

На правах рукописи



УДК 699.888:539.213.2

ГРНТИ 53.49.07

МАЗЕЕВА Алина Константиновна

**ФОРМИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ В АМОРФНЫХ
И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ КОБАЛЬТА И ЖЕЛЕЗА ДЛЯ
ЗАЩИТНЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ЭКРАНОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2017

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель: доктор технических наук,
Кузнецов Павел Алексеевич

Официальные оппоненты: **Чубраева Лидия Игоревна**,
Доктор технических наук, член-корреспондент
Российской академии наук,
ФГБУН «Институт электрофизики и
электроэнергетики Российской академии наук»,
заведующая лабораторией электроэнергетики.

Шалыгина Елена Евгеньевна,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова», главный
научный сотрудник кафедры магнетизма.

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»**

Защита состоится «25» октября 2017 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 191015 г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, дом 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте:

<http://dissovet.cris-m-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=19>

Автореферат разослан «__» июля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д411.006.01
Заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор

 **Малышевский В.А.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

На сегодняшний день актуальной задачей является защита биологических объектов, электротехнического и электронного оборудования от повышенного уровня техногенных магнитных (МП) и электромагнитных полей (ЭМП). Для регламентирования предельно допустимых уровней МП и ЭМП в России и за рубежом разработаны нормативные документы в области охраны труда, санитарно-эпидемиологического благополучия населения, также в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств.

В ряде случаев наиболее эффективным способом защиты является экранирование с использованием специальных экранирующих материалов с высокой магнитной проницаемостью, порядка 10^3 и выше. Перспективными материалами в этом направлении являются металлополимерные экраны на основе аморфных и нанокристаллических сплавов кобальта и железа, полученных методом спиннингования расплава, такие как MS-F, MS-FR производства Hitachi Metals Co (Япония), MAP-1K и MAP-1Ф производства НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» (Россия) и др. В исходном состоянии сплавы обладают свойствами, на порядок превышающими свойства традиционных кристаллических материалов. Благодаря неравновесной структуре аморфные сплавы открывают широкие возможности для управления их свойствами посредством различных обработок. Наиболее эффективным и производительным методом является термическая обработка (ТО). При этом, по мнению отечественных и зарубежных исследователей, таких как А.М. Глезер, И.Б. Кекало, Н.А. Скулкина, G. Herzer, Y. Yoshizawa, К. Нопо и др., возможна реализация нескольких механизмов формирования магнитных свойств, в том числе: создание аморфно-нанокристаллической структуры в объеме сплава, релаксация внутренних закалочных напряжений, формирование поверхностного аморфно-кристаллического слоя, наведение внутренних напряжений внедренными атомами внешней среды и др. Данные механизмы являются конкурирующими и могут приводить к нестабильности и отсутствию воспроизводимости магнитных свойств, что отражается на эффективности экранирования. Несмотря на большой научный и практический интерес к аморфным и нанокристаллическим сплавам, на данный момент не существует универсального подхода к описанию процессов, происходящих при термической обработке и формирующих магнитные свойства данных сплавов.

Таким образом, актуальной задачей является поиск подходов к выбору технологических режимов ТО, обеспечивающих требуемый высокий и стабильный уровень магнитных свойств, в частности максимальной магнитной проницаемости μ_{\max} .

Также важным аспектом практического применения металлополимерного экрана является знание его поведения при длительном воздействии эксплуатационных факторов. В условиях воздействия коррозионной среды, климатических факторов,

механических напряжений, технологических покрытий и т.д. свойства аморфных и нанокристаллических сплавов могут меняться ввиду неравновесности их структуры. Таким образом, вопросы изменения свойств экранов на основе аморфных и нанокристаллических сплавов изучены недостаточно и требуется проведение дополнительных комплексных исследований.

Цель работы:

Повышение экранирующих характеристик металлополимерных экранов на основе лент аморфных и нанокристаллических магнитомягких сплавов кобальта и железа за счёт изучения механизмов перераспределения намагниченности и формирования магнитных свойств в процессе технологических переделов ленты при изготовлении экрана.

Задачи:

1. Разработать режимы термической обработки лент аморфных сплавов системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B, обеспечивающие формирование стабильных конкурентоспособных магнитных свойств, на основе анализа исходного распределения намагниченности в объёме ленты и расчёта оптимальной длительности изотермической выдержки:

– установить корреляционную зависимость между магнитной проницаемостью и распределением намагниченности в объёме ленты;

– исследовать влияние водяного пара на распределение намагниченности и статические магнитные свойства лент аморфных сплавов системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B с целью разработки метода определения знака магнитострикции;

– расширить диапазон содержания никеля применяемых сплавов в сторону его понижения за счёт разработки новых режимов термической обработки.

2. Определить влияние полимерного покрытия на распределение намагниченности и максимальную магнитную проницаемость в экранах с целью усовершенствования технологии его нанесения для снижения потерь магнитных свойств.

3. Выявить влияние содержания меди в нанокристаллическом сплаве системы Fe-Cu-Nb-Si-B на закономерности формирования структуры и статических и динамических магнитных свойств для расширения рабочего диапазона частот экранов.

4. Провести лабораторные и натурные климатические испытания для оценки стабильности свойств лент аморфных и нанокристаллических сплавов и металлополимерных экранов на их основе при воздействии эксплуатационных факторов.

Научная новизна:

1. Впервые определена корреляционная зависимость максимальной магнитной проницаемости от доли доменов с ортогональной намагниченностью в аморфном сплаве АМАГ-172 системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B. При доле доменов с ортогональной

намагниченностью менее 5 % представляется возможным достигать значений $\mu_{\max} = 800\ 000$ и более.

2. Впервые предложен метод определения знака магнитострикции сплавов системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B, обладающих близкой к нулю магнитострикцией насыщения, посредством кратковременной обработки поверхности водой или водяным паром. Показано, что насыщение сплавов кислородом на 15-25 % относительно состояния сразу после термической обработки в ходе такого воздействия приводит к перераспределению намагниченности по объёму ленты: увеличение объёмной доли доменов с ортогональной намагниченностью указывает на отрицательный знак магнитострикции насыщения, уменьшение объёмной доли доменов с ортогональной намагниченностью – на положительный знак магнитострикции насыщения.

3. На основании изучения механизмов контролируемой кристаллизации в сплавах системы Fe-Cu-Nb-Si-B установлено, что для достижения высоких динамических магнитных свойств (действительной части магнитной проницаемости не менее 2500 в диапазоне частот до 1 МГц и не менее 1000 в диапазоне частот до 5 МГц) оптимальное содержание меди находится в диапазоне концентраций 1,5-3,2 масс.%, что обеспечивается аморфно-нанокристаллической структурой с размером нанокристаллитов 15-20 нм.

4. Выявлены особенности температурно-временной стабильности лент аморфных сплавов на основе кобальта в диапазоне температур от -60 до +150 °С. Экспериментально установлено, что при длительных выдержках при температурах более 100 °С происходит стабилизация доменных границ, затрудняющая процессы намагничивания и снижающая магнитную проницаемость. Также установлено, что при таком воздействии не происходит объёмной кристаллизации ленты, а повторный отжиг ленты позволяет восстановить свойства до уровня, близкого к состоянию до длительной выдержки при температурах 100-150 °С.

Научная новизна работы подтверждена полученными патентами РФ № 2530076 и № 2529494 на изобретения.

Практическая значимость работы:

Диссертация выполнялась в рамках выполнения работ по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.625.21.0018 от 28.11.2014 г. с Минобрнауки РФ.

По результатам работы получен металлополимерный экран, для которого установлено, что при комплексном воздействии климатических факторов (переменных температур в диапазоне от -60 до +60 °С, повышенной влажности, агрессивной среды морской атмосферы) в лабораторных и природных условиях коэффициент экранирования $K_{\text{экр}}$, несмотря на снижение порядка 30-50 %, остаётся высоким и составляет не менее 30, что превышает значения для многих традиционных материалов и позволяет использовать его в условиях агрессивных воздействий, а также разрабатывать рекомендации по условиям его эксплуатации. Установлено, что воздействие температуры в диапазоне от -60 до +60 °С при

отсутствии остальных факторов не приводит к существенной деградации магнитных свойств в течение длительного времени.

