

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Особенности микромагнитной структуры аморфных микропроводов в
магнитных полях»

Выполнила студентка
219М группы
Сороколетова Марина Сергеевна

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., профессор
Шалыгина Елена Евгеньевна

Допущена к защите «23» мая 2022 года.

Зав. кафедрой _____

Проф. Перов Н.С.

Москва

2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	9
1.1 Аморфные магнитные материалы.....	9
1.2 Аморфные микропровода	16
1.3 Доменная структура и процессы перемагничивания аморфных микропроводов	19
1.4 АММ в качестве идентификационных меток в противокражных системах	23
ГЛАВА 2. ИЗУЧАЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА	27
2.1. Изучаемые образцы	27
2.2 Методика измерения магнитных характеристик изучаемых образцов.	27
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	31
3.1 Магнитные характеристики микропроводов, скрученных в кольца ...	31
3.2 Сравнительный анализ магнитных характеристик скрученных в кольца и прямых аморфных микропроводов	43
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	49

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно проводятся теоретические и экспериментальные исследования, посвященные изучению физических свойств ферромагнитных аморфных микропроводов. Это обусловлено необходимостью понимания механизмов формирования свойств микропроводов, поскольку многие вопросы, касающиеся физических причин, определяющих особенности магнитных свойств, а также формирования доменной структуры и механизмов перемангничивания микропроводов, требуют дальнейшего рассмотрения и обсуждения.

В настоящее время доказано, что свойства ферромагнитных аморфных микропроводов и изделий на их основе зависят от геометрических параметров образцов. В литературе существует много экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию влияния диаметров микропроводов и металлической жилы, а также их длины на статические и динамические магнитные характеристики указанных выше аморфных материалов [1, 2]. Кроме того, согласно существующим данным, на магнитные свойства аморфных микропроводов влияет также их геометрическая конфигурация. В связи с этим не вызывает сомнения актуальность проведения исследований магнитных характеристик одиночных аморфных микропроводов, скрученных в виде спирали [3], а также скрученных между собой нескольких микропроводов [4].

Изложенное выше позволяет утверждать, что исследования магнитных свойств аморфных микропроводов, имеющих различные геометрические конфигурации, а также оценка возможности их использования в практических приложениях, являются актуальными как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения прикладных аспектов.

Кроме того, обнаруженные свойства аморфных микропроводов и в целом магнитных аморфных материалов (АММ) позволяют активно их использовать вместо традиционных магнитных материалов в различных

областях науки и техники. В частности, АММ востребованы при разработке идентификационных меток в противокражных системах. Принцип работы противокражных систем состоит в регистрации идентификационной метки при её наличии в области детекторов.

При изготовлении противокражных RFID-систем используются аморфные микропровода, а основным элементом систем электромагнитного и акустомагнитного типов являются аморфные ленты. Следует отметить, что использование микропроводов более технологично и дешево.

Акустомагнитная технология противокражной защиты основана на эффекте магнитострикции аморфной ленты и на регистрации сигнала от вибрирующей металлической полоски под действием внешнего переменного магнитного поля. Следует отметить, что преимущество акустомагнитной системы определяется возможностью регистрации меток на больших расстояниях по сравнению с другими технологиями, отсутствие ложных сигналов отклика детекторов, а также высокий коэффициент приёма сигнала, в частности, до 90-95%. Однако стоимость оснащения данной защитной системы намного выше по сравнению с системами других технологий.

Более дешевым вариантом является электромагнитная технология. В ее основе лежит регистрация основных гармоник рабочих частот при внесении аморфной ленты в переменное магнитное поле. К ее преимуществам также можно отнести более миниатюрный размер метки, а также устойчивость к механическим повреждениям. Однако при этом ее основным недостатком является высокая требовательность к ориентации метки относительно детектора противокражной системы, поскольку не все ориентации соответствуют надежному обнаружению метки. В связи с этим фактом коэффициент срабатывания метки электромагнитной системы составляет лишь 70%.

Описанная выше проблема была решена путём использования другого типа аморфного материала в противокражных системах электромагнитного

типа. Благодаря особенностям геометрии аморфных микропроводов, скрученных в кольца, появилась возможность рассмотреть их в качестве основного элемента идентификационной метки. Кроме того, практические исследования показали положительные результаты за счет большего количества положений колец, которым соответствует наличие отклика системы на присутствие метки в области действия детекторов.

Учитывая вышеизложенную информацию, планируемые исследования были выполнены на кобальтобогащенных микропроводах $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$. Выбор состава был обусловлен устойчивостью сплава к коррозии благодаря количеству кобальта в составе образца, а также нулевым значением магнитострикции, что способствовало воспроизводимости результатов при использовании колец в качестве идентификационных меток.

Кроме того, необходимо также указать следующий факт. Процесс изготовления микропроводов методом Улитовского-Тейлора предполагает покрытие провода стеклянной оболочкой [5]. Установлено [6], что при перемагничивании микропровода в переменном магнитном поле неравномерность толщины стеклянного покрытия микропровода обуславливает неконтролируемое изменение амплитуды собственного электромагнитного сигнала (ЭМС). В связи с этим невозможно получить отклик с требуемой воспроизводимостью. Таким образом, для исследований в основном использовались микропровода после удаления стеклянной оболочки.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является исследование магнитных характеристик скрученных в кольца аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ в зависимости от толщины микропровода, диаметра кольца, ориентации кольца относительно направления внешнего магнитного поля, а также исследование закономерностей изменения магнитных характеристик микропроводов при их скручивании в кольцо.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Изучение магнитных характеристик скрученных в кольца аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ разных диаметров и толщины микропроводов.
2. Анализ закономерностей поведения магнитных характеристик скрученных в кольца аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ в зависимости от ориентации колец относительно направления внешнего магнитного поля.
3. Сравнение магнитополевого поведения скрученных в кольца аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ и аналогичных по длине и составу прямых микропроводов.

Положения, выносимые на защиту

1. Ориентация скрученных в кольца аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ относительно направления намагничивающего поля влияет на величины магнитного момента колец в состоянии насыщения, поля насыщения и коэрцитивной силы.
2. Поворот плоскости кольца от параллельного полю положения к перпендикулярному при его вертикальной ориентации сопровождается значительным уменьшением угла наклона петли гистерезиса и переходом к диагональной форме петли, уменьшением M_{MAX} , а также резким увеличением H_C .
3. Переход от вертикальной ориентации кольца, параллельной направлению внешнего магнитного поля, к горизонтальной ориентации сопровождается увеличением M_{MAX} , а также сохранением формы петли гистерезиса.

