Тимофеев Игорь Александрович. Разработка технологий изготовления порошковых магнитных материалов для электротехнических изделий : диссертация ... доктора технических наук : 05.09.02 / Тимофеев Игорь Александрович; [Место защиты: ГОУВПО "Московский энергетический институт (технический университет)"].- Москва, 2009.- 234 с.: ил.

**Содержание к диссертации**

Введение

**1. Основные сведения о разработке материалов для магнитопроводов 13**

1.1. Диаграмма состояния и кристаллическая структура сплава кремния с железом 13

1.2. Физические свойства слиткового сплава кремния с железом 15

1.3. Свойства спеченных материалов, полученных из железного порошка ... 18

1.4. Свойства спеченных магнитомягких изделий из сплава кремния с железом 21

1.5. Классификация дефектов кристаллической решетки магнитных материалов 30

1.6. Влияние дислокаций на свойства магнитных материалов 31

1.7. Доменная структура сплава кремния с железом 37

1.8. Выводы по обзору литературы и постановка задачи исследования 41

**2. Экспериментальные методы исследования 45**

2.1. Способы получения исходных материалов 45

2.2. Пресс-формы для изготовления магнитных материалов методом порошковой металлургии 47

2.3. Методика изготовления элементов магнитных систем 48

2.3.1. Приготовление шихты 48

2.3.2. Дозирование порошковой шихты 49

2.3.2. Формирование изделий из порошковой шихты 52

2.3.4. Сушка прессованных изделий 53

2.3.5. Спекание и термическая обработка элементов магнитных систем... 54

2.3.6. Способ получения монокристаллов 54

2.4. Диагностика элементов магнитных систем 54

2.4.1. Измерение пористости 54

2.4.2. Определение влажности 55

2.4.3. Оценка формуемости 55

2.4.4. Исследование ферромагнитных свойств полученных материалов... 57

2.4.5. Методика исследования удельных магнитных потерь 58

2.5. Диагностика микроструктуры элементов магнитных систем 59

2.5.1. Подготовка шлифов для прямого наблюдения микроструктуры 60

2.5.2. Выявление дислокационной структуры 60

2.5.3. Выявление доменной структуры 62

2.6. Диагностика механической прочности 62

2.6.1. Механические испытания спеченных образцов 62

2.6.2. Испытание спеченных магнитных систем на механическую износостойкость 63

**3. Влияние структуры материалов, полученных методом порошковой металлургии (МПМ), на магнитные свойства 65**

3.1. Спекание материалов для магнитопроводов 65

3.2. Влияние температуры спекания на дислокационную структуру материалов, полученных МПМ 66

3.3. Влияние времени спекания на дислокационную структуру материалов, полученных МПМ 71

3.4. Зависимость коэрцитивной силы и максимальной магнитной проницаемости от плотности дислокаций и концентрации доменов для материалов, полученных МПМ 77

3.5. Исследование удельных потерь материалов, полученных МПМ 91

**4. Разработка технологического процесса для изготовления элементов магнитных систем на основе МПМ 101**

4.1. Влияние скорости охлаждения и термомагнитной обработки на магнитные и технологические свойства материалов, полученных МПМ 101

4.2. Исследование технологического процесса создания изоляционных слоев элементов магнитных систем 105

4.3. Совмещенный способ антикоррозийного покрытия и пропитки элементов магнитных систем 107

4.4. Способ повышения механической износостойкости элементов магнитных систем 111

4.5. Исследование магнитно-импульсного прессования элементов магнитных систем 116

4.6. Разработка критической технологии для изготовления элементов магнитных систем, полученных методом жидкофазного спекания (МЖФС) 128

4.7. Физико-механические свойства материалов, полученных по технологии МПМ 142

4.8. Вероятностно-статистический анализ технологической точности и качества изготовления магнитных систем 146

