

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И.
КАНТА»
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Рекомендована к защите:
методический руководитель
направления подготовки
к.ф.-м.н., доцент ИФМНиИТ

_____ В.В. Родионова

" ____ " _____ 2020 г.

Допущена к защите:
первый заместитель
директора
ИФМНиИТ
к. ф.-м. н., доцент

_____ А.А.
Шпилевой

" ____ " _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Тема:

**«Исследование влияния размеров концевых доменов
бистабильного микропровода на его петлю
гистерезиса»**

**Направление подготовки: 16.03.01 «Техническая
физика»**

Квалификация (степень): **бакалавр**

ВКР защищена на оценку:

Выполнил: студент 4 курса

_____ А.А. Игнатов

Руководитель: к.ф.-м.н., доцент ИФМНиИТ

_____ В.В. Родионова

Калининград, 2020

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Обзор литературы.....	6
1.1 Изготовление аморфных ферромагнитных микропроводов методом Улитовского-Тейлора.....	6
1.2 Микромагнитная структура.....	7
1.3 Магнитные свойства.....	11
1.4 Магнитная бистабильность.....	13
1.5 Влияние поперечного размера микропровода на его магнитные свойства.....	14
Глава 2. Образцы и методы исследования.....	18
2.1 Исследуемые образцы.....	18

2.2 Исследование магнитных свойств.....	18
2.3 Методика измерения магнитных свойств микропроводов.....	23
Глава 3. Полученные результаты.....	30
3.1 Анализ модели микромагнитной структуры микропровода.....	30
3.2 Результаты экспериментов.....	32
Основные результаты и выводы.....	47
Дальнейшие планы.....	49
Библиографический список.....	5
0	

Введение

Несмотря на то, что с момента открытия аморфных ферромагнитных материалов прошло уже более пятидесяти лет, интерес к их магнитным (статическим и динамическим) и структурным свойствам не ослабевает [1, 2]. Свидетельство этому – все большее количество работ и ссылок на них в научных базах данных Web of Science и Scopus.

Использование аморфных ферромагнитных материалов обусловлено не только их отличительными свойствами – повышенной механической прочностью, коррозионной стойкостью, уникальным набором магнитных свойств, но и относительно низкой стоимостью их производства. Такие материалы применяют при изготовлении магнитострикционных вибраторов, сердечников трансформаторов, линий задержки и т.д. [11].

Аморфные ферромагнитные микропровода в стеклянной оболочке обладают рядом уникальных свойств: магнитная бистабильность [3], околонулевая коэрцитивная сила [4], эффект гигантского магнитоимпеданса [5, 6, 8] и другие свойства, зависящие от состава металлической жилы микропровода, его размеров и последующей обработки [6, 7]. Найдены пути прецизионного контроля магнитных характеристик, что обуславливает широкое практическое применение микропроводов при изготовлении высокочувствительных датчиков напряжений, низкого давления, магнитных полей, деформаций и ряда других физических параметров [5, 7, 8, 34].

Скорость движения доменной границы типа head-to-head (далее по тексту ДГ) в бистабильных микропроводах на один-два порядка превосходит скорость движения ДГ в планарных структурах [10, 35]. Данный факт делает бистабильные микропровода перспективными для их использования в кодирующих и логических устройствах [11]. Также важным является то, что путем изменения магнитоупругой анизотропии (варьируя состав металлической жилы, размер микропровода и условия последующей обработки), можно в широком диапазоне менять скорость распространения ДГ и поле переключения магнитного момента бистабильного микропровода [12]. На магнитные свойства микропровода и характеристики процесса его перемагничивания будут влиять механические напряжения, образовавшиеся в ходе закалки и из-за разности коэффициентов теплового расширения оболочки и жилы, знак и величина константы магнитострикции [14], а также геометрические параметры образца [4, 13].

Исследования показали, что, варьируя напряжения внутри микропровода, можно изменять магнитостатические свойства и параметры динамики движения доменной границы, что позволяет управлять скоростью распространения доменной границы, величиной поля, в котором происходит перемагничивание образца, и величиной поля переключения магнитного момента бистабильного микропровода [15, 16, 17]. Оказать влияние на магнитные свойства микропроводов в стеклянной оболочке можно и посредством изменения их геометрических размеров: изменением длины или эффективного радиуса системы

микропроводов [18, 41]. Особенности влияния этих параметров на процесс перемагничивания микропровода и систем на его основе будут исследованы в данной работе. Объектом исследования был выбран аморфный микропровод в стеклянной оболочке с составом жилы $\text{Co}_{83}\text{Fe}_7\text{C}_1\text{Si}_7\text{B}_2$ с полным диаметром $D = 44$ мкм и диаметром внутренней металлической жилы $d = 38$ мкм. Выбранный микропровод обладает магнитной мягкостью выше, чем у бистабильных микропроводов, изготовленных из сплава на основе Fe, – благодаря тонкому стеклянному покрытию и около нулевой положительной константе магнитострикции.

Таким образом, целью данной работы являлась отработка методики исследования магнитных свойств образцов с уменьшенной длиной, а также исследование магнитных свойств магнитомягкого микропровода с около нулевой константой магнитострикции в зависимости от его длины (влияние продольного размера) и количества микропроводов в системе (влияние поперечного размера системы – эффективного радиуса).

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- разработка методики измерения петель гистерезиса коротких, длиной до 1.2 см, магнитомягких микропроводов на установке ИММ-3А;
- получение петель гистерезиса систем из одного, двух и трех микропроводов длиной от 1.2 см до 10 см; анализ зависимости магнитных характеристик (коэффициент прямоугольности, коэрцитивная силу) и особенностей процессов перемагничивания

(по полученным полевым зависимостям дифференциальной восприимчивости) от длины и числа микропроводов в системе;

- анализ и проверка применимости феноменологической модели микромагнитной структуры микропровода, описанной в работах ранее, к полученным результатам;
- теоретический расчет и экспериментальное определение критической длины бистабильности для систем из одного, двух и трех микропроводов;
- анализ влияния концевых доменов на характеристики петли гистерезиса магнитомягкого микропровода и систем на его основе.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Изготовление аморфных ферромагнитных микропроводов методом Улитовского-Тейлора

Аморфный микропровод в стеклянной оболочке представляет собой микропровод с внутренней аморфной металлической жилой, покрытой стеклянной оболочкой. Для микропроводов, полученных методом Улитовского-Тейлора, диаметр жилы, как правило, варьируется в пределах 1-40 мкм, а общий диаметр микропровода в пределах 1,5-55 мкм [43].

Впервые тонкие металлические нити в стеклянной оболочке получил Г.Ф. Тейлор в 1924 г. Позже данный метод доработал А.В. Улитовский [24]. На рисунке 1.1 представлено СЭМ-изображение аморфного микропровода в стеклянной оболочке.

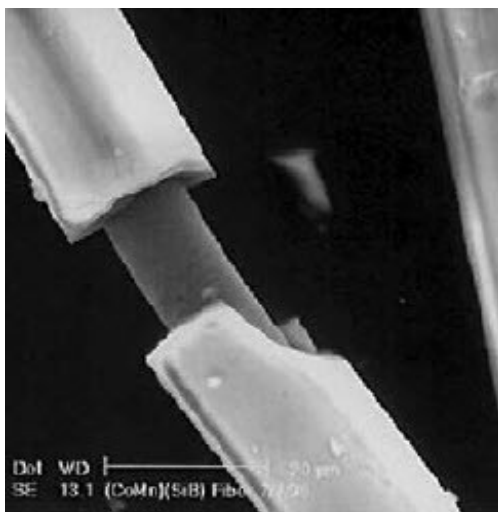


Рис. 1.1. СЭМ-изображение микропровода в стеклянной

оболочке (длина масштабного штриха на снимке 20 мкм)
[22].

Суть метода такова (см. рисунок 1.1): несколько грамм металла помещается на дно запаянной снизу стеклянной трубки, расплавляется в электромагнитном поле высокочастотного индуктора специальной конической формы. Металл в индукторе плавится и размягчает стенки стеклянной трубки. Нижняя часть стеклянной оболочки оттягивается, и, образуя при этом капилляр со сплошным металлическим заполнением, подается на приемное устройство. Также может осуществляться закалка в воде (изображено на рисунке 1.2), либо производится закалка на воздухе [24].

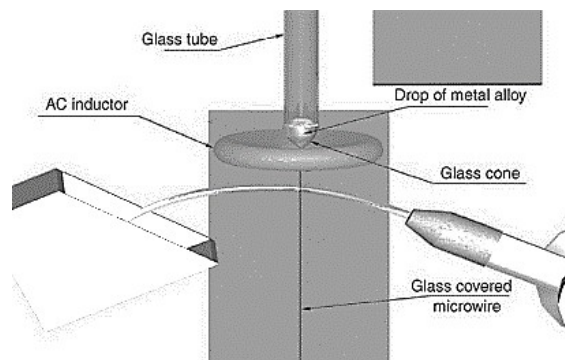


Рис. 1.2. Схема установки по получения аморфного микропровода в стеклянной оболочке методом Улитовского-Тейлора [22].

Данный способ позволяет получать микропровода длиной в несколько километров, также важным преимуществом является относительно низкая стоимость изготовления. Его поперечные размеры изменяются на несколько микрон с момента начала вытяжки до момента окончания. Толщина металлической жилы и

толщина стеклянной оболочки при этом зависят, главным образом, от чистоты используемых материалов, от температуры расплава и скорости вытяжки [43].

1.2 Микромагнитная структура

Механические напряжения в изотропном аморфном материале с ненулевой константой магнитострикции определяют направления преимущественной ориентации магнитных моментов внутри материала. Ориентация магнитного момента определяется направлением напряжения и знаком константы магнитострикции материала λ_s [23]. На рисунке 1.3 схематически показан процесс формирования оси легкого намагничивания в зависимости от направления приложенного напряжения и знака константы магнитострикции.

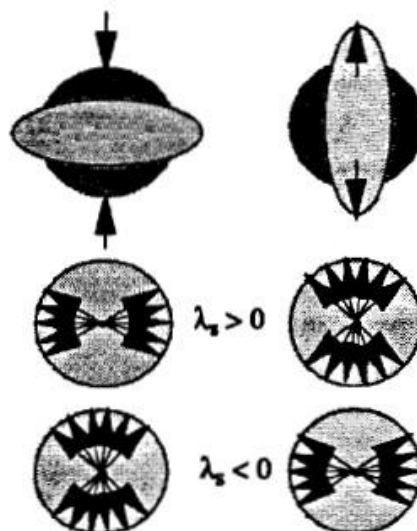


Рис. 1.3. Зависимость направления преимущественной ориентации магнитных моментов в материалах с разными знаками константы магнитострикции от направления приложенных напряжений [23].

В процессе изготовления микропровода методом Улитовского-Тейлора внутри микропровода образуются остаточные механические напряжения из-за:

- Заковки. Пример распределения закалочных напряжений по радиусу представлен на рисунке 1.4 [25].
- Разницы коэффициентов теплового расширения материалов оболочки и жилы. Расчет данных напряжений был произведен в работе [26].
- Скорости вытяжки. Пример распределения таких напряжений по радиусу представлен на рисунке 1.4 [27].

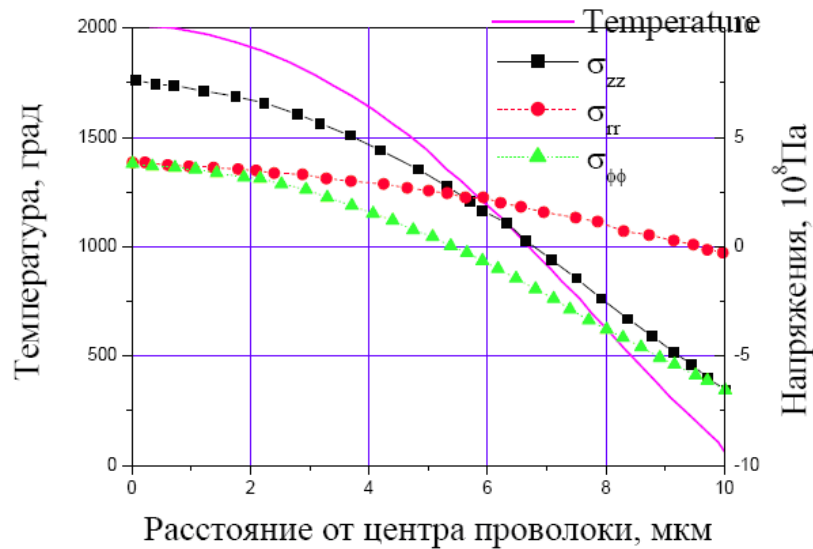


Рис. 1.4. Распределение закалочных напряжений и температуры по радиусу металлической жилы микропровода [25].

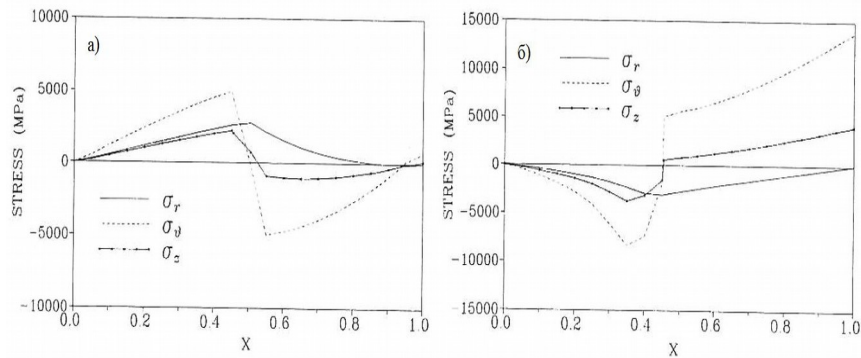


Рис. 1.5. Распределение внутренних упругих напряжений в металлической жиле микропровода в стеклянной оболочке по его радиусу

в зависимости от величины растягивающего напряжения «извлечения»:

а) $T_{ex}=100$ МПа, б) $T_{ex}=350$ Мпа [27].

Считается, что внутри металлической сердцевины основной вклад составляют растягивающие аксиальные напряжения. На периферии металлической сердцевины, за счет контакта металла со стеклянной оболочкой существует переходный слой, где основную роль играют напряжения, наведенные за счет разницы коэффициентов теплового расширения металла и стекла. Здесь результирующая остаточных напряжений направлена перпендикулярно оси микропровода (рис. 1.5).