4. Увеличение диаметра кольца или толщины аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, скрученного в кольцо, обуславливает уменьшение пика угловой зависимости коэрцитивной силы H_C и увеличение M_{MAX} .
5. Скручивание прямого аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ в кольцо способствует снижению влияния трудной оси на его магнитные свойства.

Научная новизна работы

1. Установлено, что изменение ориентации скрученных в кольца аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ относительно направления намагничивающего поля влияет на величины магнитного момента колец в состоянии насыщения, поля насыщения и коэрцитивной силы.
2. Обнаружено, что поворот плоскости кольца от параллельного полю положения к перпендикулярному при его вертикальной ориентации сопровождается уменьшением угла наклона петли гистерезиса и переходом к диагональной форме петли, уменьшением M_{MAX} , а также резким увеличением H_C .
3. Установлено, что переход от вертикальной ориентации кольца, параллельной направлению внешнего магнитного поля, к горизонтальной ориентации сопровождается увеличением M_{MAX} , а также сохранением формы петли гистерезиса.
4. Найдено, что увеличение диаметра кольца или толщины аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, скрученного в кольцо, обуславливает уменьшение пика угловой зависимости коэрцитивной силы H_C и увеличение M_{MAX} .
5. Установлено, что скручивание прямого аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ в кольцо способствует снижению влияния трудной оси на его магнитные свойства.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в ходе работы результатов обусловлена применением современного экспериментального оборудования, а также проведением повторных измерений аналогичных образцов для проверки воспроизводимости полученных данных. Результаты были детально проанализированы и сопоставлены с существующими на сегодняшний день экспериментальными данными.

Практическая значимость

Результаты исследований зависимости магнитных свойств аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, скрученных в кольца, могут быть использованы в устройствах электроники, для которых требуются материалы с определенными магнитными характеристиками, а также при разработке идентификационных меток для противокражных систем.

Личный вклад автора

На основе прочитанных и проанализированных статей автором был написан литературный обзор о физических свойствах аморфных микропроводов, подтверждающий возможность их широкого использования вместо традиционных магнитных материалов в различных областях науки и техники. Все приведённые в диссертационной работе результаты были получены им самостоятельно на вибрационном магнитометре.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка используемой литературы, включающего 23 наименования. Объём работы составляет 52 страницы, включая 17 рисунков и 3 таблицы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Аморфные магнитные материалы

Аморфные магнитные материалы (АММ) представляют собой магнетики, характеризующиеся наличием ферромагнитного порядка и аморфной атомной структуры в ограниченном интервале температур. Особенности магнитного состояния АММ определяются отсутствием дальнего и наличием ближнего атомного порядка в расположении атомов. Общеизвестно, что ближний порядок характерен для жидкостей, но, в отличие от АММ, в жидкостях происходит непрерывный обмен между соседними частицами, который усложняется при увеличении их вязкости. Таким образом, твердое тело в аморфном состоянии можно рассматривать как переохлажденную жидкость большой вязкости.

Вследствие отсутствия в АММ периодичности в расположении атомов, для них характерно отсутствие кристаллографической анизотропии и дефектов кристаллического строения.

Наличие в аморфном сплаве одного, двух или всех трех ферромагнитных элементов (железо, никель, кобальт) обуславливает ферромагнетизм этого сплава. Эти ферромагнетики представляют собой переходные металлы с незаполненной 3d-оболочкой. Электроны этой оболочки являются носителями локальных магнитных моментов в атоме. Спонтанная намагниченность АММ объясняется существованием обменного взаимодействия между локальными магнитными моментами. При удалении локальных магнитных моментов атомов на достаточно большое расстояние друг от друга, взаимодействие между ними существенно уменьшается и сплав становится парамагнитным.

Для аморфных магнитных материалов характерно метастабильное неравновесное термодинамическое состояние, так как для их получения используются методы, позволяющие уменьшить кинетическую энергию

высокоэнергичных ионов раньше, чем произойдет их релаксация в кристаллическую структуру. Однако перестройка структуры АММ происходит медленно в определенном интервале температур, который определяется разностью температуры кристаллизации аморфной фазы T_{KP} и температуры стеклования $T_{СТ}$:

$$\Delta T = T_{KP} - T_{СТ}.$$

Чем больше этот интервал, тем стабильнее аморфное состояние. Максимальное значение области существования переохлажденной жидкости ΔT , известное на сегодняшний день – 127 К [7]. Этот интервал температур соответствует сплаву на основе циркония. Для большинства аморфных сплавов значение T_{KP} изменяется от 600 до 800 К. При нагревании аморфных сплавов выше T_{KP} они кристаллизуются.

Одной из самых важных характеристик ферромагнитного материала, входящего в состав аморфного сплава, является коэрцитивная сила H_C – размагничивающее поле, которое необходимо для того, чтобы остаточная намагниченность стала равной нулю. Величина коэрцитивной силы определяет, является материал магнитомягким ($H_C < 800$ А/м) или магнито жестким ($H_C > 800$ А/м).

Известно, что в обычных ферромагнетиках существует магнитная анизотропия, обусловленная кристаллическим порядком расположения магнитных моментов атомов. Магнитная анизотропия значительно увеличивает коэрцитивную силу. Теоретически в АММ анизотропия должна быть равна нулю вследствие отсутствия дальнего порядка расположения атомов. Однако реальные аморфные магнетики характеризуются магнитной анизотропией. Анизотропии в АММ значительно меньше, чем в кристаллических материалах. Это обуславливает резкое снижение коэрцитивной силы. Таким образом, аморфные магнетики в основном являются магнитомягкими.

Как правило, магнитомягкие аморфные сплавы состоят на 70-80% из одного или нескольких переходных металлов (Fe, Ni, Co) и на 20-30% из металлоидов (B, C, Si, P). Изменение состава аморфного сплава позволяет изменять его физические свойства. Изменяя состав аморфного сплава, можно понизить температуру Кюри, увеличить удельное сопротивление, прочность, пластичность материала, изменить намагниченность АММ. Кроме того, введение таких металлоидов, как тантал и ванадий, позволяет изменять стабильность магнитных характеристик аморфного материала, например, молибден улучшает частотные свойства, а хром коррозионные.