Полученный металлополимерный экран со стабильными магнитными и экранирующими свойствами был успешно опробован в ООО «НИИ «Севкабель», АО «НПП «Исток» им. Шокина» и ГНЦ РФ ИМБП РАН. Лабораторные испытания также показывают конкурентоспособность экрана по сравнению с зарубежными аналогами, такими как MS-F (Hitachi, Япония) и позволяют говорить о перспективе расширения спроса как на отечественном, так и на зарубежном рынке экранирующих материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Корреляционная зависимость максимальной магнитной проницаемости μ_{\max} от доли доменов с ортогональной намагниченностью $V_{\text{орт}}$, которая позволяет проводить расчёт оптимальной температуры и длительности изотермической выдержки для достижения наибольших значений магнитной проницаемости.

2. Способ определения знака магнитострикции насыщения посредством обработки поверхности лент аморфных сплавов водой или водяным паром.

3. Основные закономерности влияния содержания меди от 0 до 3,2 масс. % в сплавах системы Fe-Cu-Nb-Si-B на процессы кристаллизации и динамическую магнитную проницаемость.

Степень достоверности результатов

Обеспечивается использованием для исследований аттестованного аналитического оборудования, воспроизводимостью полученных результатов, корреляцией результатов с результатами других исследователей. Достоверность и эффективность предложенных технических решений подтверждается успешной эксплуатацией образцов готовых изделий в области экранирования силовых кабелей и для проведения медико-биологических исследований влияния гипогеомагнитных полей.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии», ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2010 г., 2012 г., 2013 г., 2015 г., 2016 г.; 2-ая Всероссийская школа-семинар по конструкционным наноматериалам, НИТУ «МИСиС», Москва, 2011 г.; XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, Волгоград, ИУНЛ ВолгГТУ, 2011 г.; Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества «СПФКС», ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, 2012 г., 2013 г.; Всероссийская молодёжная научная конференция «Инновации в материаловедении», ИМЕТ РАН, Москва, 2013 г.; Физические свойства металлов и сплавов: VII всероссийская научно-техническая конференция, Екатеринбург, 2013 г.; Байкальская международная конференция «Магнетизм. Магнитные наноматериалы», Иркутск, 2014 г., 2016 г., Международная конференция с элементами научной Школы для молодёжи «Функциональные Наноматериалы и Высокочистые

Вещества» (ФНМ), Суздаль, 2014 г., 2016 г.; Национальная молодёжная научная школа для молодых учёных, аспирантов и студентов старших курсов по современным методам исследований наносистем и материалов «Синхротронные и нейтронные исследования» (СИН-нано), Москва, 2015 г.; International Baltic Conference on Magnetism, IBСM, Светлогорск, 2015 г.

Личный вклад автора заключается в проведении комплексных экспериментальных, технологических и диагностических исследований по влиянию режимов термической обработки на распределение намагниченности и магнитные свойства лент сплавов систем Co-Ni-Fe-Cr-Si-B и Fe-Cu-Nb-Si-B; разработке метода определения знака магнитострикции насыщения лент сплавов системы Co-Ni-Fe-Cr-Si-B на основе анализа влияния водяного пара или воды на их поверхность; проведении исследований по определению степени влияния полимерного покрытия на магнитные свойства изучаемых сплавов и усовершенствованию режимов его нанесения для сохранения максимального уровня свойств.

Автором лично проведены исследования по выявлению стадий контролируемой кристаллизации сплавов системы Fe-Cu-Nb-Si-B при различном содержании меди и их связи со статическими и динамическими магнитными свойствами.

Лично автором даны рекомендации по пределам применимости исследуемых сплавов и металлополимерных экранов на основе проведённых испытаний материалов в условиях комплексного воздействия эксплуатационных факторов (переменные температуры, повышенная влажность, агрессивная среда).

Лично автором подготовлены материалы для подачи заявок на патенты на изобретения и подготовлены статьи и доклады по теме диссертации.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 29 работ, в том числе 6 в рецензируемых изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, 2 патента на изобретение (РФ), 18 докладов в материалах российских и международных конференций.

Структура и объем работы

Диссертация объемом 175 страниц состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, обозначений и сокращений, содержит 82 рисунка, 32 таблицы, 118 библиографических ссылок, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обозначена научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, в котором описано современное состояние исследований и разработок в области материалов для магнитного и электромагнитного экранирования технических и биологических объектов.

Определено, что аморфные и нанокристаллические сплавы на основе Co и Fe являются наиболее перспективными в области создания новых экранирующих материалов, а наиболее эффективным способом получения требуемых значений магнитных и экранирующих характеристик таких сплавов является термическая обработка, приводящая к релаксации внутренних закалочных напряжений и образованию нанокристаллической структуры.

Приведены наиболее перспективные направления применения экранирующих материалов, в том числе для создания радиоэкранирующих конструкций, эффективных в широком диапазоне частот. Обоснована необходимость изучения процессов контролируемой нанокристаллизации для расширения диапазона рабочих частот композиционных материалов на основе нанокристаллических магнитомягких сплавов.

Рассмотрены вопросы влияния эксплуатационных факторов, включающих переменные пониженные и повышенные температуры, воздействие химически активных сред и показаны проблемы нестабильности магнитных свойств аморфных и нанокристаллических сплавов при внешних воздействиях на них. Проведён обзор наносимых на ленты аморфных и нанокристаллических сплавов покрытий, которые применяются с целью защиты от воздействия агрессивных внешних факторов, однако они также могут оказывать непосредственное влияние на магнитные и экранирующие характеристики, приводя к их деградации. Отмечено, что необходимо изучить механизмы влияния покрытий на свойства ленты и разработать технологические режимы их нанесения, не приводящие к значительной деградации свойств.

Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе дано описание исходных материалов, методик исследования и оборудования, используемых для решения поставленных задач.

В ходе работ по разработке технологических подходов к получению стабильного уровня характеристик для изготовления эффективных магнитных экранов были выбраны ленты аморфных сплавов АМАГ-172, АМАГ-170 системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B с содержанием Ni от 4 до 12 масс.%, и АМАГ-200 системы Fe-Nb-Cu-Si-B с содержанием Cu от 0 до 3,2 масс. %, производства НИИМЭТ (г. Калуга).

На основе выбранных сплавов изготавливались рулонные металлополимерные экраны с применением полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) плёнки.

В работе использовались современные методы исследования структуры и свойств аморфных и нанокристаллических сплавов. В качестве одного из основных, согласно поставленным задачам, была использована методика по определению распределения намагниченности, предложенная и опубликованная Скулкиной Н.А. (ИЕНиМ УрФУ).

Распределение намагниченности определяли в рамках модели, в которой намагниченность ориентирована вдоль направлений, выделенных формой образца: вдоль и поперёк оси ленты в её плоскости и перпендикулярно плоскости ленты (рисунок 1а). Объёмные доли доменов с данными направлениями

намагниченности можно обозначить как V_{180} , V_{90} и $V_{орт}$, соответственно, при этом $V_{180} + V_{90} + V_{орт} = 100\%$. Их соотношение определяется путём анализа семейства петель гистерезиса и изменения остаточной магнитной индукции с ростом внешнего поля (рисунок 1б).

Намагничивание ферромагнитного материала идёт в несколько стадий: сначала преобладает смещение 180-градусных доменных границ (ДГ) как наиболее лёгкий с энергетической точки зрения процесс, затем наиболее существенный вклад вносит смещение 90-градусных ДГ и в более высоких полях намагничивание осуществляется преимущественно за счёт вращения векторов намагниченности.

Картина распределения намагниченности формируется под влиянием большого количества факторов, таких как, атомная структура, наличие кристаллографической анизотропии, внешних и внутренних механических напряжений, форма изделия.