Например, в работе [28], основываясь на принципе минимума энергии (в данном случае, магнитоупругой), выделяют три области внутри металлической сердцевины микропровода с большой по значению константой магнитострикции:

- 1) $r \in [0, R_C)$: в данной области преобладает осевая компонента остаточных напряжений $\sigma_{zz}(r)$ (рисунок 1.6), что приводит к одноосной магнитной анизотропии с

- осью легкого намагничивания вдоль оси микропровода (R_C - радиус аксиально намагниченного керна);
- 2) $r \in (R_C, R_{OZ})$: в данной области преобладают компоненты $\sigma_{rr}(r)$ (растягивающая) и $\sigma_{\theta\theta}(r)$ (сжимающая). Иначе говоря, в данной области преобладают радиальная (положительная константа магнитострикции) либо тангенциальная (отрицательная константа магнитострикции) ось легкого намагничивания (R_{OZ} - нижняя граница периферийной зоны, где преобладает радиальная/тангенциальная ось легкого намагничивания);
- 3) $r \in (R_{OZ}, R_m]$: в данной области сжимающие (отрицательные) компоненты $\sigma_{zz}(r)$ и $\sigma_{\theta\theta}(r)$ и растягивающая (положительная) $\sigma_{rr}(r)$ формируют ось легкого намагничивания вдоль радиуса (R_m - радиус металлической жилы).

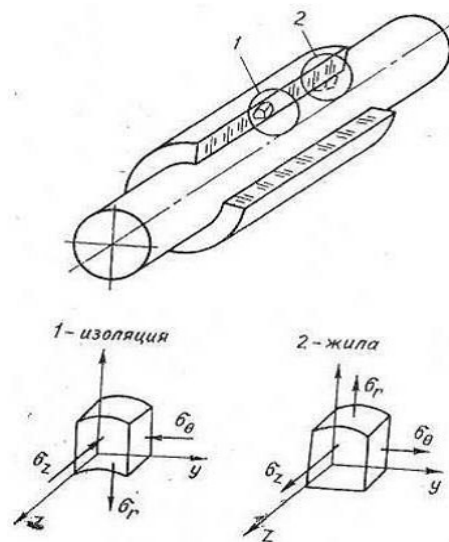


Рис. 1.6. Схематическое изображение направлений компонент механических напряжений в цилиндрической системе координат [29].

Схематическое изображение микромагнитной структуры микропровода в стеклянной оболочке в поперечном сечении вдали от концов представлено на рис. 1.7.

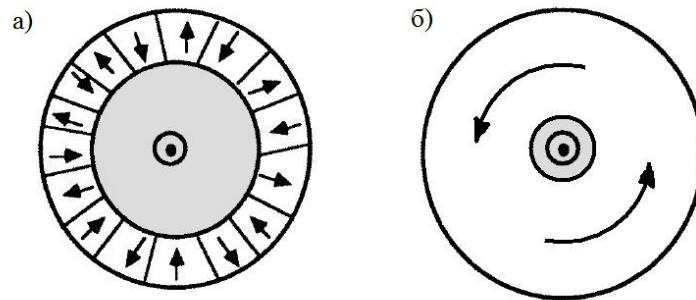


Рис. 1.7. Схематическое изображение магнитной микроструктуры микропровода в стеклянной изоляции для случая: **а)** микропровода с положительной константой магнитострикции; **б)** микропровода с отрицательной константой магнитострикции [30].

1.3 Магнитные свойства

Аморфные ферромагнитные микропровода в стеклянной оболочке делят по магнитным свойствам на три группы – микропровода из сплавов с положительной, отрицательной и около нулевой константой магнитострикции [3].

У микропроводов из сплава на основе Fe константа магнитострикции положительна и имеет величину порядка $\lambda_s \sim 10^{-5}$ [3]. В этом случае петля гистерезиса имеет прямоугольную форму (рисунок 1.8а), то есть магнитный момент микропровода принимает два значения: $+M_s$ и $-M_s$. Считается, что такой микропровод однодоменный (толщина периферии с радиальной структурой несущественна), и процесс перемагничивания такого микропровода происходит

скачком Баркгаузена, реализующемся в этом случае быстрым перемещением доменной границы. Такой процесс перемагничивания называется магнитной бистабильностью, а сам микропровод – бистабильным.

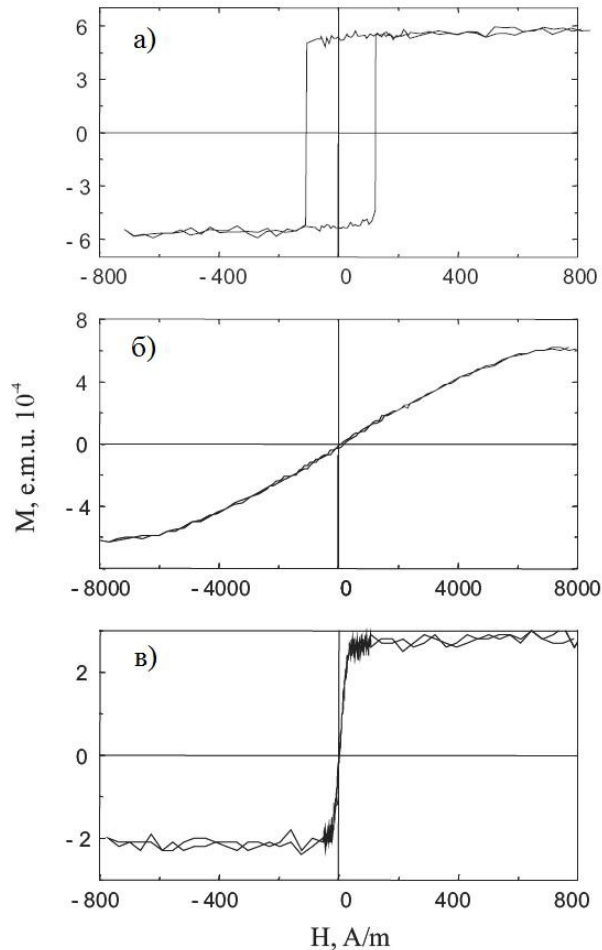


Рис. 1.8. Петли гистерезиса для микропроводов в стеклянной оболочке, изготовленных из сплавов с различной магнитострикцией:
а) $\lambda_s > 0$, б) $\lambda_s < 0$, в) $\lambda_s \sim 0$ [22].

У микропроводов, изготовленных из сплава на основе Co , константа магнитострикции отрицательная и имеет величину порядка $\lambda_s \sim -10^{-6}$. Для таких микропроводов характерна безгистерезисная зависимость магнитного момента от внешнего поля (рисунок 1.8б). Процесс перемагничивания происходит вращением вектора намагниченности.

Также существуют микропровода смешанного типа, у которых константа магнитострикции $\lambda_s \sim \pm 10^{-7}$ считается пренебрежимо малой, то есть порядка нуля. Характерная петля гистерезиса для таких микропроводов представлена на рисунке 1.8в). Процесс перемагничивания в них происходит совместно вращением вектора намагниченности и движением доменной границы [18, 33].

1.4 Магнитная бистабильность

На рисунке 1.9 слева схематически представлена доменная структура бистабильного микропровода, а справа – точками на петле гистерезиса положение соответствующего этапа перемагничивания [31]. При перемагничивании бистабильных микропроводов на конце микропровода появляется зародыш обратной фазы, с ростом поля его объем – увеличивается. Затем происходит срыв и быстрое распространение доменной границы между ним и керном микропровода вдоль оси образца. Такой механизм перемагничивания ассоциируют со скачком Баркгаузена, классическая теория которого подразумевает задержку в процессе перемагничивания образца на дефектах с последующим резким изменением намагниченности.

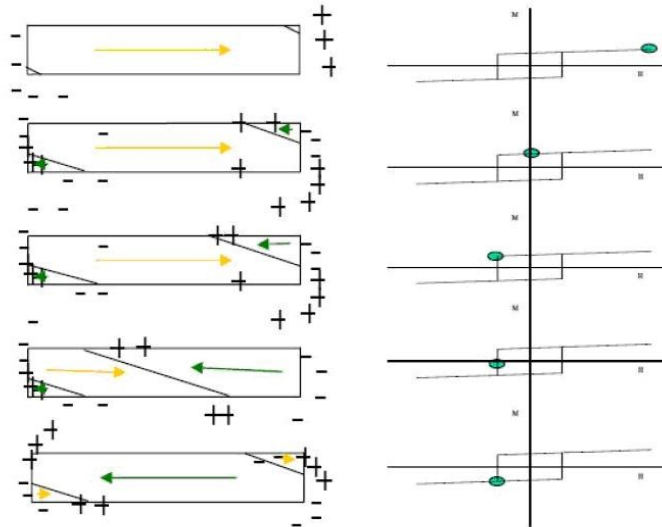


Рис. 1.9. Схематическое изображение доменной структуры (слева) и соответствующие ей точки на петле гистерезиса (справа) бистабильного микропровода в процессе перемангничивания [32].

1.5. Влияние поперечного размера микропровода на его магнитные свойства

Критическую длину бистабильного микропровода было предложено связать с размерами замыкающих концевых доменов: $L_{cr} = 2L_{cd}$, где L_{cr} - критическая длина бистабильности, L_{cd} - величина замыкающего домена [36]. В работе [37] были проведены экспериментальные исследования и сделаны теоретические оценки критических длин микропроводов пяти составов на основе Fe, изготовленных разными методами. Хорошее согласование теоретических и экспериментально полученных величин критической длины бистабильности было обнаружено только для одного образца. Расхождение значений авторы объясняют тем, что при проведении теоретической оценки

критической длины, то есть при оценке величины концевых доменов, не учитывается вклад магнитоупругой энергии в энергию доменной границы – не учитывается, в частности, вклад напряжений, создаваемых стеклянной оболочкой, в случае микропровода, изготовленного методом Улитовского-Тейлора. При расчете критической длины бистабильности в статьях учитывался вклад только магнитостатической энергии, когда величина размагничивающего поля зависит от отношения диаметра металлической жилы к длине микропровода.

Величины концевых доменов в работе [4] были оценены также экспериментально (их удвоенная величина соответствовала экспериментально полученной критической длине). С помощью короткой приемной катушки,двигающейся вдоль оси микропровода, был определен профиль намагниченности по длине, и измерены локальные петли гистерезиса. Форма и коэффициент прямоугольности этих петель служили критерием определения доменной структуры микропровода – в центре петли гистерезиса имели прямоугольную форму, а у концов – нет, что соответствует осевой анизотропии в центре и нарушению ее у концов микропровода. На рисунке 1.11 представлено распределение аксиальной компоненты намагниченности вдоль длины микропроводов, изготовленных из сплавов на основе Fe двух типов – толстого и тонкого в стеклянной оболочке.

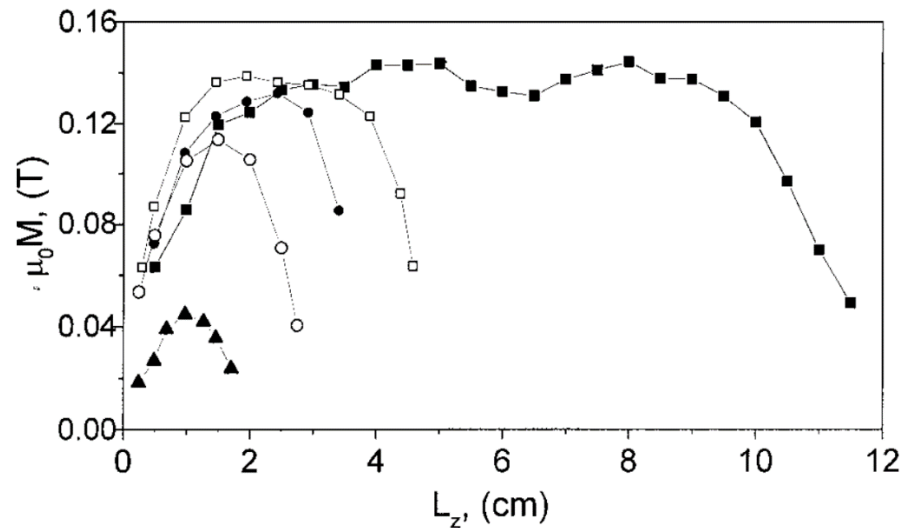


Рис. 1.11. Распределение продольной компоненты намагниченности по длине микропроводов состава $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ длиной 2, 3, 4, 5, 12 см экспериментально полученное в [41].

Сравнивая величину аксиальной компоненты намагниченности микропровода с величиной намагниченности насыщения, полученной при измерении петель гистерезиса, можно оценить объем аксиально намагниченного ядра в микропроводе определенной длины. Результаты такого метода оценки согласуются с результатами эксперимента, описанного в [38], где соответствующие оценки доли ядра для микропроводов разной длины проводились по величине остаточной намагниченности при перемагничивании микропроводов в больших полях.

Распределение намагниченности по длине микропровода было рассчитано также для микропровода из сплава на основе Co [39]. Профили, полученные экспериментально и теоретически, имели схожий вид. В этой же работе можно найти вывод формулы критической длины микропровода, при которой влияние концевых эффектов является существенным.

Расчеты проводились для толстых аморфных микропроводов с отрицательной константой магнитострикции.

Особенности магнитных свойств микропровода из сплавов на основе Со диаметром 125 мкм исследовались в работе [40], где сравнивались между собой микропровода длиной 3, 7 и 12 см. Авторами обнаружено существенное изменение формы петель гистерезиса при практически неизменной коэрцитивной силе. Было также исследовано распределение осевой компоненты магнитного момента по длине микропровода. Намагниченность становится однородной в центральной части микропровода лишь для образцов, длина которых превышает 4 см. Для более коротких микропроводов оказывается существенным влияние концевых эффектов.

Влияние концевых эффектов на однородность распределения намагниченности показано также в работе [40]. Также обнаружено, что размеры этих неоднородностей (замыкающие домены вблизи концов микропровода) могут достигать в 30 - 130 микронных проводах нескольких сантиметров. Кроме того, предложена формула для оценки размеров таких неоднородностей в случае микропровода с отрицательной константой магнитострикции (на основе кобальта):

$$L_z^c = R_1 \left[\frac{M_s^2}{\eta_1 K_e} \ln \frac{M_s^2}{\eta_1 K_e} \right]^{0.5},$$

где L^* - критическая длина микропровода, при которой распределение намагниченности по длине образца неоднородно, R_1 - радиус зерна, M_s - намагниченность насыщения, K_e - эффективная константа анизотропии, η_1 - численный параметр. Характерная длина, на которой

происходит существенное уменьшение значения продольной компоненты намагниченности, на несколько порядков больше диаметра микропровода. Отметим, что при изменении длины микропровода от 28 до 8 мм изменялся лишь наклон петли гистерезиса. Коэрцитивная сила оставалась без изменений.

Исследования, проведенные в [41], показали, что критическая длина для $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ($d = 125$ мкм) микропроводов практически вдвое меньше, чем для микропроводов того же диаметра, но изготовленных из сплава $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$. Помимо меньшей величины намагниченности насыщения и меньшего относительного диаметра зерна, дающих меньшее размагничивающее поле (и, следовательно, меньшую критическую длину), в микропроводах из сплава на основе Co намагниченность во внешнем слое направлена не радиально, а циркулярно. В работе [41] предложена теоретическая модель, показывающая, что в этом случае замыкающие домены должны иметь иную структуру, чем в микропроводах из сплавов на основе Fe.

