

На правах рукописи

Каримова Гульсина Витальевна

УДК 621.318.1, 53.082.78

**БИСТАБИЛЬНЫЙ ЛИТОЙ АМОΡФНЫЙ МИКРОПРОВОД
ИЗ Fe-, Fe-Co – СПЛАВОВ В СТЕКЛЯННОЙ ОБОЛОЧКЕ
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В МАГНИТОМЕТРИИ**

Специальность: 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ижевск – 2006

Работа выполнена в Ижевском государственном техническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Ломаев Гелий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Загребин Леонид Дмитриевич;
доктор физико-математических наук
Ильясов Рустам Сабитович

Ведущая организация: Институт прикладной механики УрО РАН

Защита состоится «30» июня 2006 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.275.03 при Удмуртском государственном университете по адресу: 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УдГУ.

Автореферат разослан «29» мая 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Крылов П.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С повышением требований к параметрам и эксплуатационным характеристикам современных измерительных приборов возникла потребность в новых датчиках магнитного поля. Успехи в этой области непосредственным образом связаны с созданием новых материалов. Перспективными в этом отношении стали бистабильные аморфные ферромагнетики, перемагничивающиеся одним или несколькими большими скачками Баркгаузена (БСБ). Однако интерес к ним не исчерпывается практической значимостью. Нужно отметить, что изучение свойств, процессов формирования бистабильности в аморфных ферромагнетиках (АФ) вносит немалый вклад в теорию ферромагнетизма и науку о металлах в целом. В области создания и применения в технике ферромагнетиков с БСБ, и частности, бистабильных, следует отметить работы российских ученых Жукова А.П., Лаврентьева А.Г., Ломаева Г.В., Мерзлякова Ю.М., Колачевского Н.Н., Ахизиной С.П., из Испании – Vazquez M., из Молдовы – Баранова С.А., Японии – Mohri K. и др.

Обычно для создания бистабильных свойств как аморфные, так и кристаллические материалы подвергают термообработке или пластической деформации. В случае литого аморфного микропровода в стеклянной оболочке (ЛАМСО) на основе *Fe- и Fe-Co-* сплавов, полученного по модифицированной технологии Улитовского-Тейлора, бистабильность создается в процессе изготовления. Основным достоинством материалов этого класса является возможность изготовления образцов с низкой коэрцитивностью (<70 А/м), что имеет важное значение при разработке датчиков магнитного поля.

При перемагничивании в образцах ЛАМСО происходят сложные процессы, обусловленные неоднородным распределением внутренних напряжений, которые влияют на важнейшие для технического применения характеристики, как, например, поле старта, амплитуда и длительность выходного импульса. Известно, что на механизм перемагничивания и параметры БСБ в образцах из микропровода влияет множество факторов: химический состав металлической жилы, режим обработки, технология изготовления, геометриче-

ские размеры и т.п., изучение которых позволит разработать способы их контроля и управления.

Цель диссертационной работы – изучить механизмы и динамику переключения бистабильных ферромагнетиков из *Fe*-, *Fe-Co*-сплавов, полученных по технологии Улитовского-Тейлора, и оценить перспективы их использования в магнитометрических устройствах.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

1. анализ и отбор сплавов ЛАМСО, у которых бистабильные магнитные свойства достигаются путем создания наведенной магнитной анизотропии за счет внутренних напряжений литья;
2. изучение распределения внутренних напряжений в металлической жиле и их связи с параметрами БСБ (поле старта, его флуктуации, механизмы и динамика переключения);
3. создание и исследование различных условий для зародышеобразования, их влияние на параметры БСБ;
4. исследование механизмов переключения ферромагнетиков с 2-х и 4-х стабильными состояниями за цикл перемагничивания;
5. разработка принципов работы средств магнитометрической техники (магнитные компараторы, магнитометры, магнитометрические стенды и т.п.) с использованием ферромагнетиков с БСБ.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Теоретические и экспериментальные исследования влияния внутренних напряжений в системе «металл-стекло» на поле старта и его флуктуации в бистабильных ЛАМСО из *Fe*-, *Fe-Co*-сплавов.
2. Результаты экспериментальных исследований влияния дефектов стеклянной оболочки на параметры бистабильности образцов ЛАМСО.
3. Модели механизмов динамического переключения ферромагнетиков из ЛАМСО.
4. Методики получения бистабильных образцов из ЛАМСО с заданным полем старта и минимально возможными флуктуациями.

5. Экспериментальная установка (анализ погрешностей, влияние неоднородности поля намагничивания и др.).

6. Принципы работы и образцы магнитометрической аппаратуры на основе бистабильных сердечников из ЛАМСО и анализ их основных метрологических характеристик.

Научная новизна

Установлено, что бистабильность свойств ЛАМСО может быть получена в сплавах на основе железа и кобальта с положительной магнитострикцией и разницей коэффициентов термического расширения стекла и металла и определены такие сплавы: $(Co_{92}Fe_8)_{63}Ni_{10}B_{16}Si_{11}$, $Co_{18,8}Fe_{71,8}B_3Si_{6,8}$, $Fe_{81,6}Mn_{9,3}B_{1,8}Si_6C_{1,3}$.

Разработан способ уменьшения величины поля старта и его флуктуаций в бистабильных ЛАМСО из Fe-, Fe-Co-сплавов путем ослабления и перераспределения внутренних напряжений в результате частичного или полного стравливания стеклянной оболочки.

Разработан способ управления процессом зародышеобразования, заключающийся в формировании областей их локализации путем химической обработки торцов микропровода.

Зарегистрированы с помощью индукционного метода два вида импульсов ЭДС – релаксационный и акселерационный, которые свидетельствуют о наличии двух механизмов переключения БСБ. Предложена феноменологическая модель, объясняющая данный факт. При переходе от релаксационного механизма к акселерационному поле старта возрастает в 2-3 раза, а флуктуации уменьшаются 1,5-2 раза.

Впервые обнаружены ферромагнетики с 4-х стабильными (за цикл перемагничивания) состояниями и предложена модель, объясняющая появление этого состояния из бистабильного.

Разработаны алгоритмы построения экономичных магнитометров класса точности 2,5. Предложено использовать для калибровки магнитное поле Земли. С использованием бюллетеня ИЗМИРАН погрешность калибровки может быть уменьшена с 2,6% до 0,6%.

Практическая значимость работы заключается в том, что по результатам проведенных исследований разработана технология изготовления сердечников из литого аморфного микропровода в стеклянной оболочке с низким полем старта и малыми флуктуациями. Предложены методы уменьшения погрешностей, вызванные неоднородностью магнитного поля в катушках преобразователей и взаимным влиянием полей рассеяния двух бистабильных сердечников. Разработаны образцы экономичных магнитометров для обеспечения требований СанПиН 2.2.4.1191-03 и предложена методика калибровки магнитометров с использованием магнитного поля Земли.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на 32nd International Conference and NDT Technique Exposition «Defectoscopy 2002» (Liberec, Czech Republic, November 19-21, 2002); Четвертой международной научно-технической конференции «ИКИ-2003» (Барнаул, 19-21 мая 2003); V международной научно-технической школе-семинаре «Эффект Баркгаузена и аналогичные физические явления» (Ижевск, 22-26 ноября 2004); Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2005» (Москва, 13 апреля 2005); Первой международной научно-практической конференции «Исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 20 мая – 2 июня 2005); XVII Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» (Екатеринбург, 5-11 сентября 2005); Межрегиональной научно-практической конференции «Реализация стратегии устойчивого развития города Ижевска, опыт и проблемы» (Ижевск, 28 сентября 2005); 3-й научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства» (Ижевск, 14-15 апреля 2006).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 12 печатных работах.