**5. Разработка технологических методов изготовления элементов магнитных систем, полученных МПМ 151**

5.1. Зависимость характеристик электромагнитов, полученных из материалов МПМ 151

5.2. Применение матричной формы схемы прессования 161

5.2.1. Прессование без вариаций давления 161

5.2.2. Прессование с эквидистанционной вариацией давления 163

5.2.3. Прессование при дифференциальном давлении 168

5.2.4. Прессование композиционных элементов магнитных систем на основе сочетания магнитомягких и магнитотвердых материалов (МММ и МТМ)171

5.3. Механическая износостойкость слоистых магнитных систем 176

5.4. Магнитные свойства характеристик реле в сравнении с зарубежными аналогами 183

**6. Применение элементов технологии изготовления магнитопроводов МПМ в современных электротехнических устройствах 192**

6.1. Создание сердечника с равномерной коллимацией магнитного потока для электромагнитного механизма с внешним поворотным якорем клапанного вида 192

6.2. Проектирование Ш-образных элементов магнитных систем переменного тока для магнитных пускателей 220

6.3. Разработка магнитной системы маломощного синхронного двигателя с постоянными магнитами 225

6.4. Проектирование магнитной системы индукторного генератора 232

6.5. Разработка магнитной системы асинхронного двигателя 238.

6.6. Исследование магнитной системы трансформатора малой мощности 247

6.7. Исследование магнитной системы однофазного индукционного счетчика 256

6.8. Создание магнитной системы электромагнитного аппарата с полым сердечником.. 264

Заключение 276

Литература 280

Приложения 301

* [Свойства спеченных материалов, полученных из железного порошка](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/razrabotka-tehnologij-izgotovlenija-poroshkovyh-magnitnyh-materialov-dlja.html#3611441)
* [Пресс-формы для изготовления магнитных материалов методом порошковой металлургии](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/razrabotka-tehnologij-izgotovlenija-poroshkovyh-magnitnyh-materialov-dlja.html#3611442)
* [Влияние температуры спекания на дислокационную структуру материалов, полученных МПМ](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/razrabotka-tehnologij-izgotovlenija-poroshkovyh-magnitnyh-materialov-dlja.html#3611443)
* [Совмещенный способ антикоррозийного покрытия и пропитки элементов магнитных систем](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/razrabotka-tehnologij-izgotovlenija-poroshkovyh-magnitnyh-materialov-dlja.html#3611444)

**Введение к работе**

**Актуальность темы.**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 самых различных классах электротехнических изделий, их электромеханические характеристики в значительной мере определяют эксплуатационные характеристики электротехнических изделий, их механическую износостойкость, надежность, рабочую температуру и т. п.

Одним из прогрессивных методов формирования элементов изделий из магнитных материалов являются методы порошковой металлургии, которая на сегодня используется в основном для получения элементов конструкционных деталей, несущих в основном механические нагрузки.

Использование указанных технологических методов для рабочих элементов электротехнических конструкций (сердечников, магнитопроводов, магнитных шунтов и т. п.) поставило задачу проведения комплекса физических и технологических исследований по получению магнитных материалов с повышенными магнитными характеристиками.

Из-за неэффективной эксплуатации энергии и ресурсов образовался огромный резерв неиспользованного экономического и технического потенциала. Часто электротехнические изделия проектировались без расчета размеров магнитных систем, с нерациональным использованием электрической энергии, с большими отходами электротехнической стали в металлолом и непроизводительными расходами обмоточной меди, без учета магнитных характеристик для реальных изделий.

Проведение исследований, результаты которых изложены в диссертации, осуществлялось в соответствии с постановлением Правительства Российской

Федерации № 80 от 25 января 1998 г. «О федеральной целевой программе «Энергосбережение России на 1998-2005 годы» и на основании Указа 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».