Важную роль в формировании магнитных свойств микропровода играет отношение диаметра жилы к диаметру всего микропровода. Основными напряжениями, определяющими магнитную структуру и магнитные свойства в микропроводе в стеклянной оболочке, являются напряжения, возникающие из-за разницы коэффициентов теплового расширения металлического сплава и стекла. Величина этих напряжений зависит от отношения полного диаметра микропровода к диаметру его металлической жилы,

D/d (где d – диаметр металлической жилы, а D – полный диаметр микропровода в стеклянной оболочке). Влияние величины диаметра металлической жилы и отношения диаметров на петли гистерезиса микропровода рассмотрены в статье [42]. Авторы отмечают несистематичность изменения наклона петли и коэрцитивности с одновременным изменением параметров d и D/d . Это связано с тем, что при переходе от микропровода к микропроводу изменяются одновременно два параметра. При одинаковых значениях D/d увеличение диаметра микропровода приводит к уменьшению наклона петли гистерезиса, что согласуется с теорией влияния форм-фактора образца. Одновременное изменение этих двух факторов также мешает исследовать влияние напряжений, вызванных оболочкой.

При исследованиях влияния поперечных размеров на магнитные свойства микропровода следует также помнить про флуктуацию параметров d и D микропровода по его длине [43].

Глава 2. Образцы и методы исследования

2.1 Исследуемые образцы

Для измерений был выбран аморфный ферромагнитный микропровод в стеклянной оболочке с составом жилы $\text{Co}_{83}\text{Fe}_7\text{C}_1\text{Si}_7\text{B}_2$ с полным диаметром $D = 44$ мкм и диаметром жилы $d = 38$ мкм, значение константы магнитострикции – околонулевое. Данный микропровод изготовлен методом Улитовского-Тейлора. Отличительные свойства данного образца – усиленные магнито-мягкие свойства и бистабильная петля гистерезиса с ненулевой коэрцитивной силой. Последнее свойство особенно интересно тем, что, как правило, у образцов с околонулевым значением константы магнитострикции петля гистерезиса имеет вид, представленный на рис. 1.8 в).

2.2 Исследование магнитных свойств

Индукционный метод изучения процессов перемагничивания основывается на явлении электромагнитной индукции.

$$\varepsilon = \frac{-d\Phi}{dt},$$

где ε – ЭДС, Φ – магнитный поток через контур, t – время.

Изменять магнитный поток можно 2 способами:

- 1) Периодически изменять намагниченность образца (перемагничивать) внешним полем;
- 2) Изменять положение образца относительно измерительных катушек.

При использовании первого способа нужно понимать, что магнитный поток, проходящий через измерительную катушку, является суммой магнитных потоков, происходящих от магнитного поля, которое создает образец намагниченностью M , и от магнитного поля H [44]:

$$\Phi = \mu_0 (A_c H + A_s M), \quad (2.1-1)$$

где A_c и A_s - площади поперечного сечения катушки и образца, соответственно.

Индукцированная ЭДС в катушке содержит две компоненты [44]:

$$\varepsilon = -\mu_0 N \left(A_c \frac{dH}{dt} + A_s \frac{dM}{dt} \right). \quad (2.1-2)$$

Чтобы исключить компоненту $A_c \frac{dH}{dt}$, возникающую из-за внешнего магнитного поля, используется математический алгоритм компенсации, либо последовательно с измерительной катушкой включается компенсационная, единственное отличие которой от измерительной является противоположная по направлению намотка.

После интегрирования формулы (2.1-2), получаем выражения для намагниченности образца [44]:

$$M = \frac{1}{\mu_0 N A_s} \int \varepsilon dt. \quad (2.1-3)$$

То есть, зная зависимость ЭДС от приложенного поля, можно численно рассчитать по формуле 2.1-3 зависимость намагниченности образца от приложенного поля.

Магнитометр ИММ-3А. Работа данного устройства основана на индукционном методе. Изменение магнитного потока достигается перемагничиванием образца внешним полем.

Принципиальная схема данной установки представлена на рисунке 2.1. На рисунке 2.2. – фотография установки.

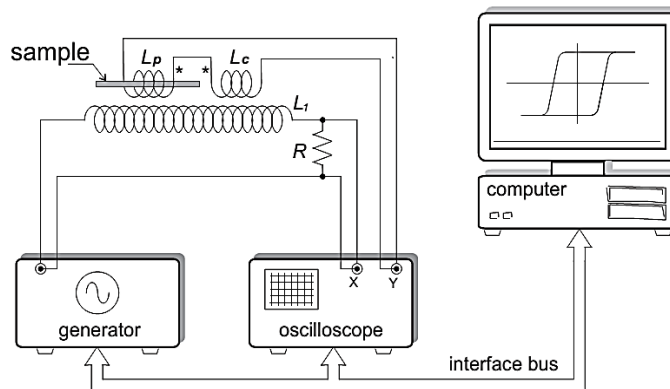


Рис. 2.1. Блок- схема установки ИММ-3А [44].

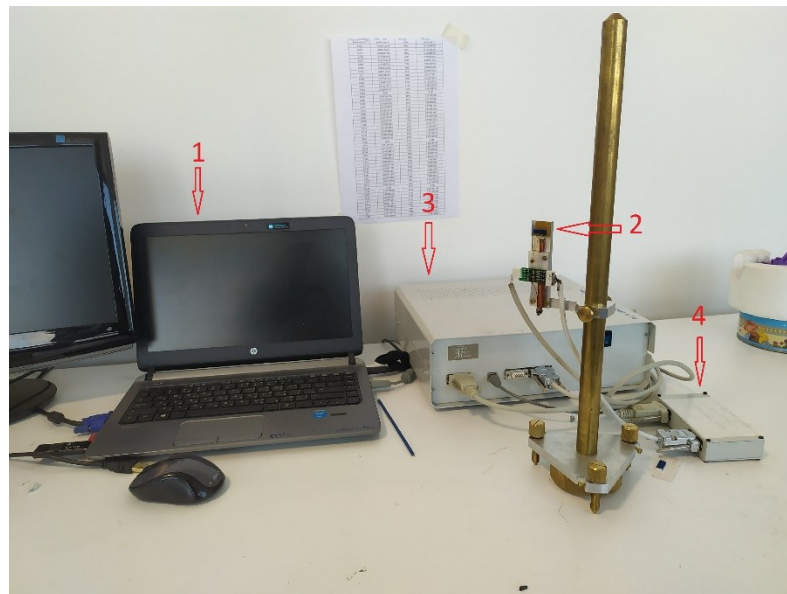


Рис. 2.2. Фотография установки ИММ-3А, где
 1 - компьютер с необходимым ПО для работы с установкой,
 2 - индукционный модуль,
 3 - измерительный блок,
 4 - предусилитель.

Предусилитель на входе соединен с индукционным модулем, а на выходе - с измерительным блоком. Компьютер с ПО соединен с измерительным блоком. Полученные данные сохраняются по умолчанию в формате text document - данные в виде таблицы.

В измерительном блоке размещены стабилизированные источники питания, плата источника тока для питания соленоида индукционного модуля, плата усиления и регистрации сигналов, включающая цифро-аналоговый и аналого-цифровой преобразователи. Блок служит для формирования тока питания соленоида, переменного синусоидального тока проводимости микропровода и регистрации принимаемых сигналов.

Индукционный модуль (рис. 2.3) представляет собой длинный соленоид длиной 7,3 см, закрепленный на алюминиевой подставке, внутри которого находится капилляр. На капилляр намотано 3 катушки - две по 0,05 см и одна 2 см в длину. Катушки по 0,05 см включены последовательно, между ними вплотную расположена катушка 2 см. Катушки расположены симметрично относительно центра внешнего соленоида. Блок может работать в режиме оцифровки сигнала либо с двух катушек, либо с одной, т.к. катушка 2 см и две по 0,05 см не соединены между собой. Как правило, в режиме измерения петель гистерезиса включают катушку 2 см, а в режиме измерения скорости доменных границ методом Сикстуса-Тонкса работают две по 0,05 см. В данной работе измерения петель гистерезиса производились с использованием катушки длиной 2 см.

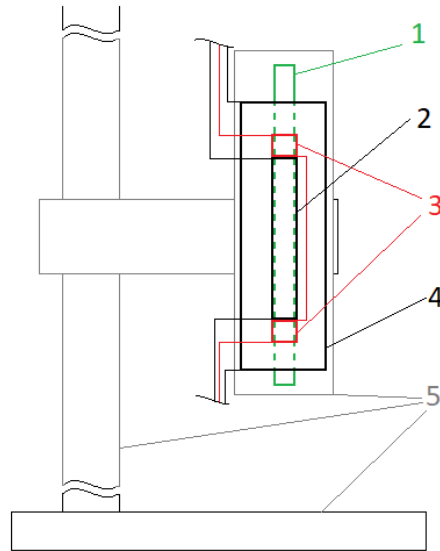


Рис. 2.3. *Схема индукционного модуля*

1 - внутренний капилляр,

2 - 2 см катушка,

3 - две катушки по 0,05 см,

4 - внешний соленоид,

5 - подставка со штативом, на котором крепится блок с соленоидом.

Вибрационный магнитометр (VSM). Работа данного устройства также основана на индукционном методе. Принципиальное отличие от предыдущей установки заключается в методе изменения магнитного потока через измерительные катушки - изменяется положение образца относительно измерительных катушек.

Образец, укрепленный на штоке, приводится в колебательное движение в системе четырех измерительных катушек (рис. 2.4). При этом, ось колебаний параллельна плоскости катушек, а магнитный момент образца, индуцируемый внешним магнитным полем, ориентирован перпендикулярно плоскости катушек. Катушки расположены на полюсах электромагнита, который является источником магнитного поля. На каждом полюсе пары катушек

соединены «встречно», а пары между собой – «последовательно». При движении образца вверх увеличивается магнитный поток в верхних катушках и уменьшается в нижних катушках. Возникающие в них ЭДС имеют разные знаки, но, благодаря встречному включению катушек, складываются. При движении образца вниз принципиально ничего не меняется из соображений симметрии процесса. В то же время изменение однородного поля электромагнита создает взаимно компенсирующиеся сигналы в катушках. Такая система соединения катушек позволяет выделить полезный сигнал от образца и минимизировать паразитные сигналы от внешних однородных полей.

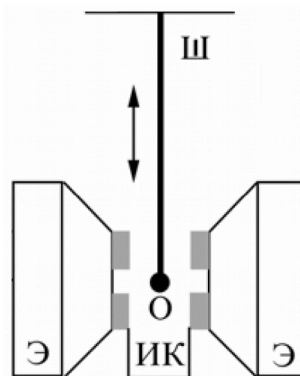


Рис. 2.4. Схематичное изображение вибрационного магнитометра.

Ш – шток, *ИК* – измерительные катушки,
Э – электромагниты, *О* – образец.

2.3 Методика измерения магнитных свойств микропроводов

Для измерения петель гистерезиса была выбрана установка ИММ-3А, т.к. ее устройство не ограничивает длину образца, в отличие от VSM (не более 3 см). Для измерения

момента насыщения образцов был использован VSM, т.к. данная установка позволяет измерить намагниченность всего образца, а не только той части, которая находится в измерительной катушке, как в ИММ-3А. Кроме того, измерения на установке VSM включают в себя процесс калибровки, что позволяет получить абсолютные значения момента, а не относительные.

Пробоподготовка образцов. Пробоподготовка образца начиналась с отрезания необходимого количества микропровода – длиной 11 см. Далее, производилась визуальная проверка на дефекты, дефектные (излом микропровода, отсутствие стеклянной оболочки) образцы отбраковывались. Далее, измерялись петли гистерезиса для каждого микропровода, если петли значительно отличались по форме или коэрцитивной силе, то такие микропровода также отбраковывались. Несколько типичных петель гистерезиса с разбросом значений коэрцитивной силы порядка поля флуктуации представлены на рисунке 2.4.

После отбраковки дефектных образцов, из оставшихся случайным образом отбирались шесть (их петли гистерезиса представлен на рис. 2.4). Один откладывался как самостоятельный образец, а остальные – склеивались по два и по три микропровода. Дополнительно была проведена проверка влияния клея на магнитные свойства микропроводов, для этого из микропроводов, прошедших проверку на дефекты, случайным образом отбирался микропровод, еще раз измерялась его петля гистерезиса, после наносился слой клея. После полного высыхания клея опять измерялась петля гистерезиса и сравнивалась с петлей

«без клея». Как видно из рис. 2.5, клей не оказывает заметного влияния на магнитные свойства микропровода.

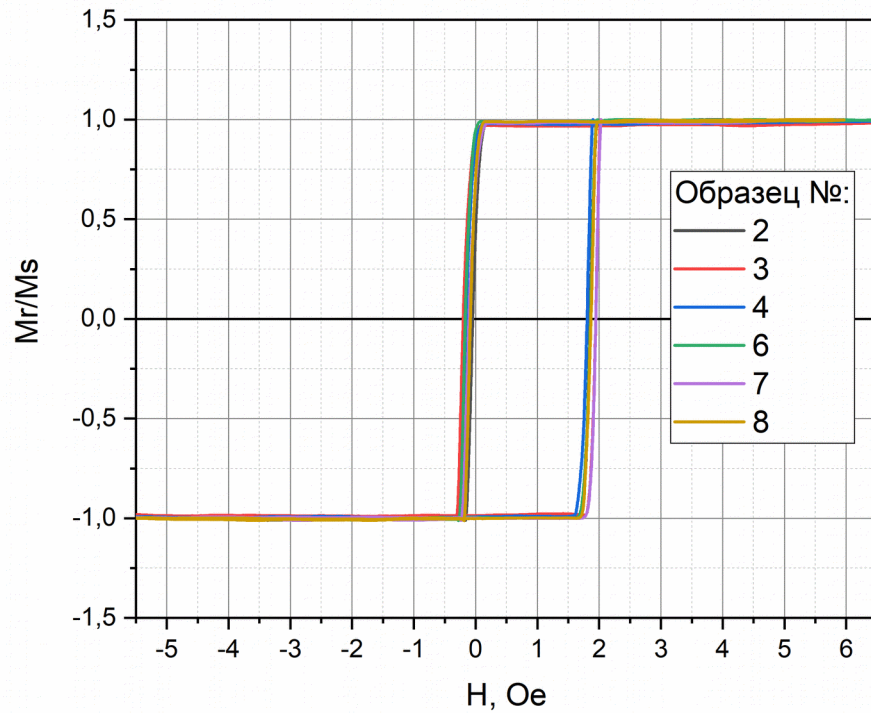


Рис. 2.4. Петли шести отобранных случайным образом образцов длиной 11 см.