Работа выполнена при поддержке гранта конкурса 2004 года для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов А04-3.20-624 «Создание портативного измерителя геомагнитного поля».

Благодарности. Автор выражает особую признательность научному руководителю, д.т.н., профессору Ломаеву Г.В. (ИжГТУ, г. Ижевск); благодарит за предоставление образцов аморфного микропровода и обсуждение результатов к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. Баранова С.А. (АО «Микрон», г. Кишинев) и директора НПО «MicroFir Tehnologii Industriale» Ларина В.С.; д.т.н., профессора Ладьянова В.И. за содействие в проведении рентгеноструктурного анализа в ФТИ УрО РАН.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы. Работа изложена на 175 с., содержит 68 рисунков и 12 таблиц. Список использованной литературы включает 163 наименований отечественных и зарубежных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту, и показаны практическая значимость работы и научная новизна.

Глава 1. Бистабильные аморфные ферромагнетики и их применение

Данная глава представляет обзор литературы по тематике исследований. Начало изучения и применения ферромагнетиков, обладающих бистабильными магнитными свойствами, связано с поликристаллическими материалами (проволока Виганда, композиционная проволока из материала СЧПГ, викаллой и т.п.). В последнее время вопросы формирования магнитной бистабильности исследуются, в основном, на аморфных сплавах. Широко известны бистабильные аморфные микропроволоки, выпускаемые фирмой Unitika, полученные закалкой. Основным конкурентом этих микроволокон является литой аморфный микропровод в стеклянной оболочке, изготовленный по технологии Улитовского-Тейлора. Однако для ЛАМСО отсутствует информация об экспериментальных и теоретических исследованиях механизмов переключения и факторов, определяющих их магнитную бистабильность.

В параграфе 1.2 изложены условия создания бистабильности. Технологическая задача создания бистабильных ферромагнетиков сводится к форми-

рованию в образце условий, необходимых для осуществления БСБ, механизм которого заключается в создании зародыша перемагничивания, который при некоторой величине магнитного поля (поле старта H_s) начинает расти и поглощает объем образца.

Параграф 1.3 посвящен вопросам динамической теории БСБ, в основе которой лежит уравнение

$$m_{\text{э}} \ddot{x} + \beta \dot{x} + F(x) = 2M_s H(t), \quad (1)$$

где $m_{\text{э}}$ - эффективная масса доменной границы (ДГ), β - коэффициент вязкого затухания, $F(x)$ - функция, описывающая градиент потенциального рельефа (ГПР), характеризует силу взаимодействия ДГ и дефектов. Внешнее поле с напряженностью H оказывается на 180° ДГ давлением $2M_s H$ (M_s - намагниченность насыщения).

Рассмотрены механизмы переключения бистабильных образцов. Впервые предположение о существовании разных механизмов сообщено в работе В.М. Рудяка [1], в которой импульсы ЭДС от БСБ различались по длительности и амплитуде, но их более детальное изучение в многоскачковом ферромагнетике было затруднительно. Исследования форм импульсов ЭДС от скачков намагниченности (СН), проведенные Г.В. Ломаевым и С.П. Ахизиной, в викаллоевой проволоке, подвергнутой пластической деформации скручиванием для создания бистабильности, показали, что наблюдаются две разновидности импульсов соответствующие двум механизмам переключения [2]. Переход от одного механизма к другому, по мнению авторов, обусловлен наличием магнитной фазы, имеющей большую по сравнению с двумя другими коэрцитивную силу. Аналогичные формы импульсов наблюдались и в аморфном микропроводе, но их природа до сих пор не изучена. В силу особенностей аморфных сплавов процесс перемагничивания БСБ в них имеет свою специфику. ЛАМСО в этом плане представляют особый интерес, поскольку в них магнитоупругая анизотропия наводится остаточными напряжениями, создаваемыми в процессе изготовления.

В четвертом параграфе изложены материалы исследований влияния химического состава и термообработки на магнитные свойства аморфных материалов. Изучение этих вопросов позволяет управлять процессом создания бистабильности и параметров БСБ.

В пятом параграфе рассмотрены примеры применения бистабильных ферромагнетиков, в том числе и аморфных, в устройствах автоматики и измерительной техники.

В заключение первой главы сформулированы цель и задачи данной работы.

Глава 2. Технология получения образцов и методы их исследования

Во второй главе описаны технология получения микропровода, физические свойства, критерии отбора образцов для исследований, а также методы исследования и проведен анализ погрешностей измерения. Ставилась задача отобрать наиболее ярких представителей ферромагнетиков с бистабильными свойствами.

В работе исследовались сплавы на основе железа и кобальта с положительной магнитострикцией $(Co_{92}Fe_8)_{63}Ni_{10}B_{16}Si_{11}$, $Co_{18,8}Fe_{71,8}B_3Si_{6,8}$, $Fe_{81,6}Mn_{9,3}B_{1,8}Si_6C_{1,3}$, $Co_{69}Fe_{5+6}(BSi)_{25}$, $Fe_{70}B_{15}Si_{10}C_5$. Структурный анализ микропровода проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. Были отобраны три сплава $(Co_{92}Fe_8)_{63}Ni_{10}B_{16}Si_{11}$, $Co_{18,8}Fe_{71,8}B_3Si_{6,8}$, $Fe_{81,6}Mn_{9,3}B_{1,8}Si_6C_{1,3}$.

Из ЛАМСО путем механической резки и химической обработки изготавливались образцы длиной от 2 до 20 мм. Торцы подвергались химической обработке по специально разработанной методике, обеспечивающей получение трех видов торцов: с ровными торцевыми срезами, с утопленной жилой и с выступающей металлической жилой.

Для наблюдения за состоянием поверхности и торцов образцов и измерения их геометрических размеров использовался микроскоп ИНФРАМ – И.

Исследования динамики переключения проводились на разработанной автоматизированной установке на базе ПК и цифрового осциллографа ОЦЗС-01. Установка включала также генератор сигналов специальной формы Г6-27, широкополосный усилитель и комплекс катушек.