Созданию новой инновационной технологии получения магнитных материалов и посвящена настоящая работа и как показали проведенные исследования она позволяет сократить трудоемкость операций изготовления магнитных элементов, способствует снижению себестоимости изделий, экономии магнитных материалов, высвобождению прокатного, штамповочного, металлорежущего станочного оборудования, широко используемого в современной технологии производства элементов магнитных цепей.

Изделия, изготовленные по методу порошковой металлургии, найдут применение во многих отраслях промышленности. Особое значение в наших условиях имеет решение задач организация исследования технологий магнитных материалов, налаживания новых технологических процессов изготовления и создания новых конструкций изделий.

Актуальность работ можно выразить в следующей концентрированной форме:

1. Необходимость создания новых магнитных материалов, превосходящих по своим магнитным свойствам существующие материалы (по коэрцитивной силе, максимальной магнитной проницаемости, удельным потерям);
2. Необходимость развития теоретических положений взаимодействия доменных границ со структурными дефектами, влияющими на магнитные свойства;
3. Отсутствием эмпирических данных по специфике создания магнитных материалов методом порошковой металлургии.

Приведенная работа восполняет пробел, который имеет место в данной отрасли науки и техники.

**" 7**

**Цель работы.**Диссертационная работа посвящена решению крупной научно-технической проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение. Целью работы является установление реальной физической природы намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков, развитие теории и методов технологии изготовления магнитных материалов, позволяющих на основе энерго- и ресурсосбережения разработку новых конструкций электротехнических агрегатов и изделий с высокими электромеханическими характеристиками.

**Научная новизна.**

1. Разработана теория влияния структурных дефектов типа дислокаций и плотности доменов относительно их кинематических характеристик взаимодействия в порошковых магнитомягких материалах на коэрцитивную силу, максимальную магнитную проницаемость, удельные потери и удельное электрическое сопротивление.
2. Определение области изменения параметров разработанной теории для магнитомягких материалов, полученных методом порошковой металлургии.
3. Разработан матричный формализм процесса прессования слоистых магнитных материалов, который дает возможность формировать градиентные характеристики изделий электротехники по фазе и амплитуде.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

развитие теоретических положений намагничивания и перемагничивания магнитомягких материалов;

методологические закономерности формообразования и спекания порошковых магнитомягких материалов;

результаты теоретических и экспериментальных исследований технологических процессов изготовления магнитопроводов в отличие от известных технологических процессов;

новые классы магнитных систем переменного тока

методы оптимизации параметров магнитопроводов постоянного тока;

- результаты внедрения технологических процессов изготовления  
магнитопровода и магнитных систем в производство, практику проектирования и  
учебный процесс.

**Практическая ценность и реализация результатов работы**состоят в

следующем:

внедрении прессованных и спеченных магнитопроводов с проведением опытно-промышленных и эксплуатационных испытаний на контакторах типа МПМК-1, изготовленных по чертежам ГЛЦИИ 757.235.002 в соответствии с представленными чертежами автора. Спеченные магнитопроводы изготавливаются на Кинешемском заводе «Электроконтакт» и используются на указанных контакторах с 1999 г. Внедрение разработанной технологии позволило повысить максимальную магнитную проницаемость, снизить коэрцитивную силу и повысить механическую износостойкость аппарата;

внедрении прессованных и спеченных магнитопроводов с проведением опытно-промышленных и эксплуатационных испытаний на Броварском заводе порошковой металлургии. Спеченные магнитопроводы монтируются и комплектуются с другими деталями и затем собираются в кнопочные элементы типа ВП-51 (ЦМ 7774005), которые в последствии устанавливаются в порталах для автоматического управления высотными гражданскими лифтами типа У-0,71 МС. Спеченные магнитопроводы позволяют повысить физико-механические свойства, исключить трудоемкие операции обработки и получать сложные конструктивные формы деталей практически без потерь исходного сырья;