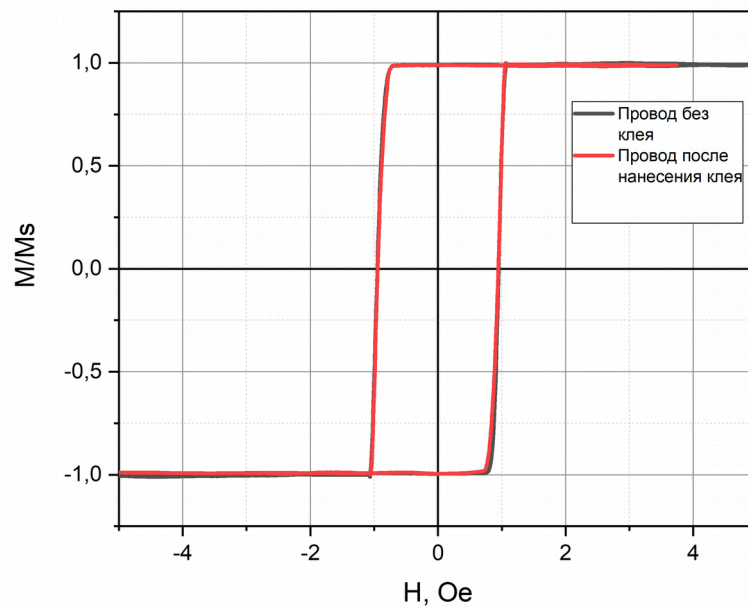


Рис. 2.5. Сравнение петель гистерезиса одного микропровода в клее и без.

Измерение петель гистерезиса. Как уже было сказано, петли гистерезиса измерялись на установке ИММ-ЗА. Изначально была предпринята попытка приклеивать микропровод к тонкой медной проволоке, но этот подход не дал результата, т.к. удовлетворительно приклеить микропровод не получалось. Тогда было принято решение изменить ориентацию приемного индукционного модуля так, чтобы капилляр был расположен горизонтально. Сделано это было с целью недопущения выпадения микропровода из капилляра под действием силы тяжести. Микропровод помещался в капилляр соосно ему, без изгибов. После каждого измерения микропровод доставался и помещался обратно также без изгибов. Короткий микропровод продвигался тонкой медной проволокой до симметричного расположения относительно концов измерительной катушки. Далее проводились измерения петли гистерезиса. После каждого измерения микропровод доставался и помещался обратно. Для каждой длины микропровода проводилось не менее пяти измерений. Если результаты измерений не все повторялись, то проводилось еще пять измерений. Для измерения петель гистерезиса микропроводов меньшей длины, микропровод отрезался до нужной длины всегда с одной и той же стороны. Вставлялся микропровод в капилляр всегда одной и той же стороной, соосно, без изгибов (медный провод не снимался).

Методика измерения коэрцитивной силы. Для оценки коэрцитивной силы график в районе пересечения оси ОХ аппроксимировался линейной функцией. Далее, находилась координата по Х точки пересечения данной линии и оси ОХ. Таким же образом находилась координата точки пересечения для другой ветви. Потом находилось расстояние между этими двумя точками и делилось на два. Полученное число являлось коэрцитивной силой.

Методика измерения коэффициента прямоугольности. Так как точки с координатой $M/M_s = 0$ не наблюдалось, брались две точки (симметричные относительно нуля, максимально близко располагающиеся к нему). Далее, строилась прямая, проходящая через эти две точки, и находилась координата пересечения данной прямой с осью ОУ.

Отработка методики измерения петель гистерезиса коротких микропроводов. Задача измерения петель гистерезиса коротких образцов на установке ИММ-ЗА была поставлена впервые автору дипломной работы. Поскольку приемная катушка в измерительном модуле не видна, в технических характеристиках установки ее положение не указано, то было принято решение установить ее расположение косвенно – посредством измерения петель гистерезиса одного микропровода для различных положений этого микропровода относительно измерительной катушки.

Суть эксперимента была в следующем: относительно предполагаемой координаты конца приемной катушки («0» на рис. 2.6 а, б) смещался микропровод и в каждом его положении проводилось измерение петли гистерезиса.

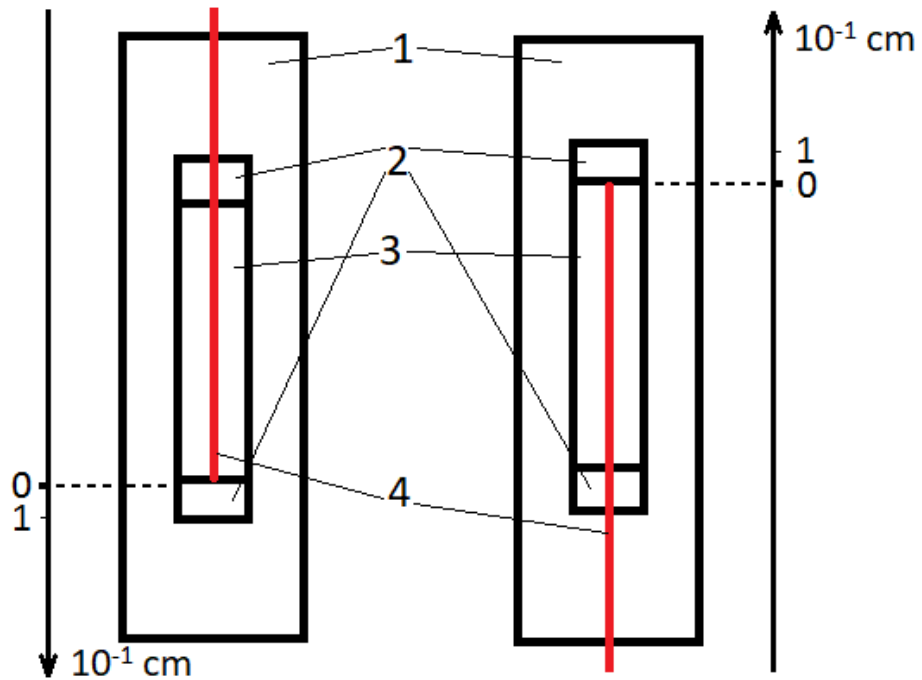


Рис. 2.6. Схематическое изображение микропровода и измерительного модуля в эксперименте по определению положения измерительной катушки:

- 1 - внешний (перемещающий) соленоид,
 2 - приемная катушка,
 3 - образец,
 4 - микропровод.

Далее, микропровод помещался в приемный модуль как показано на рис. 2.6, продвигался вниз (2.6 а) и вверх (2.6 б). На соответствующих координатных осях отмечалось положение конца микропровода. По мере продвижения микропровода, через каждый миллиметр снимались петли гистерезиса. Получался набор петель гистерезиса для каждого положения микропровода в пределах 0-1.2 см относительно предполагаемых краев измерительной катушки. На рисунке 2.8 представлен набор петель гистерезиса, полученный при измерениях согласно схеме, представленной на рисунке 2.6 а).

Сравнивая полученный набор петель гистерезиса, было найдено для каких положений микропровода петли гистерезиса получились одинаковые (рис. 2.7), т.е. в таких

положениях микропровод находился симметрично относительно катушки. Зная координаты этих положений, был вычислен центр измерительной катушки в координатном базисе (рис. 2.6 а), который привязан к точке на измерительном модуле, положение которой можно измерить напрямую. Относительно этой точки и центрировался микропровод.

В ходе данного эксперимента было определено положение приемной катушки в измерительном модуле. Также было проанализировано изменение формы петли гистерезиса микропровода относительно его расположения внутри приемной катушки (рис. 2.8).

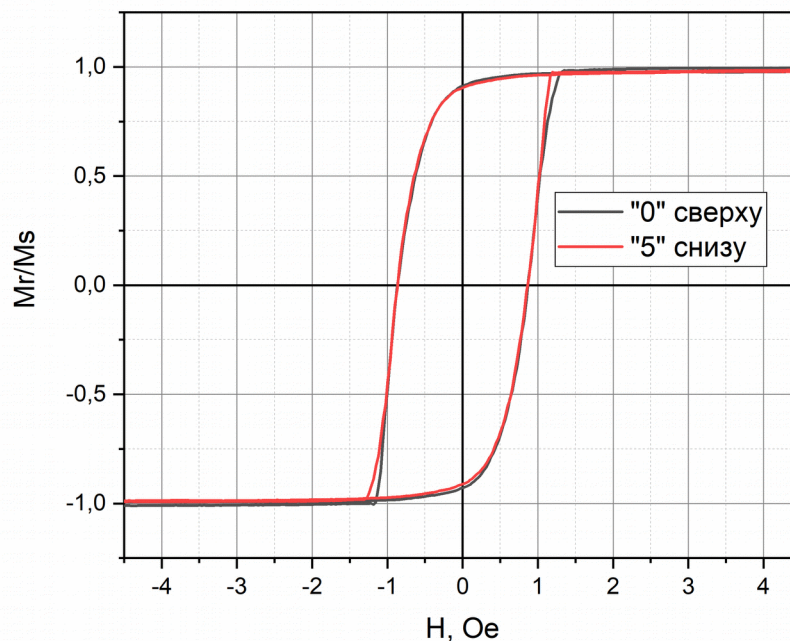


Рис. 2.7. Сравнение петель гистерезиса для координаты «0» сверху (рис. 2.6 а) и координаты «5» снизу (рис. 2.6 б).

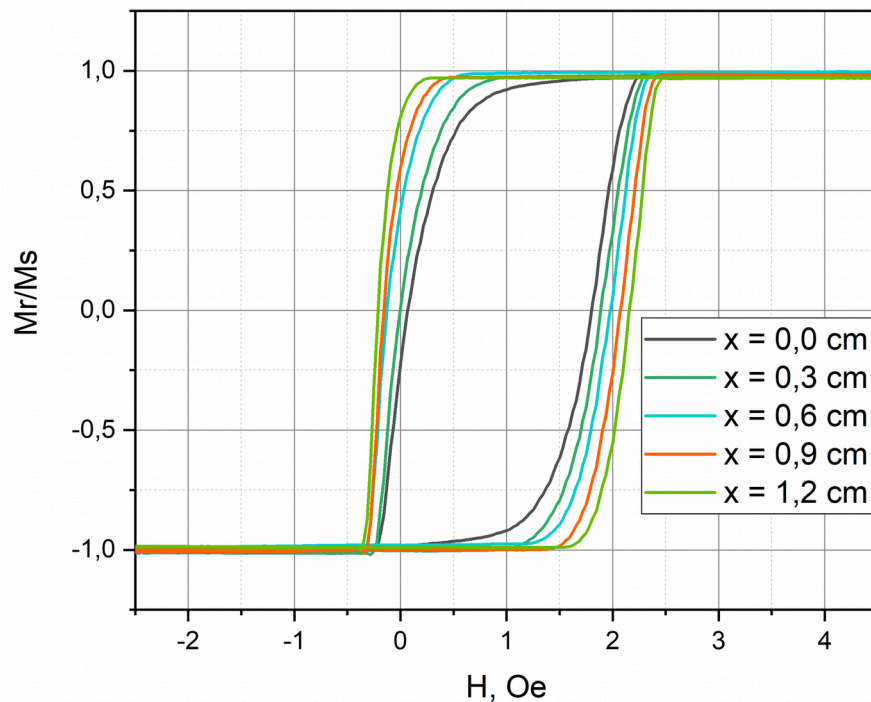


Рис. 2.8. Петли гистерезиса для различных положений микропровода относительно приемной катушки.

Из данного графика (рис. 2.7) следует, что по мере приближения к центру микропровода растет коэффициент прямоугольности петли и коэрцитивная сила, а также форма петли приближается к форме бистабильной петли. Анализируя вышесказанное, можно сделать вывод, что по мере приближения к центру микропровода растет относительный объем аксиально намагниченного керна, а при приближении к концу микропровода, соответственно, уменьшается. Также была измерена петля гистерезиса для участка длиной 0,2 см от края микропровода (рис. 2.9). Анализируя форму петли данного участка, можно сделать вывод, что относительный объем аксиально намагниченного керна вблизи конца микропровода мал. Из вышесказанного

следует, что модель доменной структуры образца, описанная в главе 3, применима к исследуемому образцу.

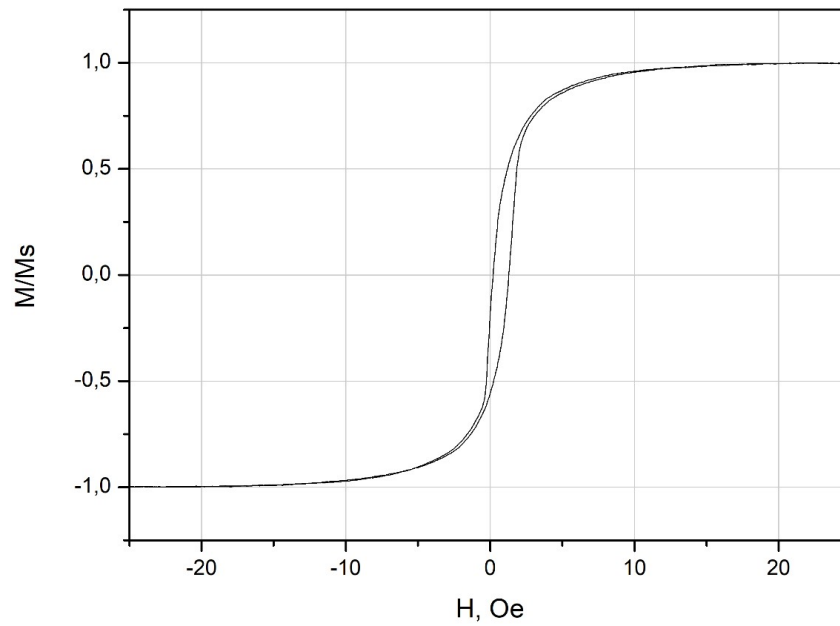


Рис. 2.9. Петля гистерезиса для участка микропровода длиной 0,2 см от конца микропровода.

Глава 3. Полученные результаты

3.1 Анализ модели микромагнитной структуры микропровода

В статье [41] описывается теоретическое получение значения критической длины бистабильности для короткого аморфного микропровода с положительной константой магнитострикции с доменной структурой, показанной на рисунке 3.1.

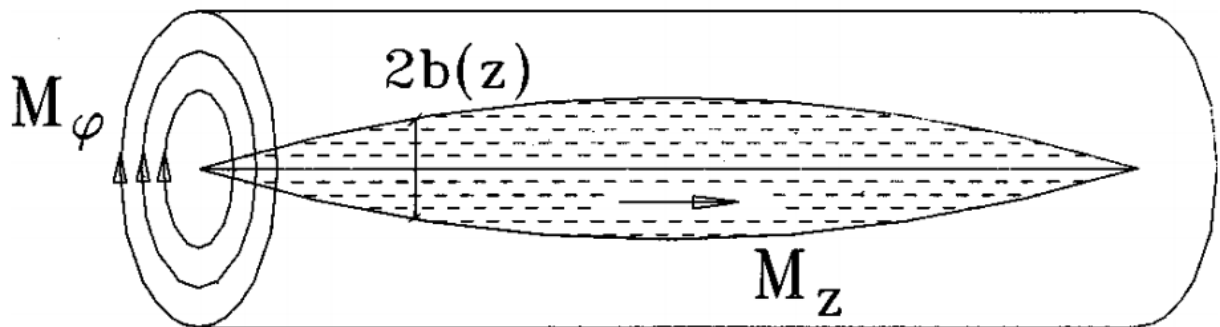


Рис. 3.1. Доменная структура аморфного микропровода с положительной константой магнитострикции [41]. M_φ - азимутальная компонента намагниченности, M_z - аксиальная компонента намагниченности, $b(z)$ - функция распределения эффективного радиуса по длине микропровода.