В конце главы проведен анализ погрешностей измерения параметров БСБ. Погрешность измерения поля старта находится по формуле:

$$\delta H_s = \delta H_m + \delta f + \delta t_n + \delta_2, \quad (2)$$

где δH_m – ошибка в определении амплитуды перемагничивающего поля, обусловленная погрешностью измерения тока в намагничивающей катушке, неточностью определения числа витков и геометрических параметров намагничивающей катушки (~2%); δf – ошибка в определении частоты поля перемагничивания (~0,5%); δ_2 – погрешность, вызываемая нелинейностью тока генератора (~0,1%); δt_n – ошибка в измерении временного интервала между двумя импульсами (~0,1%). Подстановка в (2) соответствующих значений приводит к величине приведенной погрешности измерения поля старта в 3%.

Из экспериментальных исследований установлено, что стабильность переключения бистабильного микропровода зависит от однородности перемагничивающего поля. При перемагничивании в неоднородном поле проявляется ступенчатая зависимость поля старта от внешнего поля.

Как известно магнитное поле соленоида убывает к торцам примерно вдвое. Поэтому для экспериментальных исследований использовались катушки Гельмгольца, которые удовлетворяют требованию создания однородного магнитного поля. Но их применение неприемлемо в магнитной технике, вследствие больших линейных размеров. Поэтому нами применялись соленоиды с дополнительными намотками, позволяющие создавать поле однородное по всей их длине.

Глава 3. Экспериментальное исследование бистабильных ферромагнетиков

В данной главе изложены результаты экспериментальных исследований ферромагнетиков в виде образцов ЛАМСО, рассмотрены вопросы создания бистабильных магнитных свойств и предпринята попытка построения феноменологической модели двух механизмов БСБ.

В параграфе 3.1 рассмотрены способы создания наведенной магнитной анизотропии, обуславливающей бистабильные магнитные свойства ферромагнетиков. В ЛАМСО, полученном литьем, магнитоупругая анизотропия наводится напряжениями, которые связаны с различием коэффициентов термического расширения стекла и металлического сплава и при определенной величине магнитострикции λ оказывают влияние на формирование магнитной структуры. Получение микропровода с БСБ возможно при $\lambda > 0$ и достаточно сильных остаточных напряжениях. Величина константы магнитострикции определяется химическим и элементным составом металлического сплава, а величина напряжений зависит от соотношения диаметра жилы и толщины стеклянной оболочки $\frac{d_{жс}}{d_{ст}}$. По результатам предварительных исследований были выбраны бистабильные микропровода, указанные в табл. 1. Здесь же приведены результаты измерений параметров импульсов ЭДС от БСБ в исходном состоянии.

В рамках теории распределения остаточных напряжений, микропровод можно представить в виде цилиндрических областей (рис. 1), отличающихся по величине напряжений. Исследовать поведение напряжений во всем объеме жилы не представляется возможным, однако можно оценить их величины на границах областей, определенных в данной модели (рис. 2).

В области 1, на границе со стеклом, имеют место следующие формулы для аксиальной, радиальной и тангенциальной компонент тензора упругих напряжений в цилиндрических координатах:

Таблица 1

Образец	$(\text{Co}_{92}\text{Fe}_8)_{63}\text{Ni}_{10}\text{B}_{16}\text{Si}_{11}$ (№1)	$\text{Co}_{18,8}\text{Fe}_{71,8}\text{B}_3\text{Si}_{6,8}$ (№2)	$\text{Fe}_{81,6}\text{Mn}_{9,3}\text{B}_{1,8}\text{Si}_6\text{C}_{1,3}$ (№3)
Амплитуда сигнала U_m , мВ/виток	0,11	0,11	0,06
Длительность τ , мкс	27	20	25
Поле старта	144	89	139

$H_s, \text{А/м}$			
Флуктуации поля старта $\sigma_{H_s}, \%$	1,6	1	0,8
Диаметр металлической жилы, мкм	6	21	17
Наружный диаметр, мкм	20	28	26

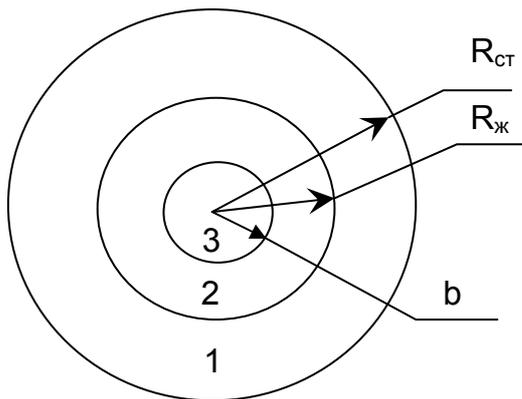


Рис. 1. Поперечное сечение микропровода: $R_{жс}$ – радиус металлической жилы, R_m – внешний радиус стеклянной оболочки, b – радиус области пластической деформации.

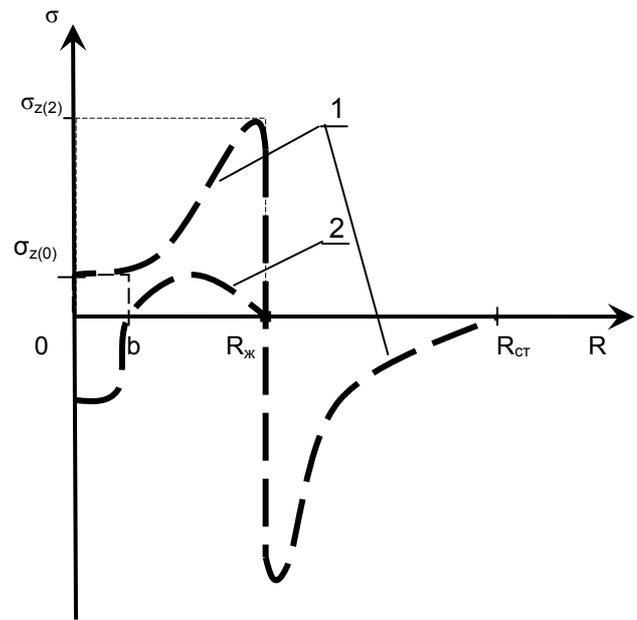


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений вдоль радиуса микропровода: 1 – в исходном состоянии, 2 – после полного удаления стеклянной оболочки.

$$\sigma_{r(0)} = \sigma_{\varphi(0)} = P = \sigma_m \frac{kx}{\left(\frac{k}{3} + 1\right)x + \frac{4}{3}},$$

$$\sigma_{z(0)} = P \frac{(k+1)x + 2}{kx + 1},$$

$$x = \left(\frac{R_{ст}}{R_{жс}}\right)^2 - 1,$$

(3)

где $\sigma_m = \varepsilon E_1$, $\varepsilon = (\alpha_1 - \alpha_2)(T^* - T) \approx 5 \cdot 10^{-3}$, α_i – коэффициенты термического расширения металла ($i=1$) и стекла ($i=2$), T^* – температура застывания композита в области контакта металла и стекла ($T^* \sim 800-1000$ К), T – температура, при которой проводится эксперимент, $R_{жс}$ – радиус металлической жилы микропровода, $R_{см}$ – внешний радиус стеклянной оболочки микропровода, $k = \frac{E_2}{E_1} \approx (0,3 \div 0,5)$, E_i – модули Юнга (если провести оценки $\sigma_z \sim (2 \div 3)P$, а максимум величины $P \rightarrow 0,5\sigma_m \sim 10^9$ Па).