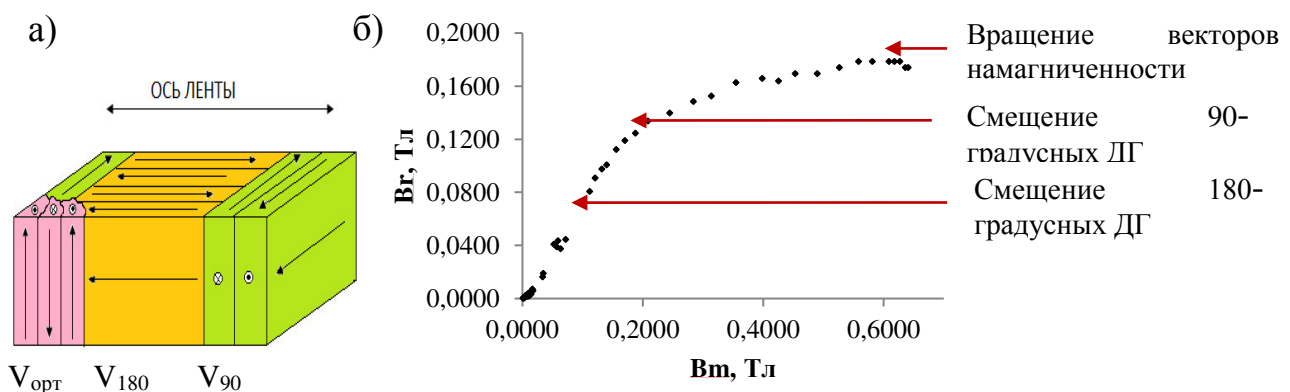


Рисунок 1 – Определение распределения намагниченности: а) схематичное изображение; б) анализ зависимости остаточной магнитной индукции от максимальной для сплава АМАГ-172

В тонких аморфных лентах с близкой к нулю магнитострикцией насыщения, в которых отсутствует кристаллографическая анизотропия, намагниченность в основном определяется анизотропией формы и направлена преимущественно вдоль оси ленты. Наблюдаемая ортогональная намагниченность в этом случае свидетельствует о наличии высокого уровня внутренних напряжений, вызванных сверхбыстрой закалкой из расплава. Соответственно, если для исследуемых материалов будет установлена корреляция между долей доменов с ортогональной намагниченностью и магнитной проницаемостью, то в этом случае она может быть использована в качестве основного при дальнейшем определении оптимального режима ТО.

В третьей главе изучено влияние термической обработки, воздействия воды и водяного пара, а также полимерного покрытия на магнитные свойства и характер изменения намагниченности в аморфных сплавах на основе кобальта системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B и установлено, что наиболее чувствительным параметром, отвечающим за высокие значения магнитной проницаемости является доля доменов с ортогональной намагниченностью, при этом данный параметр

значительно изменяется при воздействии на ленту водяным паром, что позволяет оперативно оценивать знак магнитострикции насыщения λ_s сплава.

По полученным экспериментальным данным магнитная проницаемость аморфных сплавов на основе кобальта имеет сложный характер зависимости от режимов термической обработки (ТО) (рисунок 2). Так, при температурах 200-250 °С существенных изменений в μ_{\max} сплава не наблюдается. При температурах 300-400 °С происходит резкий скачок значений с ярко выраженным максимумом. Максимум магнитных свойств наблюдается при ТО значительно ниже температуры кристаллизации $T_{\text{кр}}$, которая для исследуемых сплавов составляет 520-530 °С, согласно данным дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). При таких температурах ТО и исследованных длительностях выдержки сплав остаётся рентгеноаморфным, и для установления связи структуры с получаемыми свойствами необходимо исследовать характер распределения намагниченности.

На основе анализа распределения намагниченности установлено, что величина μ_{\max} зависит от доли доменов с ортогональной намагниченностью $V_{\text{орт}}$ (рисунок 3).

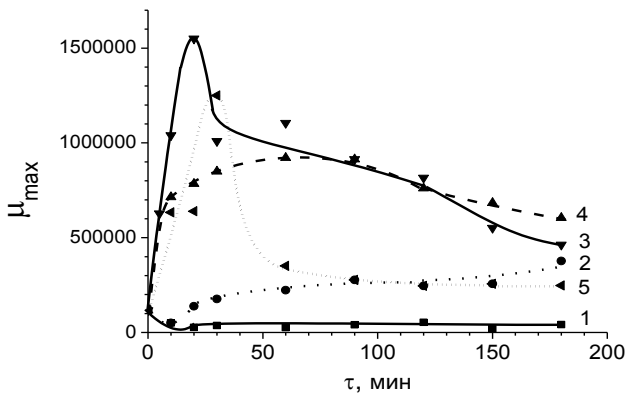


Рисунок 2 – Зависимость максимальной магнитной проницаемости от длительности изотермической выдержки при температурах обработки сплава АМАГ-172: 200, 250, 300, 350 и 400 °С (кривые 1, 2, 3, 4, и 5 соответственно). Точка $\tau=0$ соответствует исходному состоянию сплава.

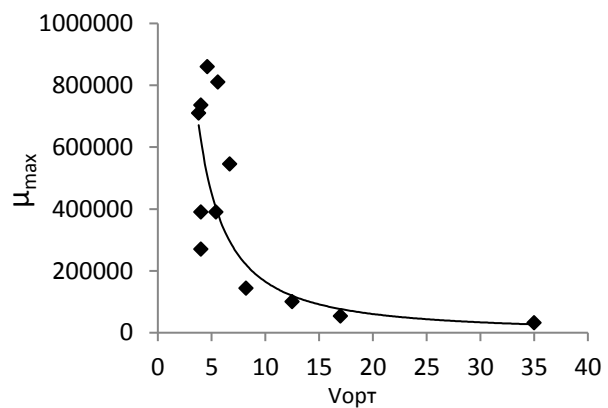


Рисунок 3 – Экспериментально полученная зависимость максимальной магнитной проницаемости от объемной доли доменов с ортогональной намагниченностью для сплава АМАГ-172

Данная зависимость принципиально схожа с зависимостью, полученной в работах Скулкиной Н.А. для аморфных сплавов на основе железа системы Fe-C-B-Si с положительной магнитострикцией насыщения, в которых показано, что при изменении $V_{\text{орт}}$ от 28 до 18 % μ_{\max} изменяется от $6 \cdot 10^3$ до $12 \cdot 10^3$. В случае сплавов на основе кобальта видно более существенное влияние ортогональной намагниченности на μ_{\max} : снижение $V_{\text{орт}}$ от 35 до 5 % приводит к увеличению μ_{\max} от $50 \cdot 10^3$ до $800 \cdot 10^3$, то есть более, чем на порядок. Таким образом, определяющим фактором в формировании магнитных свойств аморфных сплавов на основе кобальта, так же как и для сплавов на основе железа, является значение ортогональной намагниченности.

Варьированием температуры и длительности изотермической выдержки представляется возможным добиваться максимальных значений магнитных свойств.

Расчёт оптимального времени изотермической выдержки по формуле $\tau_{\text{опт}} = (V_{\text{орт}}/\alpha)^3$ для заданной температуры показал практически полное совпадение с экспериментом (рисунок 4). Таким образом, по данной методике представляется возможным рассчитать время ТО и для сплавов с различным содержанием Ni, содержание которого варьируется в пределах 4-12 масс.% в зависимости от плавки, при этом содержание Ni менее 9 масс.% ранее считалось браковочным признаком. Результаты исследования наглядно показывают, что в партиях с пониженным содержанием Ni возможно достичь практически таких же значений μ_{max} , что и в сплавах со стандартным содержанием (рисунок 4).

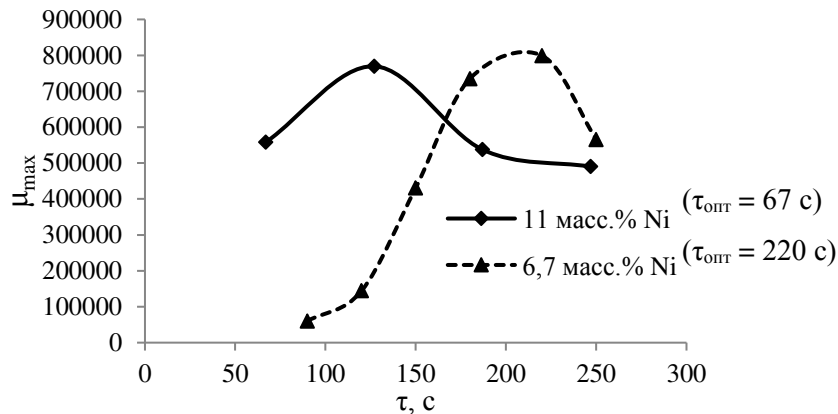


Рисунок 4 – Влияние длительности изотермической выдержки при 375 °С на магнитную проницаемость для партий АМАГ-172 с разным содержанием Ni.