Магнитомягкие аморфные магнетики обладают следующими свойствами:

1. Широкий интервал существования переохлажденной жидкости перед кристаллизацией ΔT ;
2. Малое значение коэрцитивной силы H_C ($H_C < 100$ А/м);
3. Высокое значение индукции насыщения B_S ($B_S \sim 2-2.2$ Т);
4. Высокое значение магнитной проницаемости μ ($\mu \sim 10^6$);
5. Высокое удельное сопротивление ρ ;
6. Низкое значение магнитострикции насыщения λ_S .

Особый интерес при изучении АММ представляют магнитные свойства этих материалов.

Магнитные свойства ферромагнетиков в основном определяются средним атомным магнитным моментом и температурой Кюри T_C . Эти величины в АММ меньше, чем в кристаллических ферромагнетиках, что можно объяснить, проанализировав магнитную структуру АММ и роль аморфизации в формировании магнитного порядка [8]. Для аморфных веществ характерен химический и структурный атомный беспорядок. Он приводит к возникновению флуктуаций обменного взаимодействия,

магнитного момента и одноионной анизотропии. Аморфизация оказывает наибольшее влияние на магнитные моменты 3d-металлов из-за делокализации неспаренных электронов. Вместе с тем, для редкоземельных элементов, у которых 4f-электроны сильнее экранированы, эффект флуктуаций локальных магнитных моментов существенно уменьшается.

Как и для кристаллических ферромагнетиков, для АММ характерно явление гистерезиса, наличие доменной структуры и намагниченности насыщения. Для аморфных магнетиков намагниченность насыщения достигается в полях порядка $(8\div 80)\cdot 10^3$ А/м. Величина спонтанной намагниченности АММ уменьшается с ростом температуры и обращается в ноль при достижении температуры Кюри T_C . При низких температурах изменение намагниченности может быть описано в спин-волновом приближении (то есть, намагниченность пропорциональна $T^{3/2}$) [9], а при высоких температурах это изменение происходит слабее, чем по функции Бриллюэна, что можно объяснить наличием дисперсии локальной анизотропии и обменных взаимодействий [10, 11].

Еще одним важным магнитным свойством АММ является магнитная анизотропия аморфных магнетиков M_S , то есть зависимость магнитных свойств материала от направления намагниченности. Магнитная анизотропия является структурночувствительным свойством материала, а значит, с помощью информации о причине ее появления можно получить сведения о структуре аморфного магнетика. Более того, магнитная анизотропия определяет такие важные в практическом отношении характеристики, как коэрцитивная сила H_C и начальная магнитная проницаемость μ_0 : $H_C \sim K_{\text{ЭФФ}}/M_S$, $\mu_0 \sim M_S^2/K_{\text{ЭФФ}}$, где $K_{\text{ЭФФ}}$ – эффективная константа магнитной анизотропии.

Как уже было сказано выше, в результате отсутствия дальнего порядка в расположении атомов в АММ, магнитная анизотропия материала должна

равняться нулю, что не подтверждается практикой. В реальности аморфные магнетики обладают магнитной анизотропией.

Для аморфных ферромагнетиков в основном характерна одноосная анизотропия, энергия которой определяется выражением:

$$U_K = K_{\text{эфф}} \sin^2 \varphi,$$

а поле анизотропии:

$$H_K = 2K_{\text{эфф}}/M_S,$$

где $K_{\text{эфф}}$ – эффективная константа одноосной анизотропии, φ – угол между вектором намагниченности M и осью легкого намагничивания.

Основными причинами существования M_S в магнитомягких АММ являются [12]:

1. Магнитоупругая энергия, возникающая благодаря магнитострикции при наличии внутренних механических напряжений.
2. Магнитное диполь-дипольное взаимодействие, с которым связаны анизотропия формы образца (обусловленная не только его формой, но и состоянием поверхности), внутренняя анизотропия формы (обусловленная анизотропией формы внутренних неоднородностей) и анизотропия упорядочения атомов.
3. Спин-орбитальное взаимодействие, приводящее к одноионной анизотропии и анизотропии обменного взаимодействия.

Основной вклад в магнитную анизотропию обуславливает магнитоупругая энергия, что объясняется методами и условиями получения аморфных материалов.

Магнитоупругая энергия определяется соотношением:

$$U_\sigma = -3/2 \lambda_s \sigma \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

где λ_s – магнитострикция насыщения материала, σ – механические напряжения, φ – угол между направлением действия напряжений и вектором намагниченности. Количественно магнитоупругую анизотропию оценивают по значению константы магнитоупругой анизотропии K_σ :

$$K_\sigma = 3/2 \lambda_s \sigma.$$

При изготовлении аморфного сплава методом закалки расплава на быстровращающемся барабане, материалы испытывают действие внутренних и внешних напряжений, что приводит к возникновению магнитной анизотропии. Ниже будет подробно описано влияние термической и термомагнитной обработки на эти напряжения. Термическая обработка уменьшает их величину, и, в соответствии с формулой (1), магнитоупругую энергию. Термомагнитная обработка в сочетании с воздействием механических напряжений приводят к усилению одноосной магнитной анизотропии. Основным механизмом такой наведенной магнитной анизотропии является парное упорядочение атомов: пары ближайших соседних атомов ориентируются в образце вдоль направления, заданного приложенным внешним магнитным полем или механическим напряжением.

Основными приборами для измерения перечисленных выше магнитных характеристик аморфных магнетиков (таких, как коэрцитивная сила, поле насыщения, намагниченность насыщения, магнитная проницаемость, магнитная анизотропия) являются вибрационный магнитометр и СКВИД-магнитометр. Явление ферромагнитного резонанса позволяет детально изучить магнитную анизотропию аморфного магнетика. Измерить магнитострикцию насыщения и получить информацию о поле магнитоупругой анизотропии можно, используя метод малоуглового вращения намагниченности. Он заключается в измерении угла отклонения намагниченности от оси легкого намагничивания за счет переменного магнитного поля.

Приповерхностные магнитные характеристики АММ изучаются с помощью магнитооптических методов. Кроме того, используется метод магнитооптической векторной магнитометрии, основанный на взаимодействии внутреннего магнитного поля, наведенного током, текущим вдоль длины ленты, с внешним магнитным полем, которое создает катушка. Метод векторной магнитометрии исключает влияние размагничивающего фактора и анизотропии формы на измеряемые петли гистерезиса.