До внутреннего радиуса b расположена вторая цилиндрическая область (область 2), где происходит упругая релаксация напряжений. В области $b < r < R_{жс}$

$$\begin{aligned}\sigma_{r(1)} &= P \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) + \sigma_{r(1)}^\circ, \\ \sigma_{\varphi(1)} &= P \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) + \sigma_{\varphi(1)}^\circ, \\ \sigma_{z(1)} &\approx \nu(\sigma_{r(1)} + \sigma_{\varphi(1)}) + \sigma_{z(1)}^\circ \sim P + \sigma_{z(1)}^\circ,\end{aligned}\tag{4}$$

где параметр P определен в (3), ν – коэффициент Пуассона ($0,3 \div 0,5$), σ_i° – постоянные остаточные напряжения, обусловленные, например, спецификой процесса закалки.

Так как при быстрой закалке аморфных материалов возможно возникновение пластической релаксации, то напряжения в третьей области $r < b$ можно представить в виде

$$\begin{aligned}\sigma_{r(2)} &= 2K \times \ln\left(\frac{r}{b}\right) + \sigma_{r(2)}^\circ, \\ \sigma_{\varphi(2)} &= 2K \times \left[1 + \ln\left(\frac{r}{b}\right) \right] + \sigma_{\varphi(2)}^\circ, \\ \sigma_{z(2)} &\approx \nu \times (\sigma_{r(2)} + \sigma_{\varphi(2)}) \approx 2K \times \left[1 + 2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) \right] + \sigma_{z(2)}^\circ,\end{aligned}\tag{5}$$

где K – феноменологическая константа, которая определяет напряжения при учете пластических деформаций, $\nu \sim 0,5$. Из физических соображений применимость уравнений (5) ограничена снизу величиной $R_{cr} < 1$ мкм.

Результаты расчетов и экспериментальных исследований, проведенных методом ферромагнитного резонанса в работе [3] свидетельствуют о том, что остаточные напряжения в жиле убывают от поверхности к центру (рис. 2, кривая 1). Из анализа распределения напряжений следует, что

1) осевые остаточные напряжения значительно превышают радиальные, вследствие этого создается одноосная магнитная анизотропия ($\sigma_r \leq \sigma_\varphi \leq \sigma_z$), что полностью удовлетворяет экспериментальным данным;

2) доменной стенке энергетически более выгодно зародиться в области 3, где энергия анизотропии значительно меньше;

3) область $b < r < R_{жс}$ ДГ преодолевает скачком, поскольку эта область обладает энергией анизотропии значительно большей, чем область $r < b$.

Поскольку величина упругих напряжений определяется геометрическими размерами микропровода и магнитострикцией насыщения, то изменяя $d_{см}$, $d_{жс}$ и λ_s можно управлять величиной энергии ДГ, необходимой для переключения ферромагнетика, а, следовательно, и величиной поля старта H_s . Известно, что функциональная зависимость H_s от основных магнитных и технологических параметров такая же, как у энергии ДГ

$$E \sim \Delta \cdot \sigma \cdot \lambda_s, \quad (6)$$

где Δ - толщина ДГ.

Этот факт был подтвержден экспериментально. При ослаблении остаточных напряжений, путем плавного стравливания стеклянной оболочки со всей поверхности образца из микропровода $Fe_{81,6}Mn_{9,3}B_{1,8}Si_6C_{1,3}$ H_s уменьшилось более чем в 2 раза, с 139 А/м до 60 А/м по линейному закону $H_s = a\sigma_m$ (a – коэффициент).

К релаксации напряжений приводит также термообработка (отжиг). В случае аморфного микропровода представляет интерес отжиг до температуры порядка $(300-400)^\circ\text{C}$, поскольку при более высокой температуре наблюдается образование и рост микрокристаллической фазы. В микропроводе, как и в других аморфных сплавах на основе железа и кобальта, после отжига в диапазоне температур $0-300^\circ\text{C}$ происходит заметное уменьшение значений H_s (рис. 3),

дальнейшее увеличение температуры ($>300^{\circ}\text{C}$) приводит к увеличению поля старта, связанному с появлением кристаллической микроструктуры.

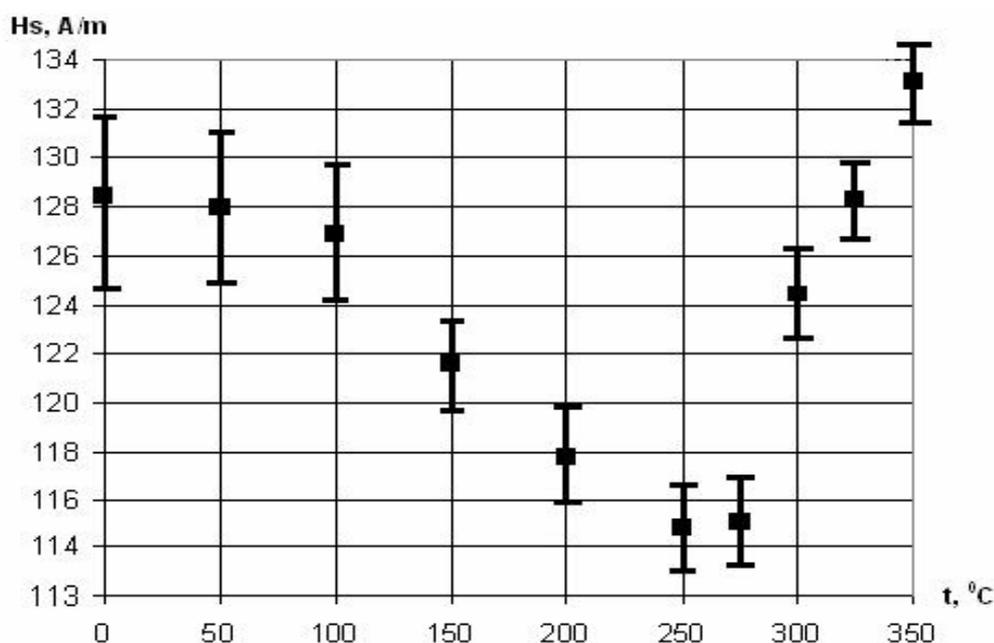


Рис. 3. Зависимость поля старта ЛАМСО от температуры отжига.

При измерении поля старта бистабильных образцов замечено, что его величина изменяется от цикла к циклу, т.е. флуктуирует. Статистический характер поля старта обычно связывают с перестройкой доменной структуры ферромагнетика в различных циклах перемагничивания. В рамках гетерогенного зарождения новой магнитной фазы флуктуации поля старта являются следствием тепловых флуктуаций магнитных моментов зародышей перемагничивания [4], обусловленных температурной зависимостью макроскопических характеристик ферромагнетика и связанным с ней перераспределением энергии образца за счет: а) изменения таких магнитных констант, как намагниченности насыщения, магнитострикции, анизотропии; б) изменения направления анизотропии и внутренних напряжений при температурном расширении или сжатии образца; в) изменения положения магнитоактивных дефектов в результате диффузии атомов; г) изменения величины обменного интеграла, определяющего обменную энергию.