В данной статье [41] была получена формула значения критической длины аморфного микропровода с положительной константой магнитострикции:

$$L_z^c = R_1 \left[\frac{M_s^2}{\eta_1 K_e} \ln \frac{M_s^2}{\eta_1 K_e} \right]^{0.5}, \quad (3.1)$$

где R_1 - усредненный радиус аксиально намагниченного ядра, M_s - намагниченность насыщения, η_1 - численный параметр, K_e - эффективная константа анизотропии. То есть,

для нахождения значения критической длины L_z^i необходимо знать данные параметры. Значение $\eta_1 \approx 0.027$ (дано в статье). Намагниченность насыщения, M_s , была получена экспериментально. Усредненный радиус аксиально намагниченного ядра R_1 и эффективную константу анизотропии K_e необходимо рассчитать, используя имеющиеся формулы.

В данной статье [41] также была дана формула для усредненного радиуса аксиально намагниченного ядра R_1 :

$$R_1 \approx R \left(\frac{M_r}{M_s} \right)^{0.5}, \quad (3.2)$$

где R – радиус металлической жилы микропровода, M_r – остаточная намагниченность микропровода.

Далее, для вычисления эффективной константы анизотропии K_e была использована формула [41]:

$$b_0 = L \left[\left(\eta_1 \frac{K_e}{M_s^2} + \eta_2 \frac{H_0}{M_s} \right) / \ln \left(\eta_1 \frac{K_e}{M_s^2} + \eta_2 \frac{H_0}{M_s} \right) \right]^{10.5}, \quad (3.3)$$

где H_0 – амплитуда внешнего поля, η_2 – численный параметр (≈ 0.023), L_z – длина микропровода, b_0 – величина, имеющая смысл значения максимума функции распределения эффективного радиуса по длине микропровода. Для нахождения K_e известно все, кроме b_0 . Для нахождения b_0 надо знать значение функции распределения хотя бы в одной точке или ее усредненное значение на каком-либо интервале. Сама функция распределения [41]:

$$b(z) = b_0 \left[1 - (2z/L_z)^2 \right]; |z| \leq L_z/2. \quad (3.4)$$

Для нахождения $b(z)$ воспользуемся формулой [41]:

$$\frac{M_z(z)}{M_s} = (2 \ln 2 - 1) \left(\frac{b(z)}{R_1} \right)^2, \quad (3.5)$$

где $M_z(z)$ – функция распределения продольной компоненты намагниченности микропровода.

Для микропроводов длиной до 2 см включительно, необходимо принимать вместо $b(z)$ ее усредненное значение \acute{b} по всей длине. В случае образцов длиной более 2 см необходимо принимать вместо $b(z)$ ее усредненное значение \acute{b} в пределах $z \in [-1 \text{ см}; 1 \text{ см}]$. Такой выбор пределов по z объясняется длиной приемной катушки в 2 см. А $M_z(z)$ рассматривать не как функцию распределения продольного значения намагниченности микропровода, а как значение намагниченности микропровода сразу после большого скачка Баркгаузена.

Тогда формула для нахождения \acute{b} примет вид:

$$\acute{b} = R_1 \left(\frac{M_z}{M_s} \frac{1}{2 \ln 2 - 1} \right)^{0.5}. \quad (3.6)$$

Используя интегральное исчисление, были получены формулы для нахождения значения b_0 для случаев:

1. $L \leq 2 \text{ см}; b_0 = 1.5 \acute{b}$.
2. $L > 2 \text{ см}; b_0 = \acute{b} \left(\frac{3L^2}{3L^2 - 1} \right)$.

Таким образом, зная радиус жилы микропровода R , длину образца L , намагниченность насыщения M_s , продольную компоненту намагниченности M_z , остаточную намагниченность M_r , амплитуду внешнего поля H_0 , можно рассчитать критическую длину L_z^c .

3.2 Результаты экспериментов

На магнитометре ИММ-3А были получены петли для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 10, 3, 2,

1.8, 1.6, 1.4 и 1.2 сантиметров. Петли гистерезиса указанных систем представлены на рисунках 3.2 - 3.4.

На рис. 3.2 - 3.4 видно, что при уменьшении длины микропровода уменьшаются коэффициент прямоугольности петли и крутизна петли, т.е. форма петли, при уменьшении длины микропровода, все меньше напоминает форму прямоугольника, характерную бистабильному образцу. Анализируя вышесказанное, можно сделать вывод, что при уменьшении длины микропровода уменьшается и относительный объем аксиально намагниченного керна. Также на рисунках 3.3 и 3.4 для некоторых петель гистерезиса можно четко различить ступеньки. Появление ступенек на петлях гистерезиса систем из двух и трех микропроводов связано с тем, что микропровода в данных образцах взаимодействуют между собой.

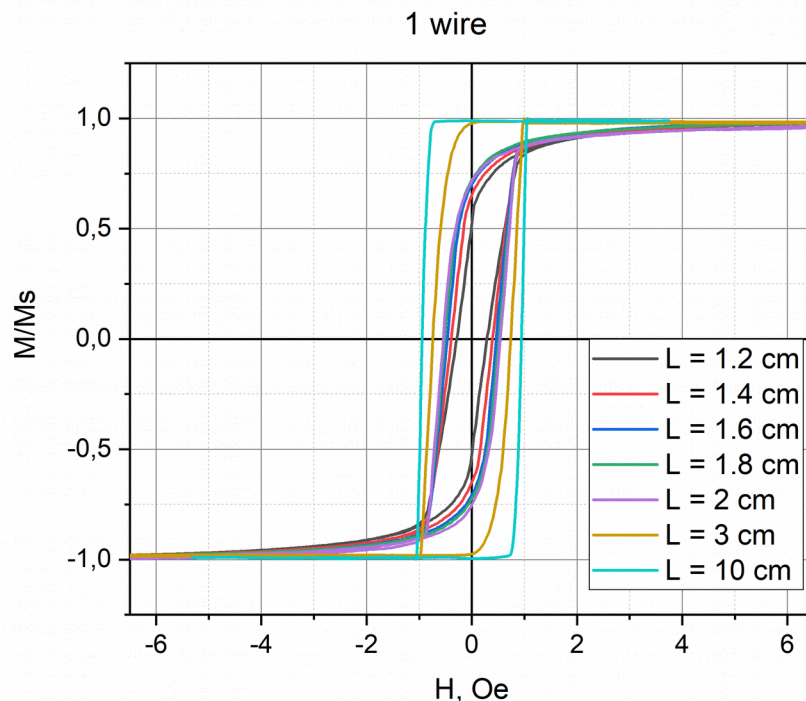


Рис. 3.2. Петли гистерезиса одного микропровода для различных длин L .
 L - длина микропроводов в системе.

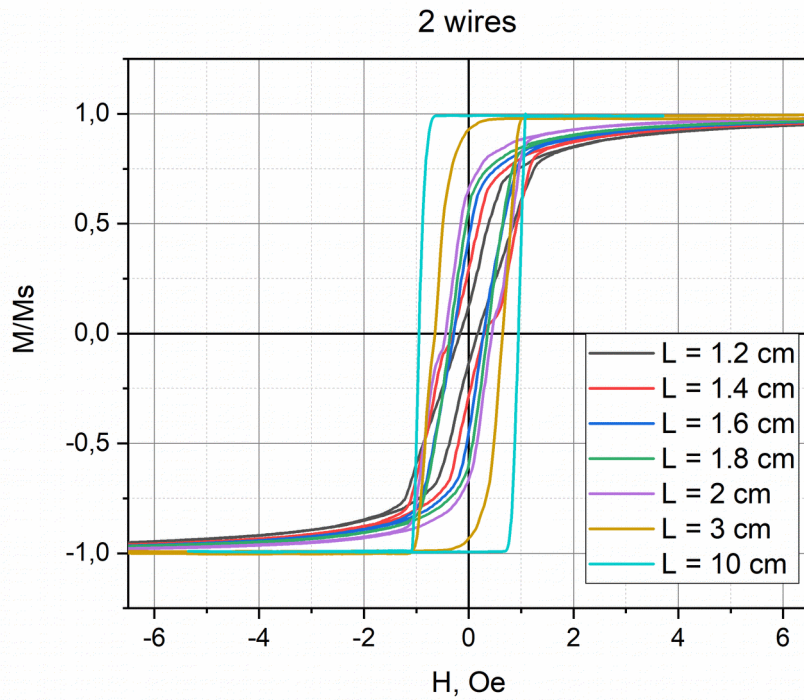


Рис. 3.3. Петли гистерезиса системы из двух микропроводов для различных длин L . L – длина микропроводов в системе.

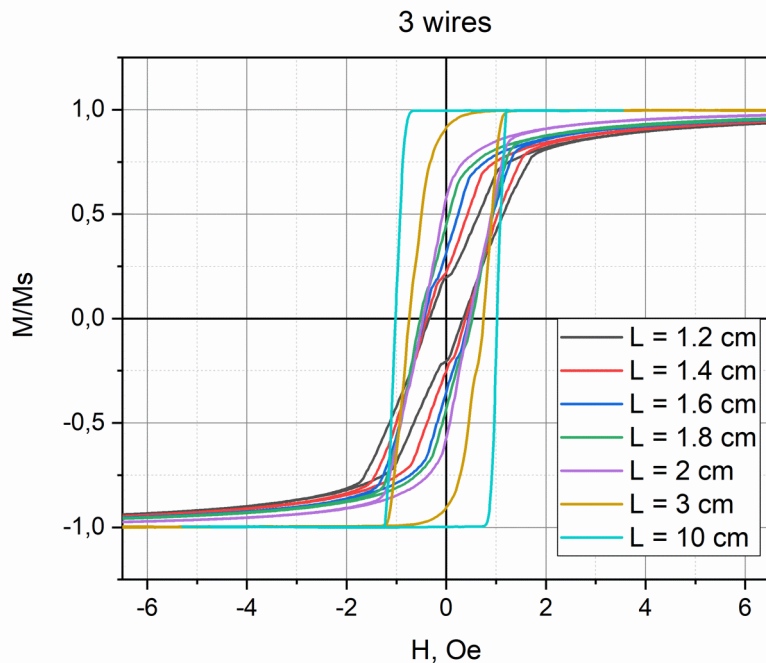


Рис. 3.4. Петли гистерезиса системы из трех микропроводов для различных длин L . L – длина микропроводов в системе.

На рисунках 3.5, 3.6 и 3.7 изображены петли гистерезиса систем микропроводов, длина которых составляла 1,6 см, 2 см и 3 см, соответственно.

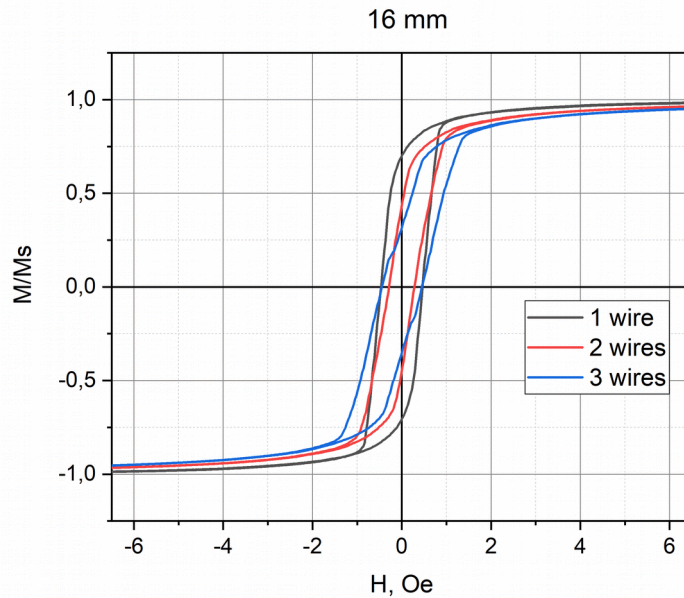


Рис. 3.5. Петли гистерезиса для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 1,6 см.

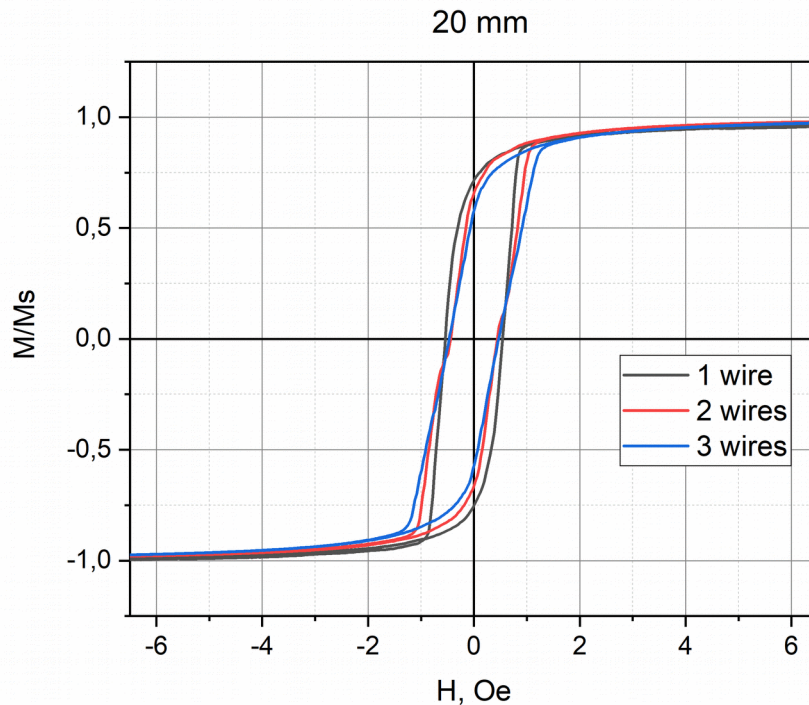


Рис. 3.6. Петли гистерезиса для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 2 см.