Для исследования АММ также необходимо изучить реальную атомную структуру магнетика. Самые популярные методы исследования микроструктуры АММ включают в себя электронно-микроскопический анализ, а также методы малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей. По характеру рассеяния рентгеновского излучения и диаметру диффузного кольца на рентгенограмме можно оценить степень упорядочения атомного строения аморфного вещества и среднее межатомное расстояние.

Основные методы получения аморфной структуры:

1. Осаждение металла из газовой фазы (вакуумное напыление, распыление и химические реакции в газообразной среде);
2. Затвердевание жидкого металла (различные методы закалки из жидкого состояния);
3. Введение дефектов в металлический кристалл (облучение частицами поверхности кристалла, воздействие ударной волной).

Наиболее распространенным методом получения АММ является метод закалки расплава из жидкого состояния, при котором расплав вещества быстро охлаждается до температуры стеклования $T_{СТ}$. Скорость охлаждения от $T_{пл}$ до $T_{СТ}$ должна быть такой, чтобы материал не успевал кристаллизироваться. Эта скорость порядка $10^4 - 10^6$ К/с.

1.2 Аморфные микропровода

С точки зрения практического применения особого внимания заслуживают АММ, полученные в виде микропроводов. Одним из популярных методов их изготовления является метод Улитовского-Тейлора [5, 13]. В Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН была разработана его улучшенная модификация, представляющая собой «непрерывный» метод литья микропровода [14]. Схема метода представлена на рисунке 1.

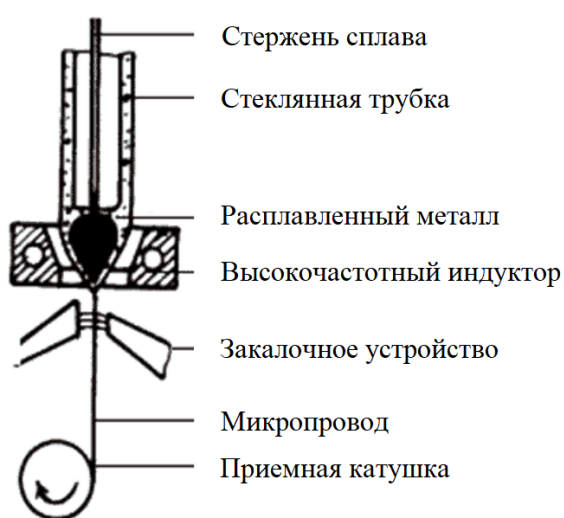


Рисунок 1. *Схема модернизированного метода Улитовского-Тейлора для изготовления аморфных микропроводов.*

Методика заключается в следующем. Выбранный сплав помещается в стеклянную колбу, которая располагается внутри высокочастотного индуктора. Металл расплавляется, покрывается стеклянной оболочкой, быстро охлаждается струей воды и вытягивается в микропровод. Скорость охлаждения составляет примерно 10^6 К/с, что обеспечивает аморфизацию микропровода. В модернизированном методе Улитовского-Тейлора уровень магнитомягких сплавов в капле непрерывно восстанавливается вводимым в неё стержнем исходного сплава.

Анализ существующих данных показывает, что магнитные свойства аморфных микропроводов также зависят от состава сплава, размера микропровода, термической обработки и приложенных напряжений.

Наиболее часто в практических приложениях используются аморфные микропровода со стеклянным покрытием. Стеклянная оболочка микропровода обуславливает увеличение критического поля H^* по сравнению с обычными микропроводами без оболочки, так как микропровода со стеклянной оболочкой имеют внутренние напряжения большей величины, чем те же микропровода в отсутствие этой оболочки. Эти напряжения наводятся в процессе изготовления микропроводов. Дополнительные напряжения возникают при затвердевании стеклянной оболочки. Дополнительный вклад в критическое поле H^* дает также различие коэффициентов теплового расширения стекла и металлического стержня. После удаления оболочки внутренние напряжения уменьшаются, что способствует улучшению магнитомягких свойств микропроводов.

При низких значениях магнитного поля петля гистерезиса является бистабильной. Бистабильное состояние зависит от состава сплава и от внутренних напряжений. Поле, при котором одно стабильное состояние переключается в другое, называется полем переключения и обычно обозначается как H^* .

Следует заметить, что бистабильное состояние и прямоугольные петли гистерезиса наблюдаются лишь в аморфных микропроводах с длиной, превышающей критическую длину. Известно, что критическая длина L_{KP} для Со-обогащенных микропроводов около 4 см, а для Fe-обогащенных аморфных микропроводов около 7 см. Термическая обработка помогает уменьшить L_{KP} до 2 см. В Fe-обогащенных аморфных микропроводах, покрытых стеклянной оболочкой, критическая длина L_{KP} значительно меньше (порядка 2 мм) по сравнению с аморфными микропроводами без стеклянного покрытия.

Более того, в аморфных микропроводах были обнаружены такие эффекты, как эффект Матеусси (появление разности потенциалов на концах скрученного аморфного микропровода в переменном магнитном поле) и обратный эффект Вайдемана (изменение магнитной индукции материала, вызванное приложением закручивающих напряжений в присутствии кругового магнитного поля, создаваемого током, протекающим через провод).

Импульсы напряжения, регистрируемые благодаря перечисленным выше эффектам, возникают вследствие перемещения доменной границы и не зависят от скорости изменения прикладываемого поля. Именно поэтому эти импульсы слабо зависят от частоты возбуждающего поля.

Вышеуказанные эффекты, обнаруженные в аморфных микропроводах, оказались чрезвычайно перспективными с точки зрения практических применений этих материалов.

Выше уже было сказано, что магнитная анизотропия аморфных микропроводов имеет магнитоупругое происхождение. В первую очередь она зависит от механических напряжений, существующих в процессе изготовления материалов. В микропроводах внешняя оболочка провода затвердевает первой, а внутренняя часть затвердевает под влиянием сжимающих напряжений со стороны уже сформировавшейся твердой оболочки. Таким образом, в микропроводах величина магнитоупругой энергии определяется конкурирующими вкладами напряжений, существующих в продольном S_l , радиальном S_r и круговом S_c направлениях. На рис. 2 схематически показаны напряжения, возникающие в процессе изготовления микропроводов (а), и возможная ориентация ОЛН (A_l , A_r , A_c) в Fe- и Co-обогащенных микропроводах ((b) и (c), соответственно).