Таким образом, увеличение температуры должно приводить к росту флуктуаций, тем не менее, в аморфном микропроводе наблюдается обратный

эффект, обусловленный преобладанием магнитострикционной составляющей флуктуаций $\Delta\sigma_m$ над тепловыми флуктуациями магнитных моментов σ_T ($\sigma_T \ll \Delta\sigma_m$). При температуре $T > 200^\circ\text{C}$ флуктуации поля старта практически стабилизируются (рис. 3). Этот факт указывает на возрастание влияния тепловых флуктуаций ($\sigma_T \approx \Delta\sigma_m$), вследствие увеличения неоднородностей, т.е. роста микрокристаллической фазы.

Состояние стеклянной оболочки на торцах микропровода также влияет на флуктуации поля старта. Изучались образцы с ровными торцами, с утопленной и с выступающей жилой. По сравнению с образцами с ровными торцами у образцов с утопленной жилой незначительно повышается поле старта (*на 3-5 А/м*) и в 1,5-2 раза усиливаются флуктуации. В случае образцов с выступающей жилой H_s уменьшается в 1,5-3 раза, абсолютное значение флуктуаций падает в 2-3 раза. Результаты этих экспериментов подтверждают предложенную модель механизмов переключения.

Для получения образцов с выступающей на торцах жилой стравливалось стеклянное покрытие, удерживающее металлическую жилу микропровода в напряженном состоянии. В соответствии с теорией гетерогенного зарождения новых магнитных фаз основной причиной появления флуктуаций поля старта являются дефекты, включения, локальные изменения внутренних напряжений. Удаление стекла на торце приводит к тому, что создаются области с меньшей величиной магнитоупругой энергией, т.е. искусственно формируется область локализации зародышей перемангничивания иницирующих релаксационный механизм переключения. Вследствие этого уменьшается H_s и его флуктуации. При удалении части металлической жилы, наоборот уменьшается объем замыкающих доменов и увеличивается структурная неоднородность в результате неравномерного вытравливания, что объясняет рост H_s и σ_{H_s} .

Особое внимание в работе уделено исследованию динамическим процессам перемангничивания бистабильных ферромагнетиков. Одним из информативных параметров, отражающих динамику переключения, является форма импульса ЭДС. На рис. 4 показаны осциллограммы типичных для бистабиль-

ного ЛАМСО импульсов – релаксационный и акселерационный. Для релаксационного импульса характерен крутой фронт нарастания и пологий спад. Акселерационный импульс имеет пологое нарастание и резкий спад. Если релаксационный импульс является характерным для бистабильных материалов, то для получения акселерационного требуется перемагничивание в неоднородном магнитном поле. Импульсы значительно отличаются по параметрам: амплитуде, длительности, полю старта и флуктуациям. Поля старта акселерационных импульсов по сравнению с полями старта релаксационных в 2-3 раза больше. Примечателен тот факт, что БСБ значительно отличаются по флуктуациям поля старта: σ_{H_s} релаксационного составляет 2,6% против 0,5% акселерационного.

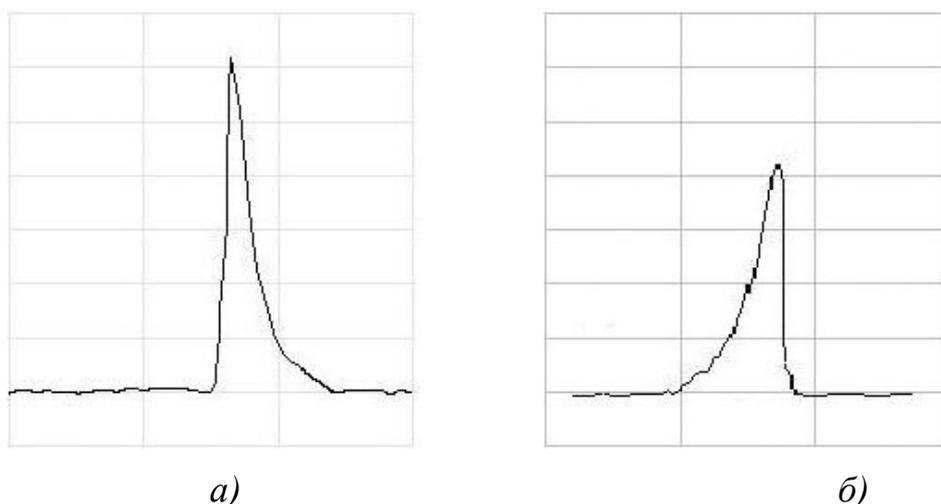


Рис. 4. Формы импульсов ЭДС от БСБ в образцах $Fe_{81,6}Mn_{9,3}B_{1,8}Si_6C_{1,3}$ (№3): а) релаксационная, б) акселерационная.

Обнаруженные две формы импульса ЭДС от БСБ свидетельствуют о существовании двух механизмов БСБ. Предполагается, что первый механизм является характерным для всех проводящих ферромагнетиков и происходит путем движения воронкообразной доменной стенки с опережающим перемагничиванием поверхности образца. Второй механизм обусловлен перемагничиванием образца изнутри и связан с изменением магнитоупругой анизотропии, определяемой продольными остаточными напряжениями, уменьшающимися от поверхности образца к центру. В области 3 (рис. 1) напряжения наиболее слабые, а поскольку перемагничиванию препятствуют поля рассеяния внеш-

ней оболочки, то процесс зародышеобразования в середине образца происходит с отставанием и при большей величине внешнего поля.

Установлено, что акселерационный механизм наблюдается:

1) при перемагничивании в неоднородном магнитном поле (поле старта увеличивается в 3-4 раза);

2) в образцах со стравленной со всей его поверхности стеклянной оболочкой (поле старта уменьшается более чем в 2 раза).

В ходе исследований обнаружены образцы с 4-х стабильными состояниями и определены условия их существования (рис. 5). Установлено, что четырехстабильность свойственна микропроводам с большим диаметром металлической жилы и небольшой толщиной стеклянной оболочки ($d_{жс} = 20-30$ мкм, $d_{см} \approx 5$ мкм).