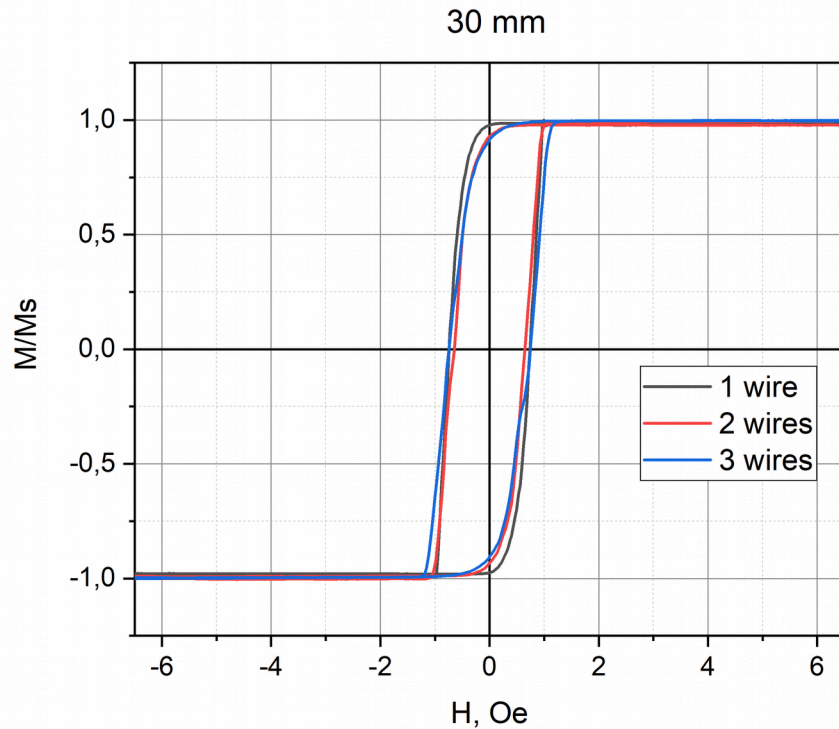


Рис. 3.7. Петли гистерезиса для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 3 см.

На рис. 3.5 - 3.7 видно, что форма петли гистерезиса приближается к прямоугольной, характерной для бистабильного образца, с уменьшением количества микропроводов в системе. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что при увеличении количества микропроводов в системе растет и критическая длина бистабильности системы. Также, анализируя рис. 3.2 - 3.7, можно сделать вывод, что критическая длина для систем одного, двух и трех микропроводов лежит в пределах от 3 см до 10 см. Для более точного результата необходимо провести измерения с меньшим шагом по длине, что и будет сделано в будущем.

На основании полученных данных о зависимости намагниченности систем микропроводов от приложенного поля, были найдены коэрцитивная сила, H_c , и коэффициент

прямоугольности, M_r/M_s , для каждой системы и для каждой длины системы проводов. Оцененные по петлям гистерезиса значения коэрцитивной силы и коэффициента прямоугольности в зависимости от длины системы микропроводов представлены на рисунках 3.8 и 3.10.

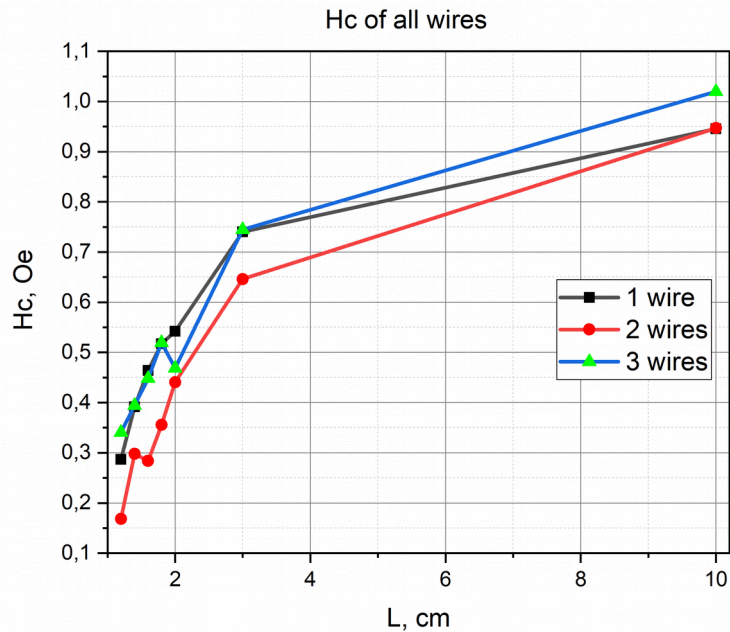


Рис. 3.8. График зависимости коэрцитивной силы систем из одного, двух и трех микропроводов от их длины.

На рис. 3.8 видно, что при уменьшении длины системы уменьшается и коэрцитивная сила, что объясняется влиянием форм-фактора - концевые домены увеличиваются в объеме. Однако, необъяснимо то, что коэрцитивная сила системы из двух микропроводов меньше, чем у системы из трех. Из рис. 3.9 явно видно, что при увеличении количества микропроводов в системе увеличивается наклон петли, что свидетельствует о росте концевых доменов. Увеличенный объем концевых доменов должен был привести к еще большему уменьшению коэрцитивной силы, однако, для некоторых длин коэрцитивная сила системы трех

микропроводов даже больше, чем у одного микропровода. Возможно, это связано с взаимодействием микропроводов – уже намагниченный микропровод создает поле, препятствующее намагничиванию соседних микропроводов. Для изучения данного явления необходимы дополнительные эксперименты, которые будут проведены в будущем.

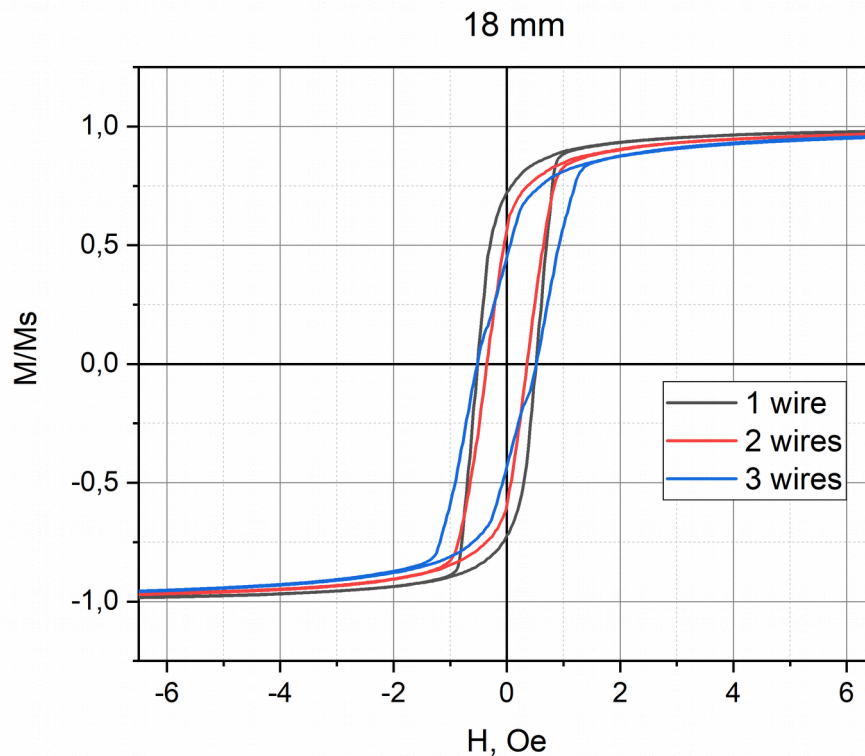


Рис. 3.9. Петли гистерезиса для системы из одного, двух и трех микропроводов длиной 1,8 см.

Коэффициент прямоугольности - M_r/M_s - ожидаемо уменьшается с увеличением числа микропроводов в системе (рис. 3.10), т.к. уменьшается относительный объем аксиально намагниченного ядра, что, как уже объяснялось выше, связано с взаимодействием концевых доменов. Вызывает некоторые вопросы немонотонное возрастание коэффициента прямоугольности для одного микропровода при длине

микропровода около 2 см – необходимо в дальнейшем это также проверить.

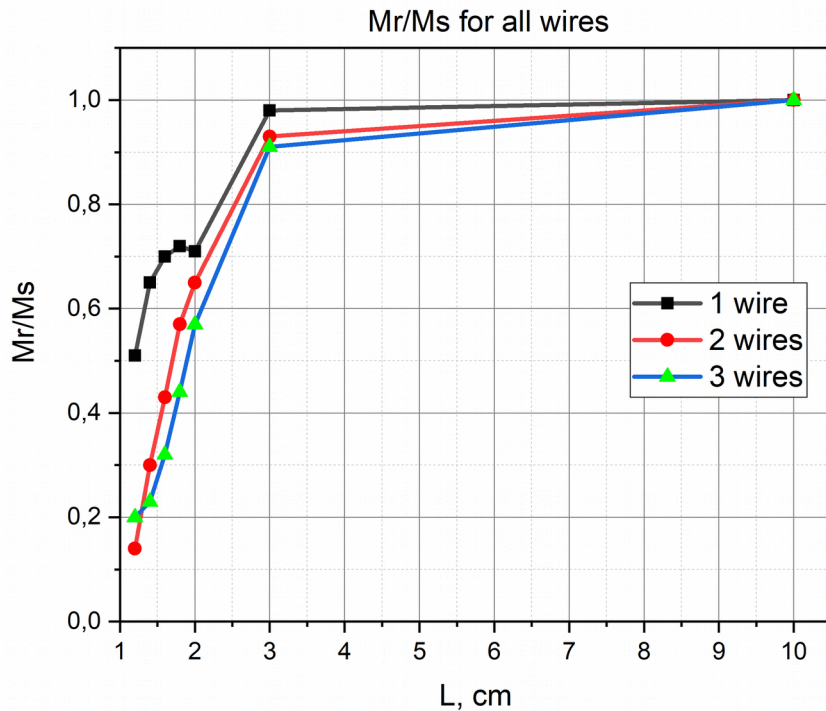


Рис. 3.10. График зависимости коэффициента прямоугольности систем из одного, двух и трех микропроводов от длины микропроводов в системе.

Из рис. 3.11 можно найти магнитный момент насыщения для систем из одного, двух и трех микропроводов. Отметим, что магнитный момент насыщения пропорционален количеству микропроводов в системе.

Петли гистерезиса, полученные на VSM, отличаются от полученных на магнитометре ИММ-3А, т.к. отличается частота прикладываемого поля: 400 Гц на установке ИММ-3А и квазистатическое при измерениях на VSM. Также на VSM петли гистерезиса получились ломанными, т.к. провод имеет высокую магнитомягкость (малое значение коэрцитивной силы) и минимального шага по магнитному полю на VSM недостаточно для того, чтоб разрешить петлю гистерезиса.

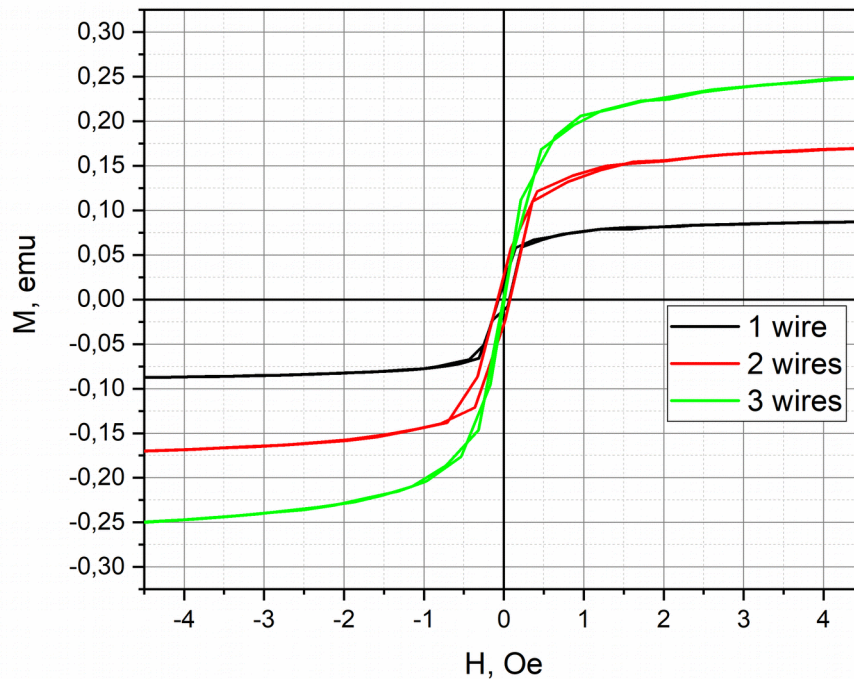


Рис. 3.11. Петли гистерезиса систем одного, двух и трех микропроводов длиной 3 см, полученные на VSM.

Для анализа механизма перемагничивания одиночного микропровода и систем на его основе будет использован подход, при котором проводится анализ дифференциальной магнитной восприимчивости. Петли гистерезиса и зависимость дифференциальной магнитной восприимчивости идеального (красный график) и реального (зеленый график) ферромагнетика с одноосной анизотропией представлены на рисунке 3.12. На рисунке 3.12 а) схематично изображено перемагничивание образца при приложении магнитного поля перпендикулярно легкой оси намагничивания, в этом случае перемагничивание происходит поворотом магнитных моментов – обратимый процесс. На рисунке 3.12 б) перемагничивание осуществляется вдоль легкой оси

намагничивания движением доменной границы – необратимый процесс.