Следует отметить, что помимо партий с пониженным содержанием никеля существуют партии, соответствующие требованиям по составу, однако также показывающие низкие значения μ_{max} после экспериментально подобранных режимов ТО. Это может быть связано с тем, что ленты, оставаясь рентгеноаморфными, могут обладать различной магнитной структурой, то есть распределением намагниченности, в результате изменений в технологических режимах при получении ленты.

Поэтому были выбраны образцы из различных партий с одинаковым содержанием никеля и различным значением $V_{\text{орт}}$ в исходном состоянии, для них были рассчитаны длительности изотермической выдержки для выбранных температур и проведена ТО по назначенному режиму (таблица 1). Видно, что в результате отжига получены высокие значения максимальной и начальной магнитной проницаемости образцов. Различие значений μ_{max} в этом случае составило около 6%, что можно считать несущественным для большинства практических применений.

Таблица 1 – Магнитные характеристики образцов ленты АМАГ-172 в исходном (закаленном) состоянии и после термообработки на воздухе.

Серия	Состояние ленты	T _{ТО} , °С,	t _{опт} , с	μ ₀	μ _{max}	V _{орт} , %	V ₁₈₀ , %	V ₉₀ , %
I	Исх	-	-	13 000	32000	35	30	35
	ТО	400	780	48 000	860000	4,6	84	11
II	Исх	-	-	5 000	144000	8,2	77	15
	ТО	380	40	36 000	810000	5,6	82	12

Благодаря подобранной посредством расчёта длительности изотермической выдержки ТО, магнитная проницаемость образцов достигает значений порядка 800 000, что является значимым результатом для дальнейшего использования материала в магнитных экранах.

Одним из параметров ТО на воздухе является воздействие паров воды, присутствующих в атмосфере, и способных повлиять на распределение намагниченности в объёме ленты из-за её высокой чувствительности к различным внешним воздействиям. Были проведены исследования влияния направленного воздействия водяного пара на поверхность ленты на распределение намагниченности по её объёму. Перед этим образцы подвергались ТО с длительностями изотермической выдержки, соответствующими рассчитанным значениям, а также ниже, выше и значительно выше рассчитанной. Ленты, прошедшие ТО, далее обрабатывались водяным паром атмосферного давления с температурой в зоне воздействия 95 °С в течение 10 минут. После обработки паром сразу проводился анализ распределения намагниченности. Наиболее значимые результаты представлены таблице 2, где показаны два принципиально разных характера изменения V_{орт} при разных режимах ТО.

Таблица 2 – Распределение намагниченности ленты АМАГ-170 в зависимости от обработки

Состояние ленты	V _{орт} , %	V ₁₈₀ , %	V ₉₀ , %	V ₁₈₀ / V ₉₀
ТО на воздухе при 380 °С с длительностью изотермической выдержки, существенно превышающей оптимальную (40 мин)				
Исходное (через 40 дней после ТО)	67	20	13	1,6
Сразу после обработки паром	11,5	73	15	4,9
Через 2 дня после обработки паром	15,0	64	21	3,0
ТО на воздухе при 380 °С с оптимальной длительностью изотермической выдержки (2 мин)				
ТО	8,8	70	21	3,3
Непосредственно после обработки паром	11,0	74	14,9	5,0
Через 2 дня после обработки паром	8,8	76	15,2	5,0

Из таблицы 2 видно, что обработка паром ленты, прошедшей ТО на воздухе при 380 °С в течение 40 мин, приводит к уменьшению V_{орт}. Согласно работам Скулкиной Н.А., при химическом взаимодействии поверхности аморфной ленты с водород- и кислород содержащей средой происходит перераспределение

намагниченности за счёт создаваемых дополнительных растягивающих напряжений в плоскости ленты. Видно, что в данном случае намагниченность переориентируется в плоскость ленты, в направлении растягивающих напряжений, индуцированных внедрёнными атомами водорода и кислорода. Следовательно, формируется состояние с положительной магнитострикцией насыщения.

В случае ТО с длительностью 2 мин $V_{орт}$ после обработки паром, наоборот, увеличивается. Поскольку намагниченность ориентируется перпендикулярно растягивающим напряжениям, индуцированным взаимодействием с водяным паром, то можно заключить, что в данном состоянии лента обладает отрицательной магнитострикцией насыщения. Также во всех случаях можно отметить, что через 2 дня эффект изменения $V_{орт}$ несколько уменьшается, что можно объяснить частичным выходом внедрённых атомов.

При обработке водой комнатной температуры в течение 10 минут эффект изменения $V_{орт}$ остаётся принципиально тем же и также зависит от знака λ_s .

Взаимодействие воды и водяного пара с поверхностью ленты было подтверждено анализом массового содержания кислорода методом восстановительного плавления в графитовом тигле в токе несущего газа в печи сопротивления, позволяющего определять содержание кислорода в диапазоне 0,00002-3,0 масс.% с относительной погрешностью $\pm 1\%$. Результаты определения содержания кислорода в образцах в зависимости от их состояния представлены на рисунке 5, из которого видно, что кратковременное воздействие воды или водяного пара приводит к увеличению содержания кислорода на 15-25 % по сравнению с состоянием сразу после ТО, что говорит о его внедрении в ленту при образовании тонких оксидных плёнок на поверхности в результате химического взаимодействия.

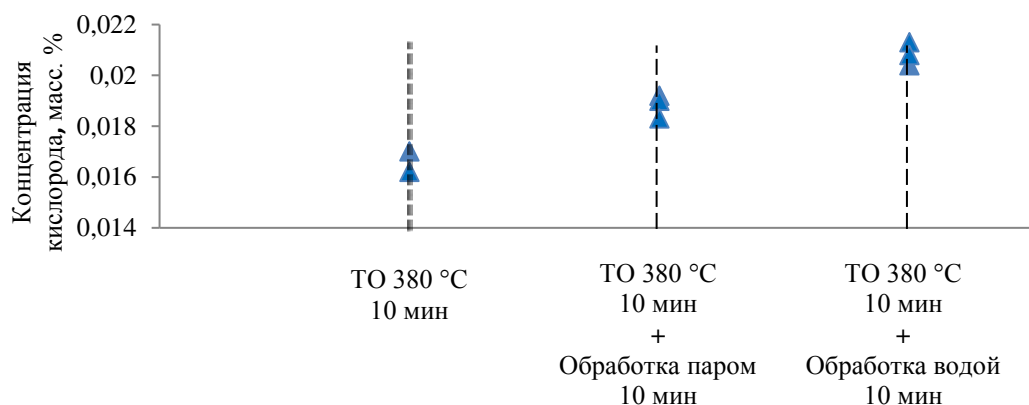


Рисунок 5 – Зависимость содержания кислорода в сплаве АМАГ-172 от вида обработки.

Таким образом, направленное воздействие водяного пара или воды на поверхность аморфных сплавов на основе кобальта может служить в качестве метода определения знака λ_s , с помощью которого была установлена смена знака λ_s после различных режимов ТО, приводящих к изменению структурного состояния.

Знание знака λ_s важно при прогнозировании поведения аморфной ленты в готовом экране в условиях эксплуатации, когда на неё могут влиять внешние

факторы, предполагающие механическое воздействие. Установленное влияние пара и воды имеет принципиальное значение, так как при воздействии полимерного покрытия могут индуцироваться напряжения, и знание знака λ_s поможет понять изменение магнитной проницаемости при этом.

Влияние технологического полимерного покрытия на распределение намагниченности и магнитные свойства ленты после термической обработки было рассмотрено на примере ПЭТФ-плёнки, наносимой на сплав АМАГ-172.

Для этого были выбраны образцы, состояние которых отличалось знаком λ_s . Например, после ТО на воздухе при 380 °С в течение $\tau=10$ мин формируется состояние с $\lambda_s < 0$, а при $\tau = 40$ мин – $\lambda_s > 0$.

Полимерное покрытие формируется на металлической ленте при нагреве исходного полимера в диапазоне температур 90-130 °С в присутствии кратковременного прессующего давления порядка 1-4 МПа в зависимости от режима нанесения. При охлаждении ленты с нанесенным полимерным покрытием происходит его усадка, соответствующая относительной деформации до 1 %, что приводит к индуцированию в плоскости ленты сжимающих напряжений.