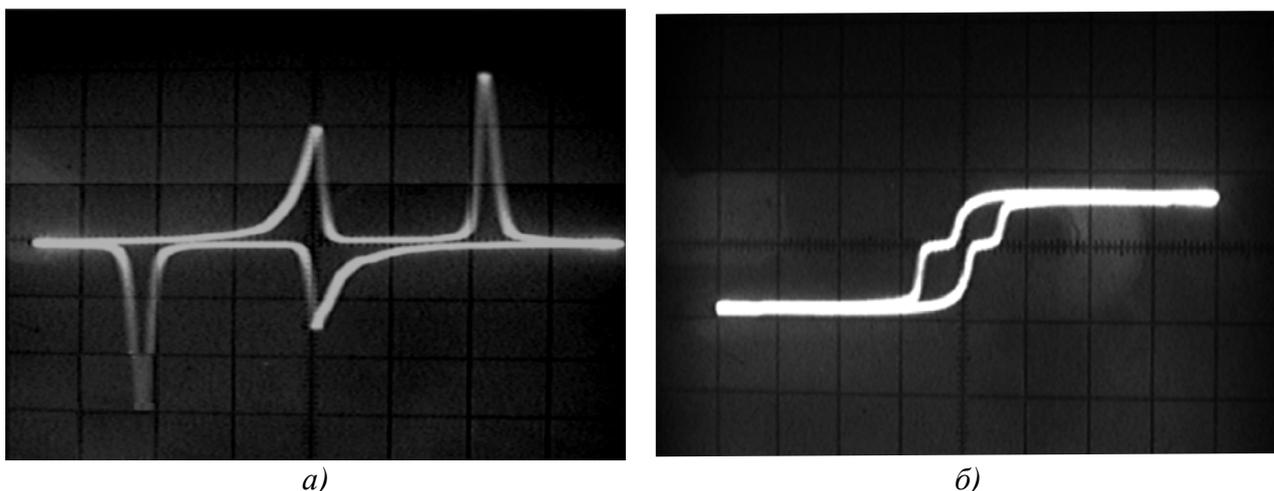


Рис. 5. Осциллограммы импульсов ЭДС от БСБ в четырехстабильных образцах: а) дифференциальная, б) интегральная петли гистерезиса.

Наблюдаемые импульсы также отличаются по амплитуде, длительности и полю старта. Релаксационный импульс имеет следующие характеристики: $U_m = 0,15$ мВ/виток, $\tau = 21$ мкс, $H_s = 49$ А/м, $\sigma_{H_s} = 1,6$ %. Для акселерационного импульса характерна меньшая амплитуда $U_m = 0,1$ мВ/виток, большая длительность $\tau = 28$ мкс и поле старта $H_s = 18$ А/м, и малые флуктуации поля старта $\sigma_{H_s} = 0,7$ %. Особенность механизмов переключения этого типа материалов в том, что поле старта акселерационного импульса меньше поля старта релаксационного в отличие от бистабильных образцов. При включении внешнего поля вначале происходит переключение сердцевины образца по акселерацион-

ному механизму, а затем оболочки при большем значении поля. Поле, создаваемое магнитной фазой сердцевинны микропровода, уменьшает поле на торцах соленоида и как бы противодействует переключению оболочки, что объясняет большую величину поля старта релаксационного импульса.

Полученный результат свидетельствует о возможности создания ферромагнетиков с заданным количеством СН, в частности, с четырьмя скачками за цикл переключения. Этот факт был подтвержден экспериментально. Образец с 4-стабильными состояниями был получен из бистабильного путем уменьшения толщины стеклянной оболочки: 1) при плавном стравливании стекла со всей поверхности (при удалении 2/3 стекла) и пошаговом с одного из торцов (когда $0,2 \leq \frac{l_g}{l_{обр}} \leq 0,5$).

Для математического описания механизмов переключения ферромагнетиков использована функция $F(x)$, описывающая потенциальный рельеф, над которым движется ДГ. Удовлетворительный результат моделирования динамики процесса перемагничивания бистабильных ферромагнетиков и количественное совпадение с реальным процессом был получен с использованием сплайн-функции [5]

$$F(x) = \begin{cases} -\frac{2F_m}{\lambda^3} x^3 + \frac{3F_m}{\lambda^2} x^2, & \text{при } x \leq \lambda \\ -\frac{F_m}{(\Delta x - \lambda)^2} x^2 + \frac{2F_m \lambda}{(\Delta x - \lambda)^2} x + \frac{F_m \Delta x (\Delta x - 2\lambda)}{(\Delta x - \lambda)^2}, & \text{при } x > \lambda \end{cases} \quad (7)$$

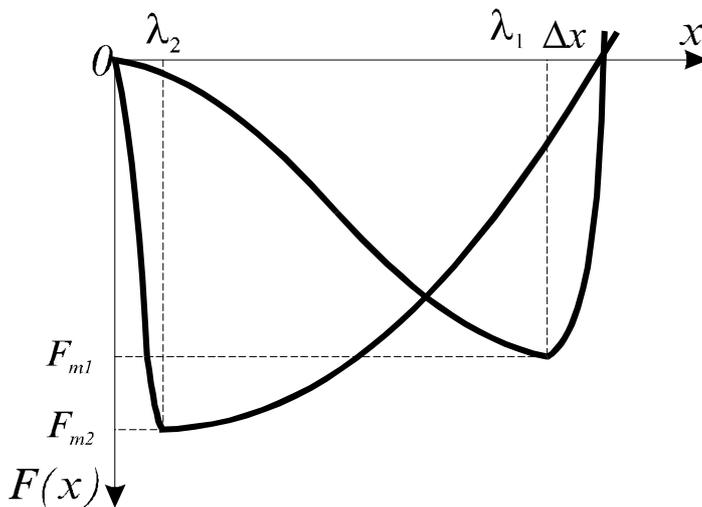


Рис. 6. Вид функции $F(x)$, аппроксимирующей ГПР, для двух значений ее параметров F_{m1} , F_{m2} и λ_1 , λ_2 и постоянном Δx .

К достоинству этой аппроксимации следует отнести возможность независимого варьирования физических параметров ГПР – глубины F_m , ширины Δx и положения минимума λ на интервале СБ (рис. 6). Подбором параметров ГПР можно получить подобие расчетных зависимостей $\dot{x}(t)$ и ЭДС $e(t)$, полученных в эксперименте $\dot{x}(t) = ke(t)$. Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Глава 4. Принципы создания средств магнитометрической техники с использованием ферромагнетиков с БСБ.

В данной главе оцениваются возможности применения ферромагнетиков из ЛАМСО для измерения магнитных полей (магнитный компаратор, магнитометр). Исследуются технические характеристики и принципы построения устройств.

Основой магнитометрических устройств является магнитный компаратор (МК), который может быть реализован в зависимости от способа перемагничивания и съема сигнала в трех вариантах: с двумя катушками, с одной катушкой и бескатушечный.

В основе работы МК лежит принцип преобразования напряженности внешнего магнитного поля в цифровой эквивалент (во временной интервал), показанный на рис. 7.