- использование технологического процесса изготовления спеченных  
слоистых магнитопроводов. Спеченные слоистые магнитопроводы  
используются для изготовления магнитных систем на реле типа РПУ-1 во  
Всесоюзном научно-исследовательском, проектно-конструкторском и  
технологическом институте релестроения (ВНИИР), что позволило снизить  
электрические потери до 0,5 Вт/кг для магнитной индукции 1,0 Т и частоте

перемагничивания 50 Гц, увеличить относительную магнитную проницаемость до 17000 и уменьшить коэрцитивную силу до 7,9 А/м;

- введением высокотемпературного отжига, примененного на  
магнитных системах, в технологический процесс производства реле ЭП-41В  
Тырныаузского завода низковольтной аппаратуры. В результате указанного  
высокотемпературного отжига уменьшилось время технологического цикла на  
37,5%, улучшились магнитные характеристики реле и повысилась  
механическая износостойкость магнитных систем в 1,5-2 раза по сравнению с  
аналоговыми системами;

использование разработанных спеченных магнитопроводов для трансформаторов напряжения малой мощности на основе безотходной технологии взамен аналогичного магнитопровода для трансформатора напряжения малой мощности типа ТБС-2. Разработанные спеченные магнитопроводы используются на Сарапульском радиозаводе, что позволило по сравнению с магнитопроводами аналоговых трансформаторов малой мощности снизить расход потребляемой мощности на 23%, повысить КПД на 24% и поднять Coscp на 27%;

внедрение спеченных магнитопроводов, изготовленных по чертежам автора, с проведением опытно-промышленных и эксплуатационных испытаний. Спеченные магнитопроводы используются для изготовления магнитных систем синхронных двигателей типа ДВС-VI на Чебоксарском предприятии ОАО «Завод электроники и механики». Внедрение разработанной конструкции позволило уменьшить затраты стали на 33%, увеличить вращающий момент на 13% и повысить КПД на 14%.

Общий экономический эффект от внедрения спеченных магнитных систем для электротехнических агрегатов и изделий, разработанных в соответствии с предложенными в представленной работе технологическими процессами изготовления, составил 3976,9 тыс. руб. (в ценах 2002 года).

Научные положения диссертации используются в учебном процессе:

при чтении лекций и подготовке лабораторных работ по курсам «Электродинамика», «Магнитные материалы и элементы», «Теоретическая физика», «Теоретическая электротехника»;

при подготовке аспирантских и магистерских диссертаций, выпускных работ бакалавров, вьшолнении исследовательских курсовых и дипломных проектов;

при издании двух учебных пособий.

Проведенная работа является частью комплекса работ, проведенных  
автором на кафедре «Магнетизма» Тверского государственного университета и  
на кафедре «Физики и технологии электротехнических материалов и  
компонентов и автоматизированных электротехнических комплексов»

Московского энергетического института (технического университета).

**Апробация работы.**Основные результаты работы были доложены на международных и всероссийских конференциях, в том числе: международной научно-практической конференции «Современные технологические процессы и оборудование в машиностроении» (г.Чебоксары, 1999 г.), международной научно-практической конференции «Метрологическое обеспечение испытаний и сертификации» (г. Москва, 1999 г.), VIII международном семинаре «Структура дислокаций и механические свойства металлов и сплавов» (г. Екатеринбург, 1999 г.), международной научно-технической конференции «Энергосбережение, экология и безопасность» (г. Тула, 1999 г.), VI Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (г. Москва, 1999 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Диагностика веществ, изделий и устройств» (г. Орел, 1999 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Технологическое обеспечение качества машин и приборов» (г. Пенза, 2004 г.), общероссийской юбилейной научной конференции с международным участием «Современные проблемы науки и образования» (г. Москва, 2005 г.), IV общероссийской научной конференции с международным участием «Новейшие технологические решения и оборудование» (г. Москва,

2006 г.), международной научной конференции «Современные проблемы науки и образования» (Болгария, г. София, 2006 г.), I международной научной конференции «Приоритетные направления развития науки» (США, г. Нью-Йорк, 2007 г.), Ш Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в современном машиностроении» (г. Пенза, 2007 г.), VIII Всероссийской научной конференции «Успехи современного естествознания» (г. Москва, 2007 г.).