Прессующее давление, оказываемое на ленту при 90 °С, само по себе приводит к перераспределению намагниченности. В состоянии с $\lambda_s < 0$ увеличивается $V_{орт}$, что является причиной соответствующего снижения μ_{max} . При $\lambda_s > 0$ некоторое увеличение μ_{max} является следствием уменьшения $V_{орт}$ (таблица 3).

Таблица 3. Влияние прессующего давления и полимерного покрытия на магнитные характеристики лент сплава АМАГ-172

ТО	380 °С 10 мин ($\lambda_s < 0$)		380 °С 40 мин ($\lambda_s > 0$)	
	μ_{max}	$V_{орт}, \%$	μ_{max}	$V_{орт}, \%$
Исходное состояние	520000	18,0	250000	62
Прессующее давление	400000	23,2	310000	15
Полимерное покрытие	280000	17	254000	24

Сжимающие напряжения, индуцированные полимерным покрытием, анизотропны: в состоянии ленты с $\lambda_s > 0$ они способствуют увеличению объема доменов с планарной намагниченностью, ориентированной поперек оси ленты (таблица 4), что также следует из рисунка 6, на котором представлена доменная структура поверхности с полимерным покрытием (рисунок 6 б) и без покрытия (рисунок 6 а).

Таким образом, полимерное покрытие индуцирует плоские сжимающие напряжения, которые частично нивелируют действие прессующего давления и уменьшают степень его влияния. Тем не менее, снижение μ_{max} может быть связано с ростом внутренних напряжений и их градиентов, способствующих стабилизации ДГ, а также перераспределением намагниченности в плоскости ленты.

Таблица 4. Влияние прессующего давления и полимерного покрытия на магнитные характеристики ленты после ТО при 350 °С, $\tau=15$ мин с $\lambda_s>0$.

Состояние ленты	μ_{\max}	$V_{\text{орт}}, \%$	$V_{180}, \%$	$V_{90}, \%$
ТО	400000	28,0	56	16,4
Прессующее давление	380000	18,5	43	38
Полимерное	231000	28	29,0	43

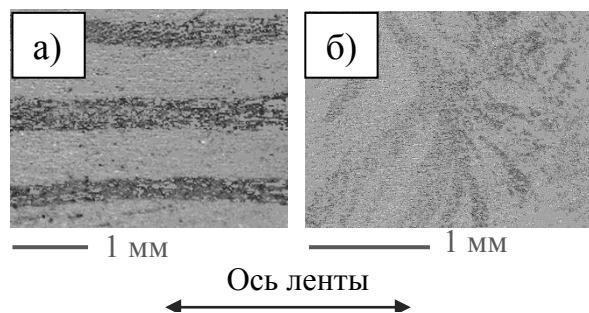


Рисунок 6 – Вид поверхностной доменной структуры, полученный с использованием эффекта Керра, образцов ленты аморфного сплава системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B размерами 15×10×0,020 мм после ТО по режиму 350 °С, 40 мин а) без покрытия; б) с полимерным покрытием.

Проведённые исследования показывают, что изучение механизмов формирования магнитных свойств в аморфных сплавах на основе кобальта при воздействии различных технологических факторов, например, таких как прессующие давления и формирование полимерных покрытий, позволяет оптимизировать режимы обработки исходной ленты, обеспечивающие требуемый уровень магнитных и экранирующих свойств.

В четвертой главе изучено влияние термической обработки на формирование статических и динамических магнитных свойств в нанокристаллических сплавах на основе железа системы Fe-Nb-Cu-Si-B в зависимости от содержания меди и установлено, что высокочастотные магнитные свойства менее чувствительны к содержанию меди, чем статические.

Как показано в работах Y. Yoshizawa, K. Hono, G. Herzer, А.М. Глезера, в сплавах типа FINEMET системы Fe-Cu-Nb-Si-B формирование высоких магнитных свойств при термической обработке происходит за счёт образования и роста нанокристаллов α -Fe(Si) на кластерах меди. В связи с этим, при различном содержании меди в сплаве будет достигаться различное соотношение аморфной и кристаллической фаз, что и отразится на магнитных свойствах. Полученные зависимости статической максимальной магнитной проницаемости от ТО в целом не противоречат опубликованным ранее работам, согласно которым её наибольшие значения достигаются при ТО выше $T_{\text{кр}}$: в интервале 510 – 550 °С. Однако зависимости динамической магнитной проницаемости (рисунок 7) показывают различие в свойствах исходных лент до 30 % и не могут быть объяснены только различием в температурах кристаллизации, а требуют учета других составляющих.

Сплавы системы Fe-Cu-Nb-Si-B кристаллизуются в несколько стадий, что подтверждается проведёнными исследованиями методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК): первичная кристаллизация протекает при температурах 520-540 °С, вторичная кристаллизация – при температурах 600-680 °С, в зависимости от содержания меди. При этом наибольшее отличие показывают сплавы

без меди: на их ДСК-кривых присутствует только один пик, площадь которого значительно больше, чем для остальных сплавов, а температура начала превращения сдвинута в область более высоких температур на 60-70 °С. Это говорит об отсутствии центров кристаллизации в исходном состоянии ленты.

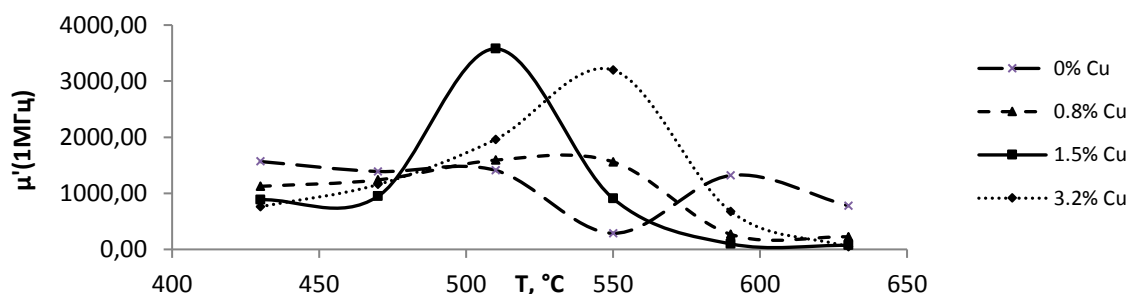


Рисунок 7 – Зависимость магнитной проницаемости на частоте 1 МГц от температуры отжига после выдержки 30 мин для сплава АМАГ-200 с различным содержанием меди.

Проведённые исследования сплава, содержащего 1,5 масс. % Cu, методом дифракции синхротронного излучения выявили выделение в аморфной матрице на начальных стадиях кристаллизации фазы $\text{Cu}_3\text{Fe}_{17}$. Согласно анализу дифракционных колец (рисунок 8) далее кристаллизуются фазы, близкие по составу к Fe_3Si и Fe_3Si_2 , что и приводит к образованию первого теплового пика на ДСК-кривой, соответствующего первичной кристаллизации, при этом второй пик, соответствующий вторичной кристаллизации, смещается в область более высоких температур по сравнению со сплавами, не содержащими медь и кристаллизующимися в одну стадию. Согласно работам К. Ноно в аморфной матрице сплавов системы Fe-Nb-Si-V на этой единственной стадии кристаллизации одновременно выделяются фаза типа Fe_3Si и бориды. Данный факт подтверждается проведённым рентгеноструктурным анализом. В образцах, не содержащих медь, после термообработки при 590 °С с помощью проведённых исследований методом рентгеновской дифракции были обнаружены кристаллы химического состава, близкого к Fe_{23}V_6 . Средний размер кристаллитов Fe_{23}V_6 составлял порядка 13 нм. При добавлении меди температуры кристаллизации значительно изменяются. И кристаллизация фазы Fe_3Si происходит при более низкой температуре, а боридов – при более высокой.