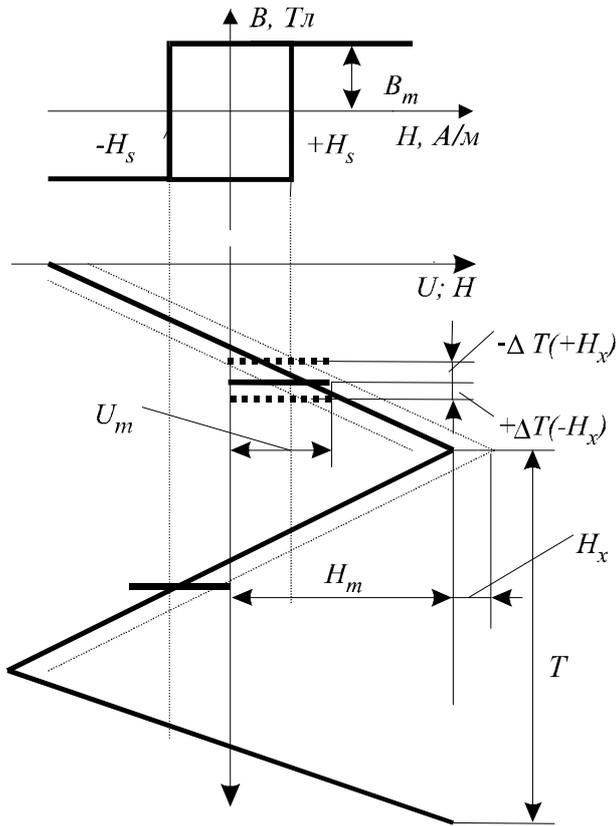


Рис. 7. Принцип измерения магнитного поля с преобразованием во временной интервал.

Уравнение преобразования МК:

$$\Delta T = \frac{T}{4H_m} \cdot H_x, \quad (8)$$

где H_x – напряженность внешнего магнитного поля, H_m – амплитуда перемагничивающего поля, ΔT – измеряемое время, T – период перемагничивающего поля.

Анализ этого принципа работы магнитометра показывает, что основная доля потребляемого тока расходуется на работу генератора линейного напряжения (ГЛИН), который в течение всего периода измерения вырабатывает напряжение с максимальной амплитудой, независимо от необходимой для перемагничивания бистабильного ферромагнетика амплитуды перемагничивающего поля (ток потребления в режиме измерения составляет 30 мА). Для снижения величины потребляемого тока предложены два принципа измерения, максимальная амплитуда перемагничивающего поля в которых ограничивается появлением импульса ЭДС от БСБ, т.е. напряженность измеряемого поля H_x , определяется напряжением перемагничивающего поля $U_{cp} \equiv H_x$.

Отличие этих принципов заключается в том, что в первом напряженность поля линейно возрастает с отрицательного максимального значения до тех, пока не происходит скачок намагниченности, а во втором напряженность плавно нарастает от нуля до появления импульсов перемагничивания.

Любой из предлагаемых выше вариантов измерения магнитного поля может быть реализован как в виде измерителя напряженности магнитного поля (одно- или трехкомпонентного), так регистратора гипомангнитного поля, работающего в режиме однократного измерения. Суть измерения заключается в

следующем: появление импульса ЭДС от БСБ останавливает работу ГЛИН. Напряжение на выходе ГЛИН U_m соответствует сумме H_s и H_x , иначе $\pm \Delta U_x \equiv \Delta H_x$.

Ряд принципов построения магнитометрических устройств доведен до стадии эскизного проекта: трехкомпонентный датчик, магнитометр ИГМП-3к и другие. Разработан лабораторный стенд для измерения магнитных полей, используемый в учебном процессе.

В данной работе проведен анализ источников погрешностей измерения магнитных полей с помощью устройств на основе МК. Выделены основные источники погрешностей: нестабильность переключения бистабильных ферромагнетиков в неоднородном поле; флуктуации поля старта; взаимное влияние полей рассеяния двух и более МК.

Особого внимания заслуживает погрешность, связанная с полями рассеяния ферромагнетиков и их взаимным влиянием. Эта погрешность проявляется при использовании двух и более МК, например, в 3-х компонентном датчике. При совместном размещении МК требуется обеспечить взаимную перпендикулярность их магнитных осей и наименьшее влияние магнитных полей рассеяния преобразователей друг на друга при минимальном конструктивно допустимом объеме пространства, занимаемом всеми МК. Наиболее рациональным является вариант размещения МК на гранях куба таким образом, чтобы ось одного проходили над серединой другого.

Погрешность, обусловленная неортогональностью расположения компараторов можно вычислить следующим образом

$$\Delta = 1 - K_{измер}, \quad (9)$$

где $K_{измер}$ – коэффициент, учитывающий отклонение МК от осей координат.

Тогда

$$K_{измер} = \sqrt{\cos^2(\alpha \pm \delta\alpha) + \cos^2(\beta \pm \delta\beta) + \cos^2(\gamma \pm \delta\gamma)}, \quad (10)$$

Для оценки конкурентоспособности МК на основе бистабильного микропровода проведен сравнительный анализ его характеристик с наиболее рас-

пространственными измерительными преобразователями магнитного поля. Основным преимуществом компаратора является малое потребление тока.

В данной работе разработан метод оперативной калибровки магнитометров серии ИГМП-3к с применением магнитного поля Земли (МПЗ) в качестве эталонного источника поля, который в отличие от стандартных методов, требующих дополнительных технических средств, менее трудоемок.

Предлагаемый к рассмотрению метод требует анализа характеристик магнитного поля Земли на предмет их стабильности во времени и пространстве, для определения погрешности «эталона». После анализа вековых, месячных, суточных и др. вариаций поля Земли были определены слагаемые «погрешности» эталона: вековые – 80 мА/м в год, суточные – порядка 168 мА/м и возмущения, вызванные солнечным ветром – магнитные бури до 796 мА/м.

Напряженность магнитного поля на поверхности Земли в среднем равна 40 А/м. Таким образом, относительное изменение МПЗ во времени составляет

$$\delta = \frac{(0.080 + 0.008 + 0.160 + 0.796) \times 100\%}{40} = 2,6\% .$$

После уточнения значения поля в конкретной местности по мировой карте напряженности магнитного поля и введения поправок на магнитные бури по сведениям, предоставляемым Институтом земного магнетизма, ионосферы и радиоволн РАН, «погрешность» составит

$$\delta = \frac{(0.080 + 0.008 + 0.160) \times 100\%}{40} = 0,62\% .$$

Таким образом, используя по этой методике можно калибровать магнитометры среднего класса точности (не выше 2,5).

Таким образом, для калибровки по МПЗ необходимо выполнение следующих условий:

- знание значения поля Земли и его наклона на территории, где используется магнитометр (для района г. Ижевск – это 43,5 А/м и 73⁰);
- отдаленность от места калибровки металлоконструкций и ферромагнитных устройств, вносящих искажения в магнитное поле в области измерений (на расстоянии в радиусе 4-5 м);

- сведения о величине возмущений магнитного поля Земли в момент калибровки (желательно производить калибровку в относительно спокойной геомагнитной обстановке, т.е. в дни слабых геомагнитных возмущений или вводить поправки на магнитные бури в соответствии с данными ИЗМИРАН).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проанализированы условия получения бистабильного состояния в ЛАМСО. Основное условие появления БСБ – это продольная наведенная магнитоупругая анизотропия, для создания которой в микропроводе необходимы следующие условия: наличие положительной магнитострикции, определенного соотношения диаметров металлического жилы и стеклянной оболочки и разницы коэффициентов термического расширения. Из большого числа, удовлетворяющих этим условиям материалов, выбраны и исследованы ферромагнетики со следующим химическим составом жилы $(Co_{92}Fe_8)_{63}Ni_{10}B_{16}Si_{11}$, $Co_{18,8}Fe_{71,8}B_3Si_{6,8}$, $Fe_{81,6}Mn_{9,3}B_{1,8}Si_6C_{1,3}$ (табл. 1).