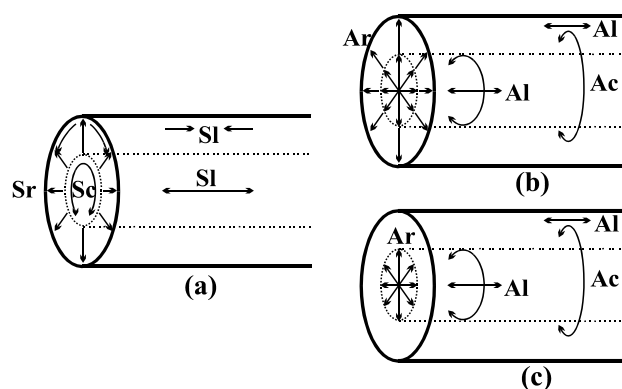


Рисунок 2. Схематическое изображение напряжений, возникающих в процессе изготовления микропроводов (а) и возможная ориентация ОЛН в Fe- (2) и Co- (3) обогащенных микропроводах.

Кроме того, энергия магнитоупругой анизотропии зависит от значения магнитострикции λ_S . Константа магнитострикции насыщения λ_S зависит от состава аморфного сплава и изменяется в широких пределах от положительных до отрицательных значений. Аморфные микропровода на основе железа в большинстве случаев имеют положительную константу магнитострикции, а Co-обогащенные аморфные материалы отрицательную. Аморфные материалы с почти нулевой магнитострикцией обычно содержат одновременно как кобальт, так и железо, но концентрация кобальта значительно выше (например, $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15} - \lambda_S = -1 \times 10^{-7}$). Ориентация оси легкого намагничивания зависит от знака λ_S . В случае положительных значений λ_S ориентация ОЛН совпадает с направлением механических напряжений, а в случае отрицательной величины λ_S перпендикулярна этому направлению.

1.3 Доменная структура и процессы перемангничивания аморфных микропроводов

Как известно, ферромагнетик обычно характеризуется наличием множества областей самопроизвольной намагниченности (доменов), каждая из которых намагничена до насыщения. Процессы, происходящие с

доменами при наложении на ферромагнетик внешнего магнитного поля, описываются петлей гистерезиса. Доменная структура любого ферромагнетика определяется минимумом его свободной энергии, равной, как правило, сумме энергий магнитоэлектростатических полей рассеяния, магнитной анизотропии и обменной энергии.

Доменная структура в значительной степени определяет характер намагничивания, коэрцитивность и другие характеристики. Кроме того, доменная структура аморфных проводов является причиной прямоугольной формы их петель гистерезиса. Предполагается, что аморфный микропровод состоит из двух областей с различной доменной структурой. Внутренняя область однородно намагничена вдоль оси провода, а внешняя оболочка имеет домены с круговым или радиальным направлением намагниченности. Размер внутреннего стержня принимает разное значение относительно диаметра провода в зависимости от знака магнитострикции. Прямоугольность петли гистерезиса обусловлена перемагничиванием внутренней части провода. Приближение к насыщению сопровождается непрерывным уменьшением нормальной компоненты намагниченности во внешней оболочке.

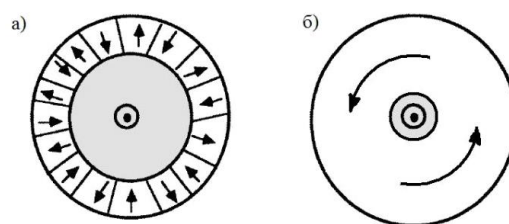


Рисунок 3. Схематическое изображение доменной структуры, предложенной для микропроводов с положительным (а) и отрицательным (б) значением магнитострикции.

Рассмотрим доменные структуры аморфных микропроводов более детально. Аморфные микропровода с положительной магнитострикцией ($\lambda_s > 0$) состоят из однодоменного продольно намагниченного внутреннего стержня и зигзагообразной мультидоменной внешней оболочки с

радиальным направлением намагниченности (Рис. 3, а). Ориентация намагниченности зависит от распределения внутренних напряжений, индуцированных в процессе изготовления микропровода – продольного σ_a , радиального σ_r и кругового σ_c . Во внутреннем стержне аморфного микропровода выполняется следующее соотношение для напряжений:

$$\sigma_a > \sigma_c > \sigma_r.$$

Вследствие этого на расстоянии

$$x = R_c / R \sim 0.7,$$

(где R_c – радиус стержня, R – радиус микропровода), от оси микропровода, ось легкого намагничивания параллельна оси микропровода, а в области $x > 0.7$ начинает поворачиваться к радиальному направлению, так как продольное и круговое напряжения σ_a и σ_c изменяют знак. Эта переходная область состоит из доменов, наклоненных под углом 45° к оси микропровода. Магнитоупругая анизотропия в этой области достигает минимума. Положительное радиальное напряжение σ_r в приповерхностном слое обуславливает радиальное направление легкой оси во внешней оболочке [15].

Продольная ориентация намагниченности во внутреннем объеме микропровода приводит к появлению на ее концах магнитных полюсов, и, следовательно, к росту магнитостатической энергии. Для ее уменьшения на обоих концах микропровода образуются замыкающие домены с противоположным направлением намагниченности. Размер замыкающих доменов зависит от приложенного магнитного поля и внешних напряжений. С ростом поля оба замыкающих домена увеличиваются несимметричным образом и «схлопываются» [16]. Однако такое схлопывание спонтанно существует в коротких микропроводах из-за больших размагничивающих полей. Для микропроводов с положительной магнитострикцией размер каждого замыкающего домена составляет 3 см, а поэтому в аморфном

микропроводе длиной менее 6 см, происходит спонтанное схлопывание обратных доменов и бистабильное состояние не реализуется [17].

Кроме того, доменная структура аморфных микропроводов зависит от их диаметра D [18]. В частности, с ростом D увеличивается магнитная анизотропия, что обуславливает увеличение наклона поверхностных доменов, а также растет размагничивающее поле. Его рост обуславливает увеличение критической длины бистабильного состояния L_{KP} , что приводит к увеличению размера обратных доменов на концах микропровода.

