитных систем на основе методов порошковой металлургии	91
4.1. Влияние скорости охлаждения и термомагнитной обработки на магнитные и технологические свойства материалов, полученных методами порошковой металлургии	91
4.2. Исследование технологического процесса создания изоляционных слоев элементов магнитных систем	94

4.3.	Совмещенный способ антикоррозионного покрытия и пропитки элементов магнитных систем	96
4.4.	Способ повышения механической износостойкости элементов магнитных систем	100
4.5.	Исследование магнитно-импульсного прессования элементов магнитных систем	105
4.6.	Разработка критической технологии для изготовления элементов магнитных систем, полученных методом жидкофазного спекания (МЖФС)	114
4.7.	Физико-механические свойства материалов, полученных по технологии МПМ	127
4.8.	Вероятностно-статистический анализ технологической точности и качества изготовления магнитных систем	130
5.	Разработка технологических методов изготовления элементов магнитных систем, полученных методами порошковой металлургии	136
5.1.	Зависимость характеристик электромагнитов, полученных из материалов МПМ	136
5.2.	Применение матричной формы схемы прессования	143
5.2.1.	Прессование без вариаций давления	144
5.2.2.	Прессование с эквидистанционной вариацией давления	146
5.2.3.	Прессование при дифференциальном давлении	149
5.2.4.	Прессование композиционных элементов магнитных систем на основе сочетания магнитомягких и магнитотвердых материалов (МММ и МТМ)	152
5.3.	Механическая износостойкость слоистых магнитных систем	157
5.4.	Магнитные свойства характеристик реле в сравнении с зарубежными аналогами	162
6.	Применение элементов технологии изготовления магнитопроводов МПМ в современных электротехнических устройствах	172
6.1.	Создание сердечника с равномерной коллимацией магнитного потока для электромагнитного механизма с внешним поворотным якорем клапанного вида	172
6.2.	Проектирование Ш-образных элементов магнитных систем переменного тока для магнитных пускателей	195

6.3. Разработка магнитной системы маломощного синхронного двигателя с постоянными магнитами	200
6.4. Проектирование магнитной системы индукторного генератора	206
6.5. Разработка магнитной системы асинхронного двигателя	211
6.6. Исследование магнитной системы трансформатора малой мощности	218
6.7. Исследование магнитной системы однофазного индукционного счетчика	225
6.8. Создание магнитной системы электромагнитного аппарата с полым сердечником	232

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1	244
Приложение 2	249
Литература	252

Игорь Александрович ТИМОФЕЕВ
**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Зав. редакцией инженерно-технической
литературы *Е. Л. Дубова*
Редактор *В. Г. Даниленко*
Художественный редактор *С. Ю. Малахов*
Технический редактор *Е. Е. Егорова*
Корректоры *Т. А. Кошелева, А. М. Плетнева*
Подготовка иллюстраций *Е. М. Николаева*
Верстка *М. И. Хетерели*
Выпускающие *О. В. Шилкова, И. Е. Вильман*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.
Тел./факс: (812) 412-29-35, 412-05-97, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 13.04.12.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108¹/₃₂.
Печать офсетная. Усл. п. л. 14,28. Тираж 1500 экз.

Заказ № _____

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленных диапозитивов
в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Правда Севера»».
163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, д. 32.
Тел./факс (8182) 64-14-54; www.ippps.ru