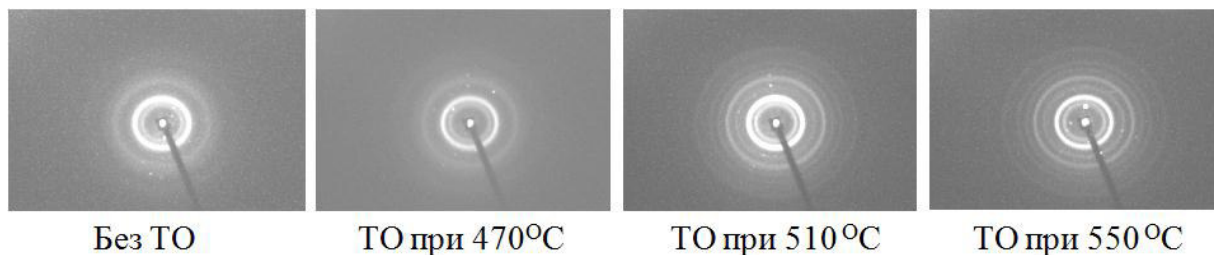


Рисунок 8 – Дифрактограммы образцов АМАГ-200 при разных температурах термической обработки, полученные на накопителе Сибирь-2, канал 6.2.

Бориды в сплаве с 3,2 % меди не кристаллизуются даже при температурах термообработки 590 °С, что подтверждает результаты ДСК. Повышение температуры приводит к появлению новых центров кристаллизации и росту ранее образовавшихся кристаллитов. Кинетика роста также различна для сплавов с различным содержанием меди (рисунок 9). Полученные зависимости показывают, что присутствует значительный рост среднего размера кристаллита после термической обработки при 550 и 590 °С образцов с 0 и 0,8 масс. % меди, соответственно. В то же время рост объёмного содержания кристаллической фазы меньше, чем в образцах с 1,5 и 3,2 % меди. Данный факт указывает на то, что скорость образования кристаллитов в первых образцах недостаточна из-за низкого содержания меди.

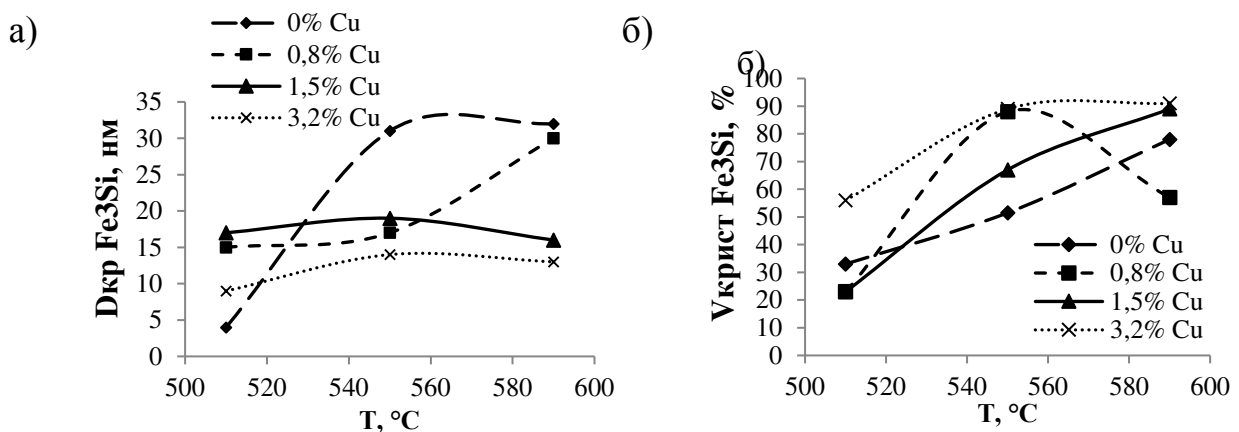


Рисунок 9 – Влияние термической обработки на а) средний размер кристаллитов $D_{кр}$; б) объёмную долю кристаллической фазы в аморфной матрице; время выдержки 30 мин.

По проведённым исследованиям можно утверждать, что формирование высокой магнитной проницаемости – это результат комплексного влияния размера кристаллитов Fe_3Si и их объёмного содержания. Статическая магнитная проницаемость достигает значений порядка 10^6 только при содержании 1,5 масс.% меди и ТО при 510-530°С. Динамическая магнитная проницаемость достигает значений 3200-3500 при содержании меди в интервале от 1,5 до 3,2 масс.% и ТО при 500-550°С. Следовательно, можно утверждать, что для высокочастотного применения сплава целесообразно вводить в сплав меди несколько больше, чем 1,5 масс. %.

Интересным представляется результат, полученный для образцов без меди. Термическая обработка при 510, 590 и 630 °С приводит к значениям $\mu(1МГц)$ порядка 800-1500, однако ТО при 550 °С происходит резкое снижение $\mu(1МГц)$ до уровня порядка 100. Данное явление может быть связано с резким ростом размеров кристаллитов в аморфной матрице и этот рост крайне неравномерный, что может негативно влиять на μ . Последующее выравнивание объёмного содержания кристаллической фазы приводит к некоторому повышению μ . Стоит отметить, что в случае динамической магнитной проницаемости бориды, по-видимому, не вносят вклад в её формирование.

Процессы кристаллизации в образцах с медью приводят к снижению свойств после ТО при температурах выше 550 °С из-за большого количества кристаллической фазы в аморфной матрице и нарушению обменных магнитных взаимодействий. Также можно отметить, что слабое влияние изменения содержания меди от 1,5 до 3,2 масс.% на динамическую магнитную проницаемость может в некоторой степени объясняться проявлением скин-эффекта, при котором значительную роль играет структура поверхности. Получение в данном случае стабильных динамических свойств позволяет применять эти сплавы в широкополосном радиоэкранировании, в частности, использовать в качестве исходного материала для изготовления порошкового наполнителя металлополимерных композитов

В пятой главе рассмотрены вопросы температурно-временной стабильности лент кобальтовых аморфных сплавов в диапазоне температур от -60 до +150 °С и образцов металлополимерных экранов на их основе и выявлены особенности изменения их свойств при воздействии климатических факторов.

При исследовании изменения максимальной магнитной проницаемости в зависимости от температуры показано наличие необратимых изменений в магнитных свойствах при повышенных температурах эксплуатации. Так, увеличение температуры до 150 °С вызывает резкое уменьшение μ_{\max} (рисунок 10а). При уменьшении температуры до комнатной значение максимальной магнитной проницаемости не возвращается к исходному и продолжает снижаться при повторном повышении температуры.

Ход кривых намагничивания и зависимость максимальной магнитной проницаемости от длительности изотермической выдержки при 150 °С показывают, что при нагревании и последующей изотермической выдержке наблюдается снижение μ_{\max} . (рисунок 10б). Последующее охлаждение до 20 °С не приводит к возвращению значений максимальной магнитной проницаемости к первоначальным (кривые 2 и 5, рисунок 10б). Однако бросает на себя внимание тот факт, что при повторной ТО поля намагничивания снова уменьшаются, практически до исходных значений (кривая 6 на рисунке 10б). Это свидетельствует об отсутствии объёмной кристаллизации в ленте.

По виду полученных кривых намагничивания можно сказать, что прямолинейные участки, отвечающие за процессы необратимого смещения ДГ, для разных случаев параллельны между собой, что говорит об одном и том же механизме смещения ДГ. Однако начальные участки, отвечающие за обратимое смещение ДГ, различаются в исследованных состояниях. При увеличении длительности выдержки с 1 до 500 ч. (ср. кривые 3 и 4 на рисунке 10б) процессы обратимого смещения ДГ имеют место в более широком интервале полей, вплоть до 1 А/м. Обратимое смещение характеризуется тем, что при снятии внешнего магнитного поля ДГ возвращаются в исходное положение и образец переходит в размагниченное состояние. Таким образом, при длительных выдержках при повышенных

температурах происходит стабилизация ДГ, что затрудняет процессы намагничивания и, как следствие, приводит к снижению магнитной проницаемости.