Аморфные микропровода с отрицательной магнитострикцией ($\lambda_s < 0$) также состоят из продольно намагниченного внутреннего стержня и внешней оболочки. Однако в отличие от микропроводов с $\lambda_s > 0$, ось легкого намагничивания во внешней оболочке имеет круговое направление (Рис. 3, б) [19]. Распределение намагниченности в аморфных микропроводах с $\lambda_s < 0$ обусловлено малыми возмущениями аксиальной симметрии микропровода [20]. Благодаря достаточно большой величине намагниченности насыщения, даже малое возмущение аксиальной симметрии может вызвать появление поверхностных или объемных магнитных зарядов большой величины. Если такие возмущения медленно распространяются вдоль микропровода на расстояния много больше ее радиуса, магнитные заряды могут дать ощутимый вклад в магнитостатическую энергию аморфного микропровода. Доменная структура в микропроводах с отрицательной магнитострикцией сводит к минимуму магнитостатическую энергию этих зарядов.

Наличие внутреннего стержня в микропроводах с отрицательной магнитострикцией можно объяснить с точки зрения обменной энергии [21]. Если бы во всем объеме аморфного микропровода с $\lambda_s < 0$ намагниченность имела бы круговое направление, то суммарная обменная энергия соседних спинов была бы очень большой, так как эта энергия пропорциональна углу между соседними спинами, который растет по мере приближения к оси микропровода. Для уменьшения обменной энергии намагниченность в

стержне должна быть направлена продольно, несмотря на то, что при этом увеличивается магнитостатическая энергия на концах микропровода. Влияние размагничивающего поля уменьшается за счет сужения внутреннего стержня к концам микропровода.

В аморфных микропроводах с почти нулевой магнитострикцией ($\lambda_s \sim 0$) доменная структура более сложная. В этом случае из-за уменьшения влияния магнитоупругой анизотропии в формировании доменной структуры начинают участвовать и другие факторы, которые приводят к разбиению внутреннего однородно намагниченного вдоль оси микропровода стержня на множество продольно намагниченных доменов. Такая структура не всегда обеспечивает условия для реализации эффекта Баркгаузена.

1.4 АММ в качестве идентификационных меток в противокражных системах

Противокражные системы предназначены для предотвращения несанкционированного выноса товаров или вещей. Основными элементами таких систем являются идентификационные метки, прикрепляемые к защищаемым изделиям, генератор, генерирующий переменное магнитное поле и детектор для регистрации наличия метки.

Аморфные магнитные материалы, в частности, аморфные ленты, являются основным элементом идентификационных меток противокражных систем акустомагнитной и электромагнитной технологий [22].

Метка (транспондер) акустомагнитной технологии (рис. 4, а) представляет собой пластиковый корпус, содержащий жестко зафиксированную аморфную ленту и как минимум одну металлическую полосу из магнитотвердого материала, которая не закреплена и может свободно совершать механические колебания в корпусе.

Под воздействием внешнего переменного магнитного поля частотой 58 кГц (рис 4, б) благодаря магнитострикционному эффекту аморфная лента начинает изменять свои размеры в продольном направлении с частотой внешнего переменного магнитного поля. Состав и размеры аморфной ленты специально подбираются таким образом, чтобы частота внешнего поля точно совпадала с резонансной частотой аморфной ленты. Таким образом, лента создает сильное переменное магнитное поле, которое заставляет колебаться металлическую полосу в такт частоте внешнего поля.

При выключении поля аморфная лента уже не создает своего поля, однако колебания постоянного магнита еще продолжаются. Эти колебания начинают возбуждать появление переменного магнитного поля в аморфной ленте. Однако эти колебания продолжаются совсем недолго и по убывающей траектории. Именно этот быстрозатухающий сигнал улавливает приемник противокражной системы (рис 4, в).

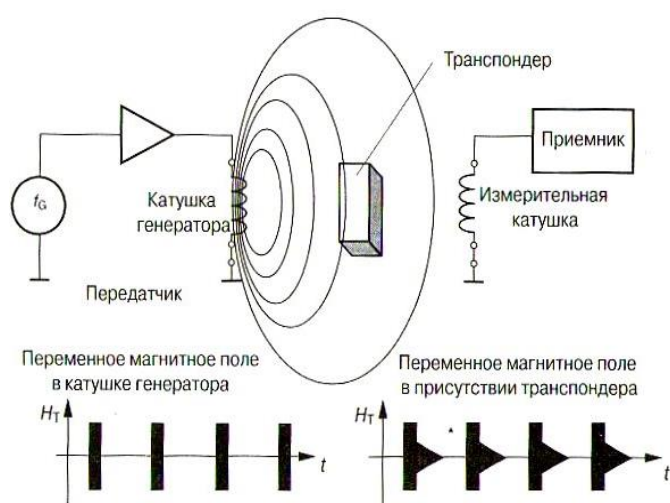


Рисунок 4. а – схема противокражной системы акустоманитного типа; б – сигнал переменного магнитного поля в катушке генератора; в – сигнал переменного магнитного поля в измерительной катушке в присутствие метки.

Для деактивации метки необходимо размагнитить металлические полосы из магнитотвердого материала. Это приводит к рассогласованию резонансной частоты аморфной ленты, и она больше не возбуждается под воздействием внешнего магнитного поля. Для размагничивания полосы из магнитотвердого материала необходимо использовать переменное магнитное поле достаточной мощности, причем эта мощность должна медленно уменьшаться с течением времени. Поэтому описанный выше вид

противокражной метки обладает надежностью с точки зрения попыток незаконного размагничивания.

В качестве преимуществ акустомагнитной технологии можно также выделить возможность регистрации меток на больших расстояниях по сравнению с другими технологиями, а также высокую помехоустойчивость, благодаря чему для данных систем характерно отсутствие ложных сигналов. Однако особое внимание следует обратить на высокий коэффициент срабатывания метки, который составляет до 95%. Главным недостатком акустомагнитных систем считается более высокая стоимость антенн и расходных материалов по сравнению с системами других технологий.

Более дешевой и простой системой защиты являются противокражные системы электромагнитного типа. Метка противокражной системы электромагнитного типа содержит ленты из магнитомягкого аморфного металла, у которых кривая гистерезиса имеет крутой наклон.

В сильном переменном магнитном поле в диапазоне низких частот (от 10 Гц до 20 кГц) аморфные ленты переходят в состояние магнитного насыщения. Благодаря сильной нелинейной зависимости плотности магнитной индукции от напряженности внешнего магнитного поля вблизи точки насыщения возникают гармоники основной частоты переменного внешнего магнитного поля, которые регистрируются детектором и свидетельствуют о присутствии метки.