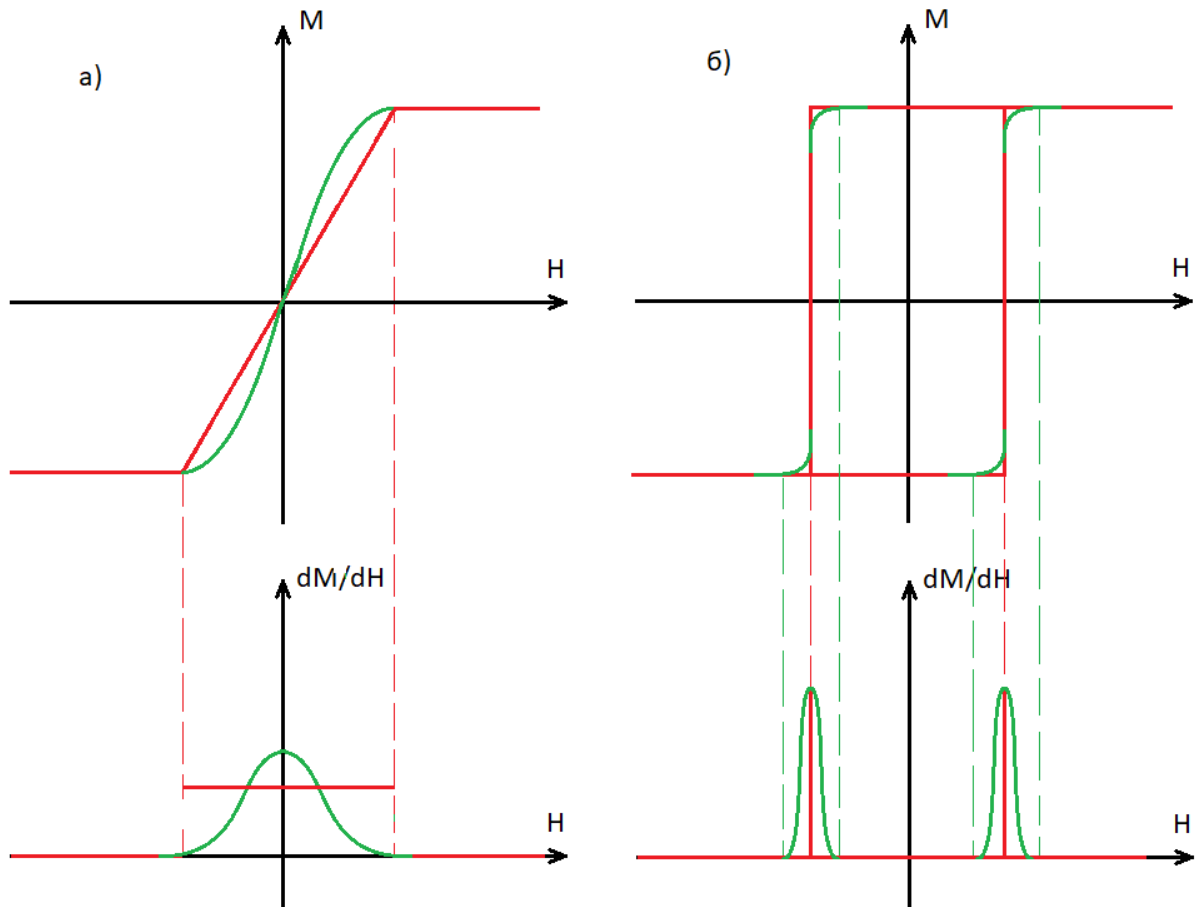


Рис. 3.12. Петли гистерезиса и зависимость дифференциальной магнитной восприимчивости идеального (красные) и реального (зеленые) ферромагнетика с одноосной анизотропией:

- а) приложение поля перпендикулярно легкой оси,
 б) приложение поля вдоль легкой оси.

Для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2 и 3 сантиметра были построены графики зависимости дифференциальной восприимчивости от внешнего поля (рис. 3.13-3.18). Для удобства анализа на графиках изображена производная, взятая только от восходящей ветви петли гистерезиса.

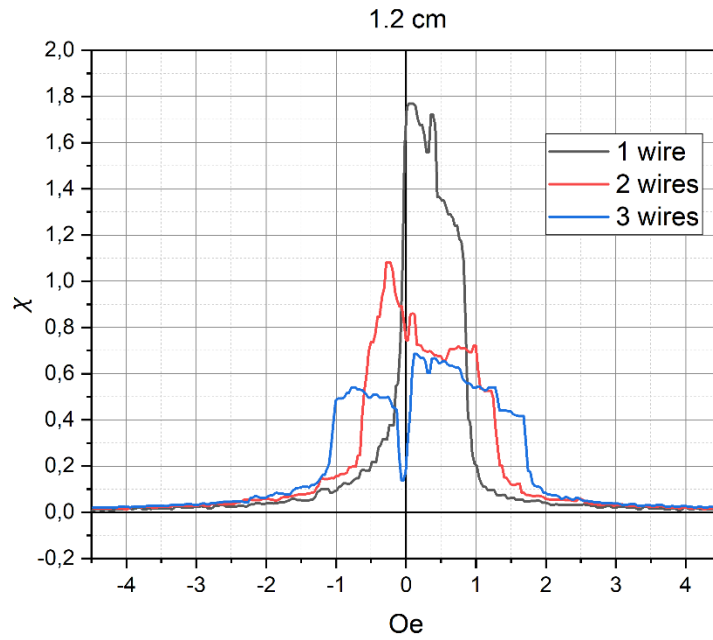


Рис. 3.13. График зависимости дифференциальной восприимчивости от внешнего поля для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 1.2 см

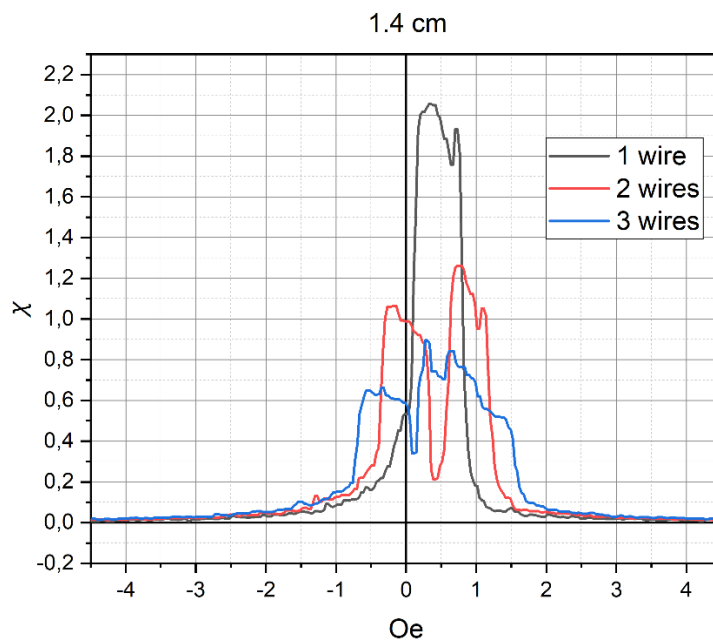


Рис. 3.14. График зависимости дифференциальной восприимчивости от внешнего поля для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 1.4 см

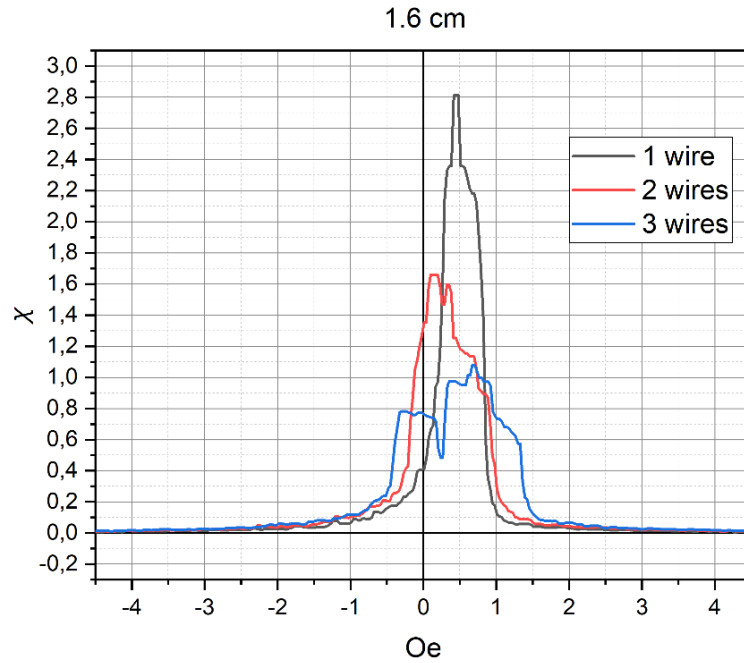


Рис. 3.15. График зависимости дифференциальной восприимчивости от внешнего поля для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 1.6 см

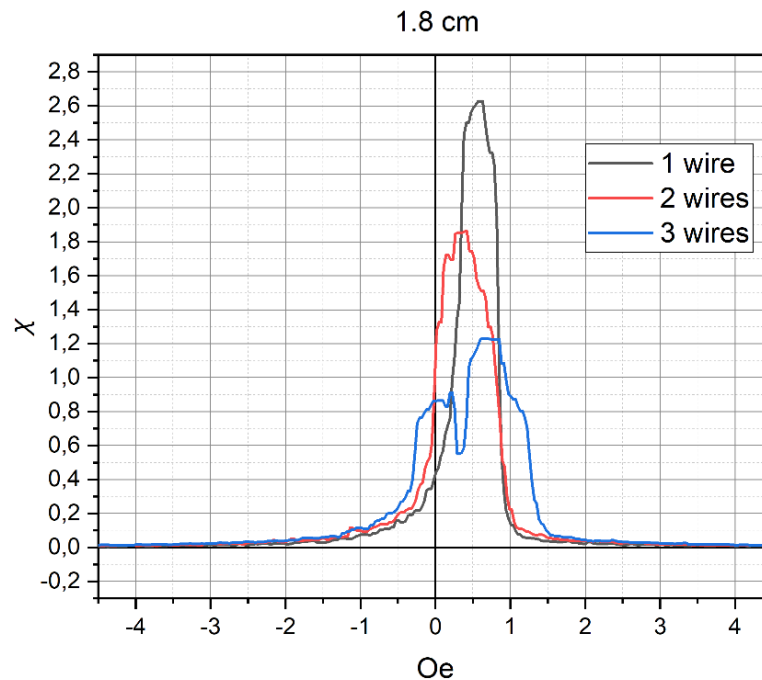


Рис. 3.16. График зависимости дифференциальной восприимчивости от внешнего поля для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 1.8 см

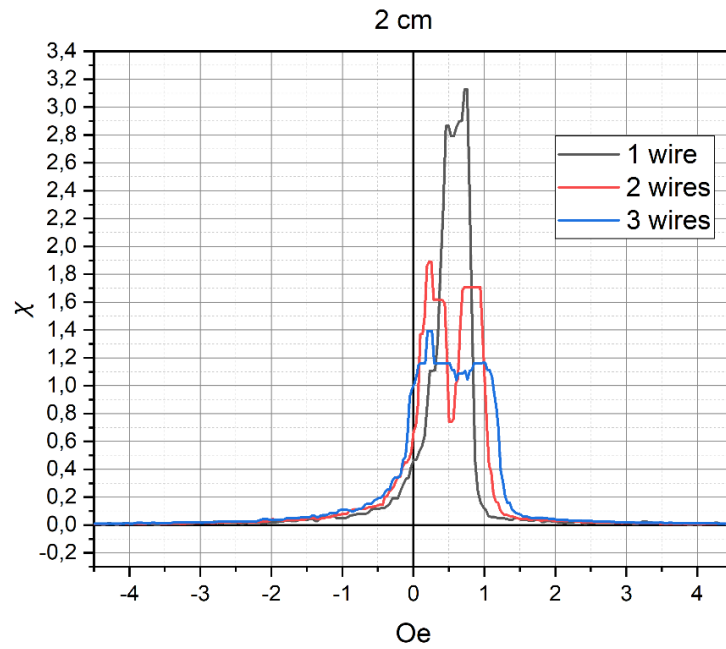


Рис. 3.17. График зависимости дифференциальной восприимчивости от внешнего поля для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 2 см

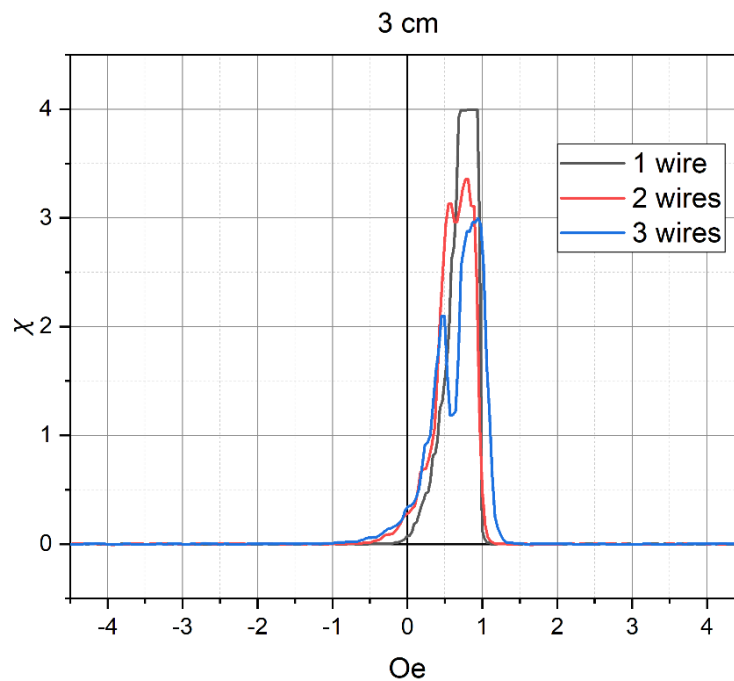


Рис. 3.18. График зависимости дифференциальной восприимчивости от внешнего поля для систем из одного, двух и трех микропроводов длиной 3 см.

Из рисунков 3.13-3.18 следует, что процесс перемагничивания систем из трех и двух микропроводов длиной менее 3 сантиметров происходит преимущественно поворотом моментов, что свидетельствует о значительном уменьшении относительного объема аксиально намагниченного керна. Также график производной, по мере уменьшения длины микропроводов, приближается к виду 3.12 а) тем быстрее, чем больше микропроводов в системе. Также видно, что поле переключения возрастает с увеличением числа микропроводов в системе и с увеличением длины микропроводов. Однако, для системы из трех микропроводов должны наблюдаться три пика, для двух - два. Для системы из двух микропроводов два пика наблюдаются только на длинах 2 и 1.4 сантиметра. Для системы из трех микропроводов три пика не наблюдаются. Это может быть связано с магнитомягкостью данного микропровода и хорошей однородностью свойств по длине и диаметру. Также немаловажным является процесс отрезания - именно им можно объяснить возникающие и пропадающие пики у системы из двух микропроводов, т.к. резка проводилась вручную. В будущем, данная процедура будет механизирована с целью получения максимальной повторяемости результата, а также, для получения статистически верных данных, исследования будут проведены еще на нескольких системах 1-3 микропроводов разной длины. При повторяемости полученных особенностей свойств систем микропроводов от длины, будет проанализировано магнитостатическое взаимодействие микропроводов. Особенности формирования магнитных

свойств магнитомягкого микропровода в присутствии увеличенных концевых доменов его соседей, могут также привести к возникновению описанных в пункте зависимостей.

Теоретический расчет критической длины бистабильности. Зная радиус жилы микропровода R , длину образца L , намагниченность насыщения M_s , продольное значение компоненты намагниченности M_z , остаточную намагниченность M_r , амплитуду внешнего поля H_0 , можно рассчитать критическую длину L_z^c .

Поскольку из формулы 3.3 явно выразить K_e аналитическими методами невозможно, была написана программа на C++ для вычисления K_e численным методом. Данным методом было получено значение K_e равное 611 erg/cm³. Данное значение совпадает с литературным (400 erg/cm³) [45] по порядку величины. Причиной отличия в значениях является, возможно, неточность измерений. В дальнейшем будут предприняты шаги по устранению этой неточности.

Значение намагниченности насыщения образца, M_s , было оценено по петлям, полученным на VSM (рис. 3.11). Значение M_s составило 2207 emu/cm³. В статье [45] данное значение составляет 644 emu/cm³. Причина отличия в значениях является, возможно, неточность измерений.