**Публикации.**Общее количество опубликованных печатных работ по тематике диссертации составляет 59, в том числе монографий — 2, в рецензируемых научных журналах - 19. Новизна и оригинальность разработок конструкций и технологических процессов изготовления спеченных магнитных материалов и электротехнических изделий защищена 15 авторскими свидетельствами и 3 патентами на изобретения.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту доктору физ.-мат. наук, проф. Е.Ф.Кустову, а также д.т.н., проф. М.В. Петрову, кандидату физ.-мат. наук, доц. А.Ю. Мирошниченко за оказанную помощь при выполнении работы, критические замечания и рекомендации.

**Структура и объем работы.**Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения и результатов работы, списка литературы из 253 наименований и включает 251 страницу машинописного текста, 146 рисунков, 42 таблицы и приложение. Общий объем работы 300 страниц.

## Свойства спеченных материалов, полученных из железного порошка

Для магнитопроводов применение технологии порошковой металлургии обусловлено главным образом экономическими соображениями. Изготовление из порошков магнитопроводящих деталей простой и особенно сложной формы (полюсных 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 (табл. 1.3).

В работе [7] показано, что изделия из штампованного железного порошка (спеченного железа) имеют сравнительно низкую максимальную магнитную проницаемость 13,8-31 Гн/м и большую коэрцитивную силу 126,4-244,9 А/м (табл. 1.4). Кроме того, табл. 1.4 показывает, что спеченное железо, изготовленное из разных исходных порошков, имеет большой разброс по магнитным свойствам.

В той же работе [7] 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 и никелевого - 99,92 % Ni и т.п. при температуре спекания 1573 К с выдержкой до 24 ч). При этих условиях можно получить, магнитные материалы с высокой плотностью и хорошими магнитными свойствами (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 использовали водный раствор диаммония фосфата (M-L HPCU, при разложении которого и процессе термической обработки порошка образуется фосфор. Образцы, изготовленные с содержанием фосфора от 0,1 до 1,5% при давлении прессования 800 МПа и кратковременно спеченные при температуре 1423 К в водороде, уплотняются до 6950 кг/м (табл. 1.6).

В работах [120, 154] утверждается, что присадка фосфора к кремнистому железу с 4,5 % Si увеличивает магнитную индукцию на 5-8 % при снижении потерь на 8-10 %. На магнитные свойства железофосфорных материалов влияет не только режим прессования и спекания, но и состав исходных порошков, состав защитной среды спекания и т.д. По данным работы [178], свойства изделий, спеченных и водороде при температуре 1173 К за 2 ч и вторично при 1523 К в течение 4 ч, значительно выше, чем спеченных при температуры 1443 К за время 4 ч в конвертированном газе. Следовательно, использование чистых порошков, а также сильных восстановительных сред позволяет повысить свойства железофосфорных сплавов.

Введение кремния повышает удельное электрическое сопротивление сталей и тем самым понижает вихревые токи пропорционально первой степени увеличения 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, как указано в работе [172], пока не увенчались успехом.

Повышение содержания кремния увеличивает хрупкость материала (листы с содержанием 2 % Si допускают 10 перегибов на 180, а материал с содержанием 4,5 % Si разрушается уже после одного 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 табл. 1.7 указаны характеристики лабораторных образцов из спеченных магнитомягких материалов по данным [138, 139,140, 141, 199]. Для сравнения в таблице также приведены характеристики электротехнической кремнистой 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 электротехнической 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.п.