Аморфные ленты в метке обычно покрыты слоем магнитотвердого магнитного материала или частично закрываются магнитными пластинами. Для деактивации метки необходимо намагнитить слой такого магнетика, в результате магнитное поле металла мешает аморфным лентам перемагничиваться в переменном магнитном поле, и гармоники частоты, которые фиксируют присутствие метки, не порождаются.

Основным недостатком электромагнитной технологии является высокая требовательность к ориентации метки относительно детектора противокражной системы: не все ориентации соответствуют надежному обнаружению метки. В связи с этим фактом, а также относительно малым расстоянием между меткой и детектором для надежного обнаружения, коэффициент срабатывания метки электромагнитной системы составляет лишь 70%.

Однако в качестве преимуществ, как уже было сказано выше можно выделить их невысокую цену по сравнению с другими системами защиты, а также малый размер меток и их устойчивость к механическим воздействиям: они не теряют своих свойств ни при перегибе, ни даже при разрезе.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИЗУЧАЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

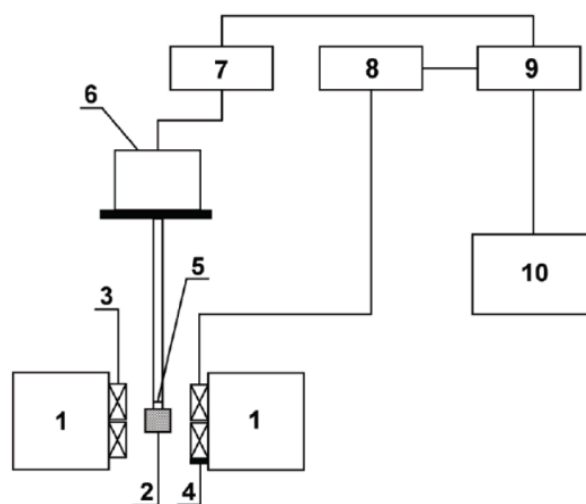
2.1. Изучаемые образцы

В настоящей работе были исследованы кобальтобогатенные аморфные микропровода состава $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$. Микропровода были получены с помощью модернизированного метода Улитовского-Тейлора. Изучаемые микропровода были скручены в виде колец. Экспериментально изучались три серии образцов, отличающихся толщиной микропроводов и диаметрами колец. В первой серии толщина микропровода $D_{\text{ж}}$ была равна 27 мкм, а диаметры колец $D_{\text{к}}$ были равны 3, 6 и 11 мм. Во второй серии толщина микропровода $D_{\text{ж}}$ была равна 50 мкм, а диаметры колец $D_{\text{к}}$ были равны 3, 6 и 11 мм. Третья серия состояла из двух колец диаметрами $D_{\text{к}}$ 8 и 11 мм с толщиной жилы $D_{\text{ж}}$ микропровода 100 мкм.

С целью получения детальной информации об изучаемых образцах были проведены также измерения для прямых аморфных микропроводов аналогичного состава и толщины жилы. Это позволило сравнить полученные данные с образцами, имеющими кольцевую форму. Следует отметить, что длина изучаемых проводов соответствует тем длинам проводов, из которых были получены образцы кольцевой формы.

2.2 Методика измерения магнитных характеристик изучаемых образцов.

Основными магнитными характеристиками аморфных материалов, предопределяющими их дальнейшее практическое применение, являются намагниченность насыщения M_s , поле насыщения H_s и коэрцитивная сила H_c . Объёмные магнитные характеристики изучаемых образцов были измерены с помощью вибрационного магнитометра «Lake Shore» VSM 7400. На рис. 5 приведена блок-схема вибрационного магнитометра [23].



- | | |
|---------------------|---------------------------------------|
| 1. Электромагнит | 7. Генератор низкочастотных колебаний |
| 2. Образец | 8. Усилитель |
| 3. Приемные катушки | 9. Синхронный детектор |
| 4. Датчик Холла | 10. Персональный компьютер |
| 5. Термопара | |
| 6. Вибратор | |

Рисунок 5. Блок-схема вибрационного магнитометра.

Исследования на вибрационном магнитометре, как правило, проводятся в однородных магнитных полях, создаваемых электромагнитом (1) или соленоидом (в том числе сверхпроводящим). Образец (2), закреплённый на штоке, совершает гармонические колебания, создаваемые генератором механических колебаний (вибратором) (6), на который подаётся напряжение от низкочастотного генератора (7). Переменный сигнал, амплитуда которого пропорциональна магнитному моменту исследуемого образца, усиливается селективным усилителем (8), величина амплитуды определяется с помощью синхронного детектора (9), полученный сигнал оцифровывается и подается на персональный компьютер (10). В измерительной цепи находятся датчик измерения магнитного поля (датчик Холла (4)) и датчик измерения температуры (термопара (5)). Термопара подключается в том случае, если существует возможность проведения измерений в широком диапазоне температур.

Принцип работы вибрационного магнитометра основан на использовании закона электромагнитной индукции. В частности, если исследуемый образец, характеризующийся магнитным моментом M , совершает гармонические колебания с частотой ω и амплитудой A , то он представляет собой магнитный диполь, излучающий электромагнитные волны. Если приёмная система катушек имеет N витков и характеризуется геометрическим фактором $G(r)$ (пространственная функция распределения, зависящая от числа витков в катушках и их расположения), то по величине ЭДС (E) в приемных катушках можно вычислить величину магнитного момента образца:

$$E = \frac{1}{2} MG(r) NA \omega \cos(\omega t)$$

Основные параметры вибрационного магнитометра «LakeShore»:

1. Максимальная величина магнитного поля – 16 кЭ;
2. Дискретность изменения величины магнитного поля – 0.1 Э;
3. Точность изменения величины магнитного поля – 0.1 Э;
4. Точность измерения величины магнитного момента – 10^{-7} emu (emu – electromagnetic units, 1 emu = 1 Гс · см³).

На вибрационном магнитометре был измерен магнитный момент образцов в зависимости от величины и ориентации приложенного магнитного поля. Внешнее магнитное поле было направлено под разными углами относительно образца. Конфигурацией №1 будем называть вертикальное положение кольца относительно наблюдателя (рис. 6а, б), а конфигурацией №2 – горизонтальное положение относительно наблюдателя (рис. 7). В конфигурации №1 кольцо вращается относительно направления внешнего магнитного поля на 180 градусов с шагом 15 градусов. Для наглядности, на рисунке 6а приведена конфигурация №1 с углом между

плоскостью кольца и направлением силовых линий магнитного поля $\alpha = 0^\circ$, а на рисунке 6б угол $\alpha = 90^\circ$.