2. Изучено распределение внутренних напряжений в металлической жиле микропровода и получены формулы для их расчёта. Экспериментально доказана линейная зависимость между напряжениями и параметрами БСБ, в частности полем старта и его флуктуациями: релаксация напряжений приводит к уменьшению этих величин.

3. Исследованы флуктуации поля старта и изучены факторы, влияющие на их величину. Установлено, что величина флуктуаций зависит от двух конкурирующих энергий – энергии тепловых флуктуаций магнитных моментов и магнитострикционной энергии. Модель флуктуаций подтверждена экспериментально. С ростом температуры от 0 до 250⁰С наблюдается преобладание магнитострикционной составляющей и уменьшение флуктуаций поля старта. Дальнейшее увеличение температуры приводит к уравниванию двух энергий и стабилизации флуктуаций.

4. Предложен способ уменьшения флуктуации поля старта, заключающийся в формировании области локализации зародышей перемагничивания

инициирующих процесс переключения путем стравливания стеклянной оболочки с торца микропровода. Достигнуто уменьшение флуктуаций в 3 раза.

5. Исследована динамика переключения бистабильного микропровода. Обнаружены два механизма переключения – релаксационный и акселерационный. Первый механизм – это переключение с очень большой скоростью, обусловленное движением воронкообразной доменной границы с опережающим перемагничиванием оболочки. Вторым механизмом происходит значительно медленнее с ускорением процесса и определяется перемагничиванием изнутри. Большее значение поля старта акселерационного импульса определяется задержкой процесса зародышеобразования в сердцевине образца. Определены условия перехода от одного механизма к другому – это ослабление внутренних напряжений и перемагничивание в неоднородном магнитном поле.

6. Обнаружены материалы с 4-х стабильными состояниями за период перемагничивания. Особенность переключения этих материалов в том, что одна пара импульсов релаксационного типа, а вторая – акселерационного. Из этого следует, что при перемагничивании в однородном поле внутри образца возникает неоднородность, обусловленная полем сердцевины, перемагничивающейся первой. Это поле и увеличивает поле переключения оболочки (релаксационный механизм). Разработана феноменологическая модель, объясняющая существование 4-х стабильного состояния.

7. Создана экспериментальная установка для проведения магнитометрических измерений на базе компьютера и цифрового осциллографа. Исследованы погрешности измерения, связанные с точностью передачи измерительного канала и взаимного влияния полей рассеяния двух бистабильных сердечников.

8. Разработаны экономичные принципы построения магнитометров и способ их оперативной калибровки по магнитному полю Земли (с погрешностью до 0,62%).

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Ломаев Г.В., Каримова Г.В., Степанов В.А. Магнитное поле Земли: биомедицинский и метрологический аспекты исследования // Третья междис-

циплинарная (медицина, биология, физика, радиоэлектроника, химия, биохимия, математика, информатика, педагогика...) конференция с международным участием: Материалы докл. – Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 2004. – С. 23.

2. Ломаев Г.В., Каримова Г.В. Сердечники для магнитных компараторов магнитометра // Измерение, контроль, информатизация: Материалы четвертой международной научно-технической конференции. – Барнаул: АлтГТУ, 2003. - С. 45-46

3. Каримова Г.В. Четырехстабильное состояние аморфного микропровода в стеклянной изоляции // Магнитные явления: Сборник ст. под ред. Ломаева Г.В. – Ижевск: ИжГТУ, 2004. – С. 176-180.

4. G.V. Lomaev, G.V. Karimova. The converters of the magnetic field on base 2- and 4- stable amorphous mikrowire// Proceedings 32nd International Conference and NDT Technique Exposition «Defectoscopy 2002». – Liberec, 2002. – P. 107-113.

5. Ломаев Г.В., Каримова Г.В. Магнитопатогенные зоны: влияние на биосистемы, нормирование, обнаружение// Первая международная научно-практическая конференция «Исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности»: Сборник трудов. – СПб.: Изд-во СПГУ, Т.1, 2005. – С. 186-187.

6. Каримова Г.В. Портативный измеритель геомагнитного поля// Измерение, контроль, информатизация: Материалы шестой международной научно-технической конференции. – Барнаул: АлтГТУ, 2005.- С. 18-20

7. G.V. Lomaev, G.V. Karimova. The improving methods of converter of the magnetic field baed on the bistable mickrowire//Proceedings 35nd International Conference “Defectoskopie 2005”. – Znojmo. – 2005. - P. 133-135.

8. Каримова Г.В. Магнитное поле Земли – эталон для калибровки магнитометров// Магнитные явления: Сб. ст. под ред. проф. Г.В. Ломаева. Вып. 2. – Ижевск: Ассоциация «Научная книга», 2005. – С. 118-130.

9. Ломаев Г.В., Рябов Ю.Г., Каримова Г.В. Магнитопатогенные зоны: влияние на биосистемы, нормирование, обнаружение// Магнитные явления:

Сб. ст. под ред. проф. Г.В. Ломаева. Вып. 2. – Ижевск: Ассоциация «Научная книга», 2005. – С.232-243.

10. Ломаев Г.В., Каримова Г.В. Оперативный метод калибровки магнитометров//Технологии ЭМС, №4. – 2006. – С. 54-62.

11. Баранов С.А., Каримова Г.В., Ломаев Г.В. Движение доменной стенки в литом аморфном микропроводе//Электронная обработка материалов, № 2.- 2006. – С.77 -81.

12. Ломаев Г.В., Рябов Ю.Г., Каримова Г.В., Бондарева Н.В. Экология электромагнитных неионизирующих излучений. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2005. – 122 с.

13. Ломаев Г. В., Каримова Г. В. О калибровке портативных магнитометров среднего класса точности для обнаружения магнитопатогенных зон по магнитному полю Земли//Измерительная техника (в печати)

Цитированная литература

1. Рудяк В.М., Харитонов Ю.Н. О наличии двух самостоятельных механизмов скачка Баркгаузена в ферромагнетиках // Докл. АН СССР. - 1968.- Т.178, N 2.- С.331-333.

2. Ломаев Г.В., Ахизина С.П., Водеников С.К. О двух формах импульсов ЭДС от скачка намагниченности в ферромагнетике // Дефектоскопия. – 1996. – № 12. – С. 54–59.

3. Баранов С.А. Остаточные напряжения в жиле аморфного микропровода // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2003. - №7. - С. 38-40.

4. Жуков А.П. , Пономарев Б.К., Соколовская Ж.Д. О возможной причине появления флуктуаций поля старта в аморфных сплавах // Физикохимия аморфных (стеклообразных) металлических материалов: Под ред. Ю.К. Ковнеристого. – М.: Наука, 1987. – С.142–144.

5. Ломаев Г.В., Ахизина С.П., Глушкова Т.Е. Моделирование больших скачков Баркгаузена//ФММ. – 1997. - №5. – с. 10-11.