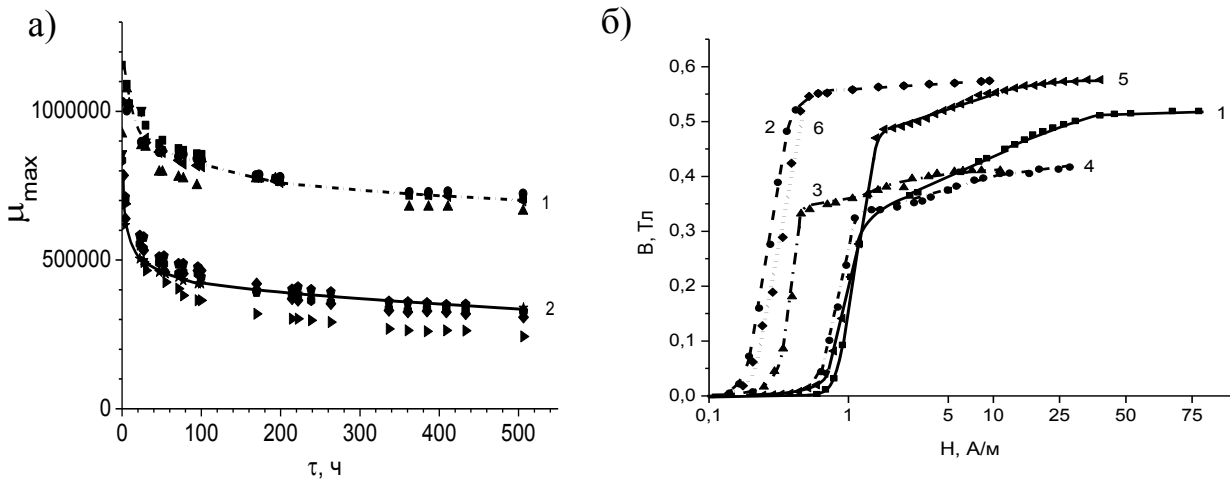


Рисунок 10 – Зависимость магнитных свойств аморфного сплава Co-Ni-Fe-Cr-Si-B от режимов термической обработки и режимов старения:

а) зависимость максимальной магнитной проницаемости отожженных образцов от длительности изотермической выдержки при 100 (кривая 1) и 150 °С (кривая 2)

б) Кривые намагничивания образцов ленты аморфного сплава Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B в исходном закаленном состоянии (1), после ТО (2), после ТО и выдержки при 150°С в течение 1 часа (3) и 500 часов (4), после охлаждения до комнатной температуры (5) и после вторичной ТО (6), измеренные при 20°С (кривые 1, 2, 5, 6) и при 150°С (кривые 3 и 4).

В диапазоне температур от -60 до +60°С, являющимся достаточно широким для большинства реальных применений экранов, такой значительной деградации магнитных свойств в течение 1080 часов не наблюдается (рисунок 11).

Полученный результат является важным для назначения допустимых условий эксплуатации экранов.

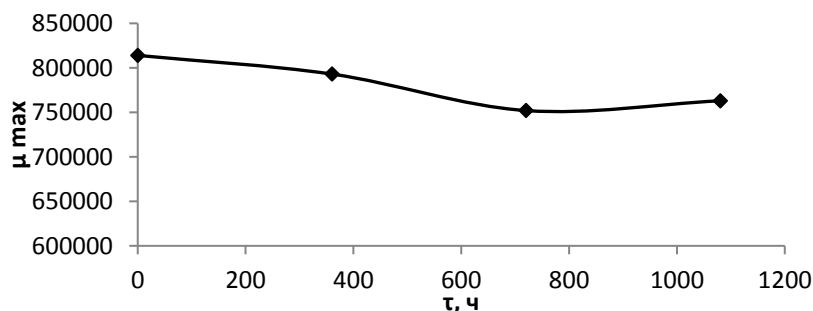


Рисунок 11 – Зависимость максимальной магнитной проницаемости образцов аморфного сплава Co-Ni-Fe-Cr-Si-B от времени выдержки при воздействии переменной температуры в диапазоне от -60 до +60°С.

Впервые проведены климатические испытания металлополимерных экранов на основе лент аморфных магнитомягких кобальтовых сплавов, включающие лабораторные (на базе НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей») и натурные испытания в Геленджикском центре климатических испытаний им.

Г.В. Акимова ФГУП ВИАМ. Установлено, что комплексное воздействие переменных температур, повышенной влажности, сернистого газа и солевого тумана приводит к общему снижению коэффициента экранирования (рисунок 12). Поскольку данная характеристика нелинейна и зависит от внешнего магнитного поля, то за анализируемую величину $K_{\text{экр}}$ было принято его максимальное значение

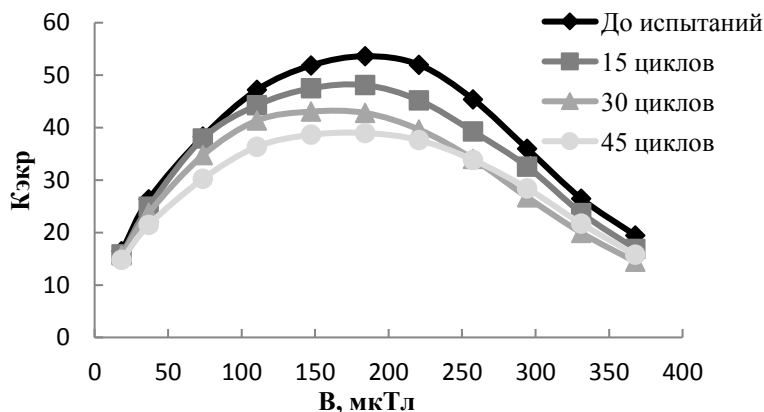


Рисунок 12 – Зависимости коэффициента экранирования $K_{\text{экр}}$ металлополимерного экрана от индукции внешнего магнитного поля в ходе лабораторных климатических испытаний.

Таким образом, согласно анализу полевых зависимостей коэффициента экранирования, его снижение к концу испытаний составило 30-50 %. (таблицы 5 и 6). При этом, в отличие от натуральных испытаний, после которых явно присутствуют следы коррозии с поражением до порядка 30 % поверхности, лабораторные климатические испытания приводят к снижению коэффициента экранирования без видимых коррозионных повреждений.

Таблица 5 – Значения коэффициента экранирования $K_{\text{экр}}$ образцов металлополимерного экрана на основе сплава АМАГ-172 в ходе лабораторных климатических испытаний

Продолжительность испытаний, ч	$K_{\text{экр}}$
До испытаний	54
360	51
720	43
1080	39

Таблица 6 – Значения коэффициента экранирования $K_{\text{экр}}$ образцов металлополимерного экрана на основе сплава АМАГ-172 до и после 1 года натуральных испытаний

	$K_{\text{экр}}$
До испытаний	59
После испытаний	31

Данное явление может свидетельствовать о том, что помимо непосредственно агрессивной среды на экранирующие свойства может оказывать влияние взаимодействие полимерной плёнки и аморфной ленты, составляющих металлополимерный магнитный экран, в условиях переменных температур и наличия влажности, а также указывать на сложное комплексное воздействие климатических

факторов на основную функциональную характеристику экранов – коэффициент экранирования. При этом в жёстких условиях испытаний $K_{\text{экр}}$ остался на уровне 30, что является значимым результатом по сравнению со многими традиционными материалами и позволяет использовать экраны в жёстких условиях эксплуатации с принятием соответствующих коэффициентов запаса, а также мер, способствующих ограничению воздействия агрессивных факторов среды.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что определяющим фактором в формировании магнитных свойств аморфных сплавов системы Co-Ni -Fe-Cr-Mn-Si-B является доля доменов с ортогональной намагниченностью. Снижение $V_{\text{орт}}$ от 35 до 5 % позволяет повысить максимальную магнитную проницаемость от 50 000 до 800 000, то есть более, чем на порядок.

2. На основе экспериментальных данных показано, что за счёт применения разработанных режимов термической обработки получены высокие значения максимальной магнитной проницаемости не менее 800 000 после термической обработки сплава АМАГ-172, обеднённого никелем, а также в разном исходном напряжённом состоянии, что позволит снизить количество брака по составу при приёмке ленты.

3. Экспериментально показано, что при кратковременном воздействии воды на ленту аморфных сплавов системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B происходит химическое взаимодействие с поверхностью ленты, при этом содержание кислорода в сплаве возрастает на 15-25 % по сравнению с состоянием после термической обработки.

4. Экспериментально установлено, что взаимодействие с химически активной средой (водой или водяным паром) вызывает изменение распределения намагниченности по объёму лент аморфных сплавов системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B. При этом выявлено, что характер изменения принципиально различается для лент, прошедших термическую обработку по разным режимам: в одних случаях доля доменов с ортогональной намагниченностью несколько уменьшается, в других, наоборот, увеличивается, что свидетельствует о смене знака магнитострикции насыщения в зависимости от получаемого в результате термической обработки структурного состояния ленты исследуемых сплавов.