После расчета K_e подставляем формулу 3.2 в формулу 3.1:

$$L_z^c = R \left(\frac{M_r}{M_s} \right)^{0.5} * \left[\frac{M_s^2}{\eta_1 K_e} \ln \frac{M_s^2}{\eta_1 K_e} \right]^{0.5}$$

Далее, подставляем в полученную формулу все известные величины и получаем значение критической длины бистабильности L_z^i .

Для систем микропроводов были получены следующие критические длины бистабильности:

- одного микропровода $L_z^i=3,31\text{ см}$;
- двух микропроводов $L_z^i=4,81\text{ см}$;
- трех микропроводов $L_z^i=5,75\text{ см}$.

Экспериментально было обнаружено, что критическая длина систем одного, двух и трех микропроводов лежит в пределах от 3 см до 10 см.

Для микропроводов из сплавов на основе железа с большой положительной константой магнитострикции критическая длина бистабильности, как было обнаружено в работе [3], имеет значение около 2 мм. Такое отличие на порядок объясняется тем, что исследуемый в данной дипломной работе образец обладает большей магнитомягкостью за счет малой толщины стеклянной оболочки и околонулевой константы магнитострикции. Форм-фактор начинает оказывать заметное влияние на микромагнитную структуру (уменьшение коэффициента прямоугольности, появление участков сглаживания на петле гистерезиса) при гораздо больших длинах провода (от 3 см), чем у проводов из сплавов на основе железа. Из вышесказанного можно сделать вывод, что размер концевых доменов исследуемого микропровода увеличен, т.к. у него большая критическая длина бистабильности.

В рамках проделанной работы экспериментальные данные и теоретические расчеты не противоречат друг другу,

однако, для получения более точных результатов, необходимо провести повторные измерения в диапазоне длин микропровода от 3 см до 10 см с меньшим шагом по длине.

Также будет проведена корректировка модели для расчета критической длины систем двух и трех проводов, т.к. для данных систем необходимо учесть взаимное влияние проводов друг на друга внутри системы.

Основные результаты и выводы

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

- была разработана методика измерения петель гистерезиса коротких, длиной до 1.2 см, магнитомягких микропроводов на установке ИММ-3А;
- были получены петли гистерезиса систем из одного, двух и трех микропроводов длиной от 1.2 см до 10 см, по ним оценены коэффициент прямоугольности, коэрцитивная сила, получены полевые зависимости дифференциальной восприимчивости;
- была проанализирована и проверена применимость феноменологической модели микромагнитной структуры микропровода, описанной в литературе, к полученным данным;
- была рассчитана теоретически и определена экспериментально критическая длина бистабильности для систем из одного, двух и трех микропроводов; установлено, что критическая длина бистабильности систем одного, двух и трех проводов лежит в пределах 3 - 10 см и равна 3.31 см, 4.81 см, 5.75 см согласно экспериментальным и теоретическим данным, соответственно;
- было определено влияние концевых доменов на форму петли гистерезиса микропровода; для определения размеров концевых доменов будут

проведены измерения с использованием дополнительной измерительной катушки длиной 0,1 см.

На основании данных результатов можно сделать следующие выводы:

- методика измерения петель гистерезиса коротких микропроводов с учетом размера и положения приемной катушки - разработана для микропровода состава $\text{Co}_{83}\text{Fe}_7\text{C}_1\text{Si}_7\text{B}_2$ с полным диаметром $D = 44$ мкм и диаметром жилы $d = 38$ мкм;
- результаты проверки применимости модели микромагнитной структуры бистабильного микропровода с околонулевой константой магнитострикции показали, что данная модель может быть использована для описания свойств исследуемого образца;
- результаты теоретического расчета критической длины бистабильности систем одного, двух и трех микропроводов (3.31 см, 4.81 см и 5.75 см, соответственно) и результаты эксперимента (диапазон 3 - 10 см для всех систем) не противоречат друг другу;
- размер концевых доменов у исследуемого образца существенно увеличен по сравнению с микропроводами из сплавов на основе Fe, о чем свидетельствует увеличение его критической длины бистабильности; значительное увеличение критической длины (на порядок) связано с

повышенной магнитной мягкостью образца за счет уменьшения толщины стеклянного покрытия и использования сплава с околонулевой константой магнитострикции.

- **Дальнейшие планы**

На основании полученных результатов и выводов, был сформирован план дальнейший действий:

- сборка измерительного модуля с приемными катушками длиной 0,1 см и 10 - 15 см для исследования локальных петель гистерезиса (профиль намагниченности по длине) с большей точностью и петель гистерезиса микропроводов длиной 10 - 15 см, соответственно. Эти данные позволят более точно определить критическую длину бистабильности и размеры концевых доменов.

Библиографический список

- [1] Chizhik A., Zhukov A., Gonzalez J., Stupakiewicz A. Control of reversible magnetization switching by pulsed circular magnetic field in glass-coated amorphous microwires// Applied Physics Letters.-2018.-V.112.-N.7.- 072407.
- [2] Zhang, X., del Real, R. P., Vázquez, M., Lewis, L. H. Consequences of aging on ferromagnetic amorphous Fe₇₅Si₁₀B₁₅ microwires for advanced inductive applications// AIP Advances.-2019.-V.9.-N.3.- 035114.
- [3] Vázquez M., Zhukov A. P. Magnetic properties of glass-coated amorphous and nanocrystalline microwires// Journal of Magnetism and Magnetic Materials.-1996.-V.160.-P.223-228.
- [4] Perov N.S., Radkovskaya A.A., Antonov A.S., Usov N.A., Baranov S.A., Larin V.S., Torcunov A.V. Magnetic properties of short amorphous microwires// Journal of Magnetism and Magnetic Materials.-1999.-V.196-197.-P.385-387.
- [5] Phan, M. H., Peng, H. X., Yu, S. C., & Wisnom, M. R. Large enhancement of GMI effect in polymer composites containing Co-based ferromagnetic microwires// Journal of Magnetism and Magnetic Materials.-2007.-V.316.-N.2.-P.253-256.
- [6] Zhukov A. Design of the magnetic properties of Fe-rich, glass-coated microwires for technical applications// Advanced Functional Materials.-2006.-V.16.-N.5.-P.675-680
- [7] Corte-León P., Zhukova V., Ipatov M., Blanco J. M., Gonzalez J., Dominguez L., Churyukanova M., Zhukov A. High frequency giant magnetoimpedance effect of a stress-annealed Fe-rich

glass-coated microwire// Journal of Alloys and Compounds.-2019.-V.802.-P.112-117.

[8] Phan M.-H., Peng H.-X. Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications// Progress in Materials Science.-2008.-V.53.-N.2.-P.323-420.

[9] Ripka P. Advances in fluxgate sensors// Sensors and Actuators, A: Physical.-2003.-V.106.-N.1-3.-P.8-14.

[10] Varga R., Zhukov A., Blanco J. M., Ipatov M., Zhukova V., Gonzalez J., Vojtaník P. Fast magnetic domain wall in magnetic microwires// Physical Review.-2006.- V.74.-N.21.

[11] Zhukov A. Glass-coated magnetic microwires for technical applications// Journal of Magnetism and Magnetic Materials.-2002.-V.242-245.-Part I.-P.216-223

[12] Чичай К.А. Динамика движения доменной границы в структурах с цилиндрической симметрией, управляемая магнитоупругим взаимодействием // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Калининград. 2017.

[13] Qin F.X., Peng H.X., Phan M.H. Wire-length effect on GMI in $\text{Co}_{70.3}\text{Fe}_{3.7}\text{B}_{10}\text{Si}_{13}\text{Cr}_3$ amorphous glass-coated microwires// Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology.-2010.-V.167.-N.2.-P.129-132.

[14] Corodeanu S., Chiriac H., Damian A., Lupu N., Óvári T. A. Field and Current Controlled Domain Wall Propagation in Twisted Glass-Coated Magnetic Microwires//Scientific Reports.-2019.-V.9.-N.1.

[15] Garcia-Prieto M.J., Pina E., Zhukov A., Larin V., Marin P., Vazquez M., Hernando A. Glass-coated Co-rich amorphous

microwires with enhanced permeability// Sensors and Actuators, A: Physical.-2000.-V.81.-N.1.-P.227-231.

[16] Zhukova V., Larin V.S., Zhukov A. Stress induced magnetic anisotropy and giant magnetoimpedance in Fe-rich glass-coated magnetic microwires// Journal of Applied Physics.-2003.-V.94.-N.2.-P.1115-1118.

[17] Churyukanova M., Kaloshkin S., Shuvaeva E., Stepashkin A., Zhdanova M., Aronin A., Aksenov O., Arakelov P., Zhukova V., Zhukov, A. Non-contact method for stress monitoring based on stress dependence of magnetic properties of Fe-based microwires// Journal of Alloys and Compounds.-2018.-V.748.-P.199-205.

[18] Severino A.M., Gomez-Polo C., Marin P., Vazquez M. Influence of the sample length on the switching process of magnetostrictive amorphous wire// Journal of Magnetism and Magnetic Materials.-1992.-V.103.-N.1-2.-P.117-125.

[19] Taylor G.F. A method of drawing metallic filaments and a discussion of their properties and uses// Physical Review.-1924.-V.23.-N.5.-P.655-660.

[20] Улитовский А.В., Авраменко А.И., Маяцкий Н.М. Непрерывное изготовление микропровода в стеклянной изоляции// Авторское свидетельство СССР № 128427 от 15.05.1960 г.

[21] Брандт Н.Б., Гицу Д.В., Иошер А.М., Котрубенко Б.П., Николаева А.А. Получение тонких монокристаллических нитей висмута в стеклянной изоляции// Приборы и Техника Эксперимента.-1976.-Т.3.-С.256-257.

[22] Zhukov A., Gonzalez J., Vazquez M., Larin V., Torcunov A. Nanocrystalline and amorphous magnetic microwires//

Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology/ Edited by Nalwa H.S.-Valencia, CA: American Scientific Publishers, 2004.-V.X.-C.62.-P.23.

[23] Tremolet de Lacheisserie E. Magnetostriction. Theory and applications of magnetoelasticity.-Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1993.-430 p.

[24] Улитовский А.В., Аверин Н.М., А.С. № 161325 СССР, МКИ G 01 C 29/00. Способ изготовления металлической микропровода. Заявлено 01.04.48 г., опубликовано 19.03.64 г., Бюл. №7, стр.14.

[25] Перов Н.С. Исследование магнитных свойств микро- и нанонеоднородных систем// Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.-Москва, 2009.-248 с.

[26] Гусев С.В., Сприченко Ю.В. Напряженное состояние многослойной круговой цилиндрической оболочки// препринт/ Л.: НИИЭФА, 1978.

[27] Velazquez J., Vazquez M., Zhukov A.P. Magnetoelastic anisotropy distribution in glass-coated microwires// Journal of Materials Research.-1996.-V.11.-N.10.-P.2499-2505.

[28] I. Astefanoaei, D. Radu and H. Chiriac. Internal stress distribution in DC joule-heated amorphous glass-covered microwires, Journal of Physics: Condensed Matter, 2006.

[29] H. Chiriac, T. A. Ovari, and Gh. Pop. Internal stress distribution in glass-covered amorphous magnetic wires, Physical Review B, 1995.

[30] Vazquez M., Hernando A. A soft magnetic wire for sensor applications// Journal of Physics D: Applied Physics.-1996.-V.29.-N.4.-P.939-949.

- [31] Vazquez M., Zhukov A., Pirota K.R., Varga R., Garcia K.L., Luna C., Provencio M., Navas D., Martinez J.L., Hernandez-Velez M. Temperature dependence of remagnetization process in bistable magnetic microwires// Journal of Non-Crystalline Solids.-2003.-V.329.-N.1-3.-P.123-130.
- [32] K. Mohry, F.B. Humphrey, K.Kawashima, K. Kimura and M. Mizutani. Large Barkhausen and Matteucci effects in FeCoSiB, FeCrSiB and FeNiSiB amorphous wires, IEEE Transactions on Magnetism, 1990.
- [33] Varga R. et al. Magnetization processes in thin magnetic wires //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2006. - T. 300. - №. 1. - C. e305-e310.
- [34] Zhukov A., Zhukova V. Magnetic properties and applications of ferromagnetic microwires with amorphous and nanocrystalline structure// NY: Nova Science Publishers, Inc., 2009..
- [35] J. M. Blanco, V. Zhukova, M. Ipatov, and A. Zhukov. Magnetic Properties and Domain Wall Propagation in Micrometric Amorphous Microwires, Sensor Letters, Vol. 10, 1-4, 2013.
- [36] Vazquez M., Gomez-Polo C., Chen D.-X. Switching mechanism and domain structure of bistable amorphous wires// IEEE Transactions on Magnetism.-1992.-V.28.-N.5.-Part 2.-P.3147-3149.
- [37] Zhukov A.P., Vazquez M., Velazquez J., Chiriac H., Larin V. The remagnetization process in thin and ultra-thin Fe-rich amorphous wires// Journal of Magnetism and Magnetic Materials.-1995.-V.151.-N.1-2.-P.132-138.
- [38] Yamasaki J., Humphrey F.B., Mohri K., Kawamura H., Takamura H., Malmhall R. Large Barkhausen discontinuities in

Co-based amorphous wires with negative magnetostriction// Journal of Applied Physics.-1988.-V.63.-N.8.-P.3949-3951.

[39] Усов Н.А., Антонов А.С., Дыхне А.М., Лагарьков А.Н. К теории доменной структуры аморфного провода на основе кобальта// Электричество.-1998.-№2.-С.55-66.

[40] Zhukova V., Zhukov A., Gonzalez J., Blanco J.M. Length effect a negative magnetostrictive Co-Si-B amorphous wire with rectangular hysteresis loop// Journal of Magnetism and Magnetic Materials.-2003.-V.254-255.-P.182-184.

[41] Zhukova V., Usov N.A., Zhukov A., Gonzalez J. Length effect in a Co-rich amorphous wire// Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics.-2002.-V.65.-N.13.-art. no. 134407.-P.1344071-1344077.

[42] Zhukov A., Ipatov M., Zhukova V., Garcia C., Gonzalez J., Blanco J.M. Development of ultra-thin glass-coated amorphous microwires for HF magnetic sensor applications// Physica Status Solidi (A) Applications and Materials.-2008.-V.205.-N.6.-P.1367-1372.

[43] Larin V.S., Torcunov A.V., Zhukov A., Gonzalez J., Vazquez M., Panina L. Preparation and properties of glass-coated microwires// Journal of Magnetism and Magnetic Materials.-2002.-V.249.-N.1-2.-P.39-45.

[44] M. Ipatov. Studies of magnetic properties of amorphous microwires with high technological interest, Dissertation to opt for the degree of Doctor of Science.- San Sebastián, 2008

[45] [Mohri K., Humphrey F. B., Kawashima K., Kimura K., Mizutani M. Large Barkhausen and Matteucci effects in FeCoSiB, FeCrSiB, and FeNiSiB amorphous wires// IEEE Transactions on Magnetics.-1990.-V.26.-N.5.](#)