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-Ю"6 до 40-10"6 м овальной формы. Количество пор при повышении содержания кремния в сплаве увеличивается. Исключение составляет сплав, содержащий 6,5 % кремния, имеющий более крупные поры (до 100-10"6) 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 довольно резко выраженным максимумом, отвечающим 6,5 % Si. Рентгеноструктурным и металлографическим исследованием, проведенным в целях определения фазового состава сплавов с 6-8 % Si, установлено, что эти сплавы представляют собой твердый раствор кремния в a-Fe.

Попытки улучшения магнитных свойств спеченных железокремнистых сплавов описаны в работах [135, 140, 154, 199], где исследовались 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.

## 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 расширении, а также иметь минимальную деформацию при термической обработке. Поэтому основные детали пресс-форм изготовляются в основном из термически обрабатываемых легированных и углеродистых сталей. Некоторые детали изготовленных пресс-форм приведены на рис. 2.1.

Для больших партий деталей матрицы были выполнены из инструментальных легированных сталей марок Х12М, ХВГ, 9ХС, 5ХВГС и др. Для повышения эксплуатационной стойкости основных рабочих деталей пресс-форм их подвергали цементации или закалке до твердости, равной 48-56 по шкале Роквела. Были изготовлены матрицы из быстрорежущих сталей Р9 иР18. 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 изготовления пуансонов сложной формы были применены инструментальные легированные стали марок Х12М, XT, 9ХС, ХВГ, 8ХФ, XI8M. Для улучшения заполняемое полости ферромагнитным порошком матрицы пресс-форм были изготовлены из стали 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; выполнение легкого извлечения прессуемых изделий.

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

Необходимый состав шихты готовился смешиванием железного порошка (ГОСТ 9849) с поликристаллическим порошком кремния КПС-1 (ТУ 48-4-319-84), а 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)-10"6 м производили вручную в чугунной ступке. Дальнейшее тонкое измельчение порошка до размеров частиц порядка (20— 70)-10" 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 этой мельнице служат стальные шарики. Для наименьшего времени измельчения 300-600 с эмпирически были подобраны шарики трех различных диаметров: 3,2-10"; 5,5-10" и 8-10" м. При этом общее соотношение этих шариков в барабане составляет соответственно 17, 33 и 50 %. Кроме того, для уменьшение 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.

Известно, что дозирование порошкообразных материалов производится в дозаторах. Для изготовления слоистых магнитопроводов создано специальное дозирующее устройство (авт. свид. № 708165)

Механические свойства дозируемого материала являются постоянными, так как в бункер поступает материал, состоящий из частиц определенного размера от 20-10"6 до 100-10"6 м. Дозатор предназначен для изготовления сложных магнитопроводов, имеющих следующие геометрические формы: цилиндрические, усеченно-конические, кольцевые, параболоидальные, подковообразные, эллиптические, тороидальные и т.п.

Кроме того, такой дозатор позволяет изготовлять слоистые магнитопроводы. 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 рис. 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 них заполняется ферросодержащей шихтой 2, а 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 1 через двухступенчатый редуктор, содержащий цилиндрическое зубчатое колесо Z4 и цилиндрическую шестеренку Z5, а также коническое колесо Z\ и коническую шестеренку Ъг соединен через двустороннюю конусную фрикционную муфту 8 с электродвигателем 9. Весовая головка 10, на которую установлена также пресс-форма 11, через трехступенчатый редуктор, содержащий цилиндрическое зубчатое колесо Z& паразитную шестеренку Z-; и цилиндрическую шестеренку Zg, а также коническое колесо Zi и коническую шестеренку Z3, соединена через двустороннюю конусную фрикционную муфту 8 с тем же электродвигателем 9.