5. Установлено, что при нанесении полимерного покрытия на аморфную ленту на основе кобальта индуцируются поверхностные напряжения, вызванные усадкой, что является основной причиной снижения магнитной проницаемости ленты. Степень снижения максимальной магнитной проницаемости различна для состояний с разным знаком магнитострикции насыщения. Наименьшая степень снижения имеет место для состояния с положительной магнитострикцией насыщения в результате наличия сжимающего напряжения перпендикулярно плоскости ленты, возникающего в технологическом процессе нанесения покрытия и приводящего в этом случае к перераспределению намагниченности в плоскость ленты, частично

компенсируя действие усадочных напряжений. Определены режимы термической обработки аморфной ленты, приводящие к состоянию с положительной магнитоотрицательной насыщением и минимальному (менее 20 %) снижению магнитной проницаемости ленты с покрытием.

6. Выявлено изменение вида поверхностной доменной структуры лент сплава системы Co-Ni-Fe-Cr-Mn-Si-B при нанесении полимерного покрытия. При этом показано перераспределение намагниченности под действием индуцированных покрытием напряжений, что подтверждает полученные расчётные данные.

7. Посредством изучения процессов кристаллизации аморфного сплава системы Fe-Cu-Nb-Si-B определено, что для обеспечения контролируемой кристаллизации с получением нанокристаллического состояния необходимо присутствие меди, кластеры которой являются центрами кристаллизации в сплавах типа Finemet. Получение нанокристаллического состояния позволило достичь значений действительной части динамической магнитной проницаемости не менее 2500 в диапазоне частот до 1 МГц и не менее 1000 в диапазоне частот до 5 МГц. При этом оптимальное содержание меди находится в более широком диапазоне концентраций – 1,5-3,2 масс.%, что позволяет применять партии с достаточно большим разбросом по исходному химическому составу. Однако статические магнитные свойства показывают большую чувствительность к содержанию меди. Наибольшие значения максимальной магнитной проницаемости, составляющие порядка 10^6 достигаются при содержании меди 1,5 масс. %.

8. Показано, что температуры эксплуатации от -60 до $+60$ °C существенно не влияют на магнитные свойства лент АМАГ-172. Это позволяет длительно использовать материал в данном температурном интервале. Тем не менее, повышение рабочей температуры до 100 °C и выше при длительных выдержках приводит к снижению максимальной магнитной проницаемости сплава, что ограничивает применимость материала при этих температурах. Полученные результаты по изменению магнитных свойств исследуемого сплава в зависимости от температуры и длительности изотермической выдержки могут быть использованы для прогнозирования их изменения при эксплуатации магнитных экранов.

9. Обнаружена тенденция к снижению коэффициента экранирования готовых экранов на основе сплава АМАГ-172 при комплексном воздействии климатических факторов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает искреннюю благодарность за помощь и поддержку, оказанную при работе над диссертацией на всех этапах исследований, Борису Владимировичу Фармаковскому, к.т.н., доценту, учёному секретарю НИЦ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей» и Надежде Александровне Скулкиной, д.ф.-м.н., профессору, старшему научному сотруднику ИЕНиМ УрФУ.

Основные результаты диссертационной работы представлены в публикациях:

1. **Мазеева А.К.**, Кузнецов П.А. Влияние термической обработки на структуру и магнитные свойства аморфного сплава Co-Ni-Fe-Cr-Si-B и его термическая стабильность // **Физика металлов и металловедение**, 2016, Т.117, № 9, с. 887-894.

2. **Мазеева А.К.**, Каширина А.А., Геращенко Е.Ю. Новые композиционные материалы для эффективной защиты технических средств и персонала от электромагнитного излучения // **Изобретательство**, Т.16, № 8, 2016, с. 19-24.

3. **Мазеева А.К.**, Кузнецов П.А., Обыденных Н.Ф. Оценка влияния климатических факторов на коэффициент экранирования композиционных магнитных экранов на основе ускоренных испытаний // **Вопросы материаловедения**, 2011, № 1(65), с. 130-135.

4. Юранова Т.Ю., **Мазеева А.К.**, Мухамедзянова Л.В., Фурмон М.С., Кузнецов П.А., Пескова А.С. Исследование влияния содержания меди на высокочастотные и статические магнитные свойства сплава типа Finemet // **Вопросы материаловедения**, 2012, № 1(69), с. 52-58.

5. Скулкина Н.А., Иванов О.А., Степанова Е.А., Шубина Л.Н., Кузнецов П.А., **Мазеева А.К.** Механизмы формирования магнитных свойств аморфного магнитомягкого сплава на основе кобальта в результате термообработки на воздухе // **Физика металлов и металловедение**, 2015, Т.116, № 12, с. 1242-1249.

6. Скулкина Н.А., Иванов О.А., Степанова Е.А., Блинова О.В., Кузнецов П.А., **Мазеева А.К.** Влияние термообработки на воздухе и химически активной среды на магнитные свойства аморфных магнитомягких сплавов на основе кобальта // **Физика металлов и металловедение**, 2016, Т.117, № 10, с. 1015-1022.

7. N.A. Skulkina, O.A. Ivanov, E.A. Stepanova, L.N. Shubina, P.A. Kuznetsov, **A.K. Mazeeva** Mechanisms of the magnetic properties improvement of amorphous soft magnetic cobalt-based alloy as a result of heat treatment on air // **Physics Procedia**, 2016, № 82, 69 – 77

8. **Мазеева А.К.** Защита судового оборудования и экипажа от негативного воздействия электромагнитного излучения промышленной частоты с использованием нанокристаллических материалов на основе кобальта // **Сборник трудов Всероссийского конкурса «Молодой кораблестроитель – инженер года 2016»**. СПб.; АО «ЦТСС». 2016, с. 47-57.

9. **Мазеева А.К.**, Кузнецов П.А., Скулкина Н.А., Блинова О.В., Михалицына Е.А. Влияние полимерного покрытия на магнитные свойства аморфных сплавов на основе кобальта // **Сборник тезисов VII Байкальской международной конференции «Магнетизм. Магнитные наноматериалы»**, 22-26 августа 2016 г., Иркутск, с. 73-74.

10. **Мазеева А.К.**, Кузнецов П.А., Беляев А.Д. Исследование кристаллизации аморфных сплавов типа Finemet с помощью современных дифракционных методов // **Национальная молодежная научная школа для молодых ученых, аспирантов и**

студентов старших курсов по современным методам исследований наносистем и материалов "Синхротронные и нейтронные исследования" (СИН-нано-2015), Сборник аннотаций докладов, Москва, 06-11 июля 2015 г.

11. **Мазеева А.К.** Применение аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов на основе железа и кобальта для создания систем электромагнитной защиты // **Сборник трудов Всероссийской молодёжной научной конференции «Инновации в материаловедении»**, 3-5 июня 2013, ИМЕТ РАН, с. 194.

12. **Мазеева А.К.**, Рамалданова А.А., Яковлева Н.В., Бобкова Т.И., Геращенко Е.Ю., Фармаковский Б.В. Изучение наноструктурного состояния функциональных покрытий различного класса с помощью оперативных методов контроля // **Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов**, 2012, № 4, с.181-188.

13. **Мазеева А.К.**, Фармаковский Б.В., Кузнецов П.А., Самоделкин Е.А., Геращенко Е.Ю., Рамалданова А.А. Способ получения нанокристаллического порошка. Патент РФ № 2530076. Опубликовано 10.10.2014 г.

14. **Мазеева А.К.**, Фармаковский Б.В., Кузнецов П.А., Самоделкин Е.А., Геращенко Е.Ю., Рамалданова А.А. Многослойный композиционный материал для защиты от электромагнитного излучения. Патент РФ № 2529494.

Подписано в печать 13.07.2017 г. Формат 60 × 48 1/16.

Печать офсетная. Усл. п.л. 1,0. Уч.-изд.л. 1,5.

Тираж 90 экз. Заказ № 2/111

Отпечатано в типографии ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49

Лицензия на издательскую деятельность

Лр № 020644 от 13 октября 1997 г.