



Тимофеев И. А.

Электротехнические материалы и изделия:

Учебное пособие. 1-е изд.

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»

ISBN 978-5-8114-1304-1

Год выпуска 2012

Тираж 1500 экз.

Формат 12,8×20 см

Переплет: твердый

Страниц 272

Цена 520,08 руб.

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 полезен инженерам-электрикам, научным работникам в области производства электротехнических изделий.

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.

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 конструктивных 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 проектируются 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 необходимо 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.

Тимофеев И. А. Электротехнические материалы и изделия: Учебное пособие. 1-е изд.

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 прессованных 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
<u>3. Влияние структуры материалов, полученных методом порошковой металлургии (МПМ), на магнитные свойства</u>	<u>59</u>
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
<u>4. Разработка технологического процесса для изготовления элементов магнитных систем на основе методов порошковой металлургии</u>	<u>91</u>
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 антикоррозийного 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
<u>5. Разработка технологических методов изготовления элементов магнитных систем, полученных методами порошковой металлургии</u>	<u>136</u>
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
<u>6. Применение элементов технологии изготовления магнитопроводов МПМ в современных электротехнических устройствах</u>	<u>172</u>
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
<u>Приложения</u>	
Приложение 1	244
Приложение 2	249
<u>Литература</u>	<u>252</u>