## 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 возможность эффективного применения магнитопроводов в промышленности 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 с 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, а при увеличении плотности дислокаций этот процесс

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 плотности дислокаций. Подсчет плотности дислокаций показал, что при постепенном увеличении температуры спекания происходит интенсивная перестройка дислокационной структуры, плотность дислокаций значительно уменьшается (рис. 3.4). На этом же рисунке приведено изменение ширины доменов в зависимости от температуры спекания: при температуре от 1550 до 1690 К средняя плотность дислокаций уменьшилась с 16-1010 до 0,7-1010 м"2. Эти данные показывают, что с уменьшением плотности дислокаций смещение доменных границ происходит свободно, не задерживаясь на дефектах кристаллического строения металлов, поэтому и магнитные характеристики с уменьшением плотности дислокаций повышаются в несколько раз. На рис. 3.5 представлены микрофотографии дислокационной структуры образцов, спеченных при 1590—1650 К. % Si, имеет константу кристаллической магнитной анизотропии 20 Дж/м , и поэтому наблюдение доменной структуры представляет известную трудность. Микрофотографии доменной и дислокационной структуры образцов, вырезанных из верхней части кристалла, представлены соответственно нарис. 3.7 и 3.8.

## Совмещенный способ антикоррозийного покрытия и пропитки элементов магнитных систем

Дня повышения механической износостойкости магнитных систем из спеченных материалов был применен комплексный способ антикоррозийного покрытия в сочетании с ингибированной пропиткой, который проводится в два этапа.

На первом этапе производится процесс паротермического оксидирования магнитопроводов, которые покрываются оксидной пленкой в результате воздействия на них высоких температур в атмосфере перегретого пара.

Покрытие производится в следующей технологической последовательности. Элементы магнитной системы (магнитопроводы) опускают и устанавливают в ванну со скипидаром или другим растворителем для очистки от грязи, ржавчины и т.п. После этого вынимают магнитопроводы из ванны и дают стечь скипидару в ванну, магнитопроводы тщательно продувают сжатым воздухом из воздушного пистолета. Затем магнитопроводы укладывают рядами в загрузочную корзину шлифованными оверхностями навстречу друг другу и нагревают до температуры оксидирования 520 К, пропуская через них нагретый пар. При достижении температуры оксидирования резким открытием вентилей производят продувку трубопроводов и камеры оксидирования. Поднимают в камере давление до 40-60 МПа и поддерживают постоянным на протяжении всего времени оксидирования.

Процесс происходит в герметически закрывающихся камерах печей, где на нагретые до 1020 К магнитопроводы действует диссоциированный кислород из перегретого водяного пара. Пар без конденсата равномерно омывает оксидируемые детали, подвергая их активному поверхностному окислению. Химический процесс образования пленки происходит последовательно по следующим экзотермическим реакциям:

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

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

На втором этапе производится процесс пропитки 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 температуры 350-355 К. Корзину с системами погружают с помощью тельфера в ультразвуковую ванну на расстоянии (5-8)-10-3 м от дна, имеющего диафрагму магнитострикционного излучателя. Заполняют ванну маслом на 2-Ю"3 м выше уровня магнитных систем, закрывают крышку и включают ультразвуковой генератор. Пропитку производят по следующему режиму: выдерживают магнитные системы под воздействием ультразвуковых колебаний в течение 60 с. Выключают установку и выдерживают при нормальных условиях в течение 60 с. Повторяют указанный процесс еще 6-8 раз. Корзину с магнитными системами вынимают из ванны тельфером и 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 наличия сквозной пропитки необходимо разрушить одну-две магнитные системы из партии. На основании наших экспериментов разработана технологическая инструкция.

После пропитки проводилось испытание на коррозийную 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 сут.

Перед установкой в камеру часть магнитных систем была установлена в пускатели типа ПМЕ-211, остальная часть испытывалась 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 обеспечивает такую защиту. Оксидирование обычно применяется для сталей [91], работающих в статических режимах, и впервые применено 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: термическое оксидирование, оксидирование и пропитка в ингибированном масле К-17 на ультразвуковой установке. Интенсивность износа соударяющихся поверхностей оксидированных магнитных систем выше обычных заводских систем и значительно выше систем, оксидированных с последующей пропиткой в масле ультразвуковым способом (рис. 4.3).