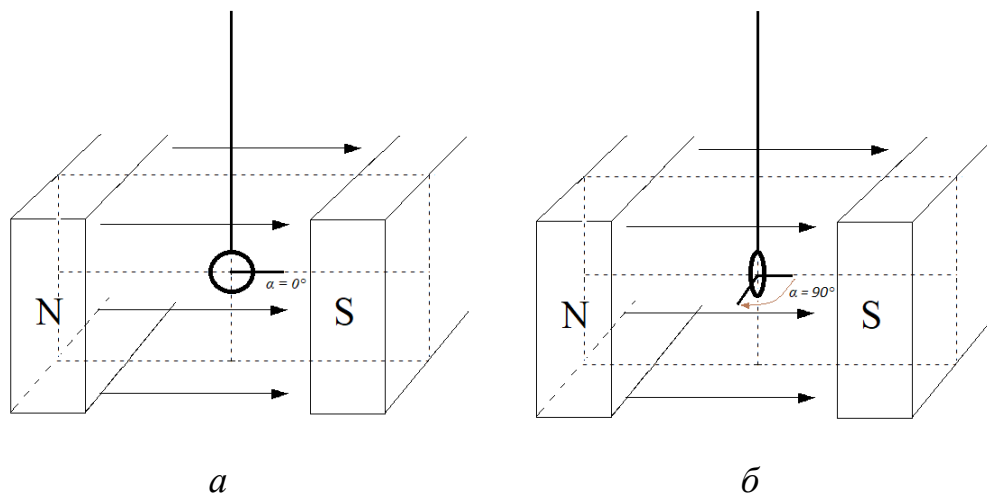


Рисунок 6. Конфигурация №1 расположения исследуемых образцов: вертикальное положение плоскости кольца относительно наблюдателя. Кольцо вращается относительно направления внешнего магнитного поля на 180° с шагом 15° . а – угол $\alpha = 0^\circ$; б – угол $\alpha = 90^\circ$, где α – угол между плоскостью кольца и направлением силовых линий магнитного поля.

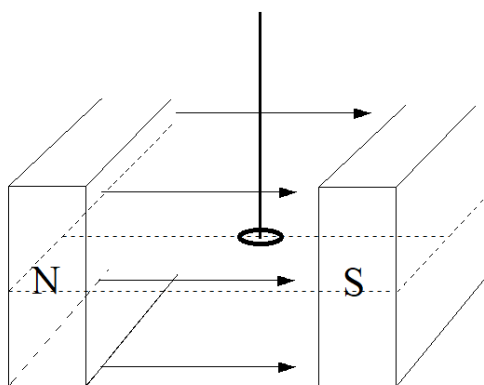
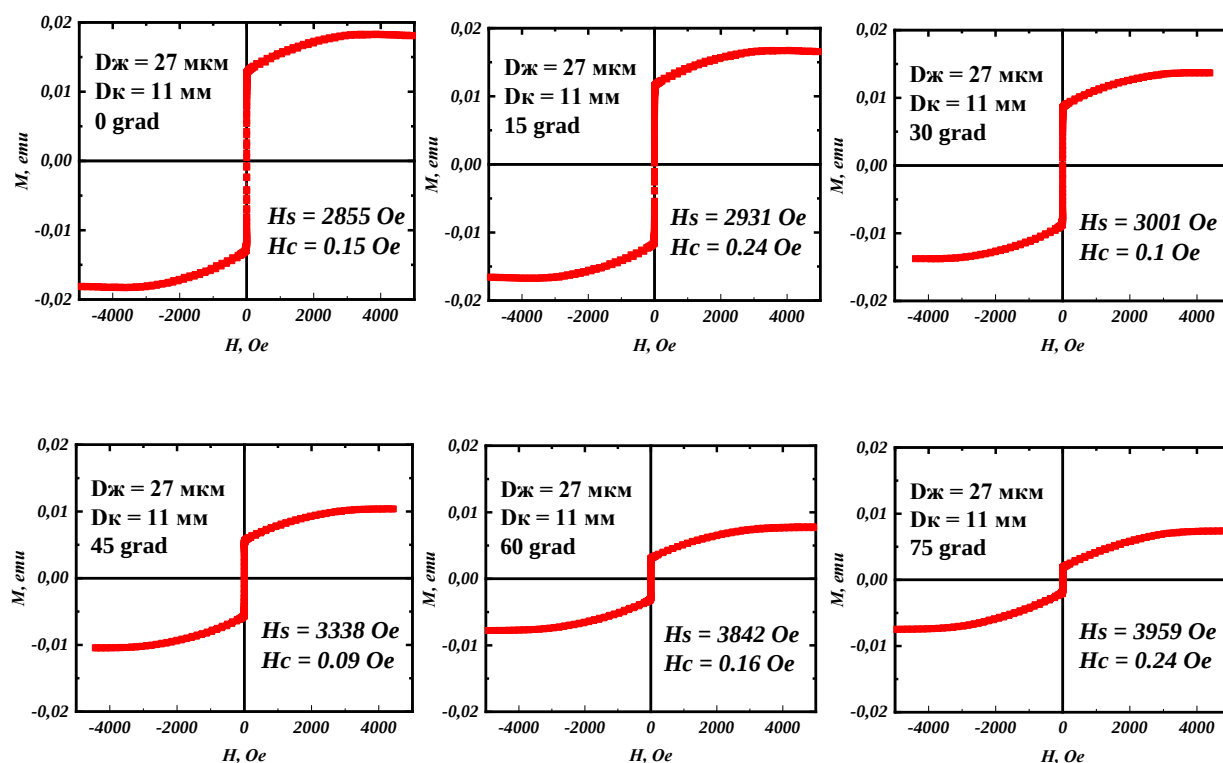


Рисунок 7. Конфигурация №2 расположения исследуемых образцов: горизонтальное положение плоскости кольца относительно наблюдателя.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Магнитные характеристики микропроводов, скрученных в кольца

Ниже на рисунках представлены типичные магнитополевые зависимости, наблюдаемые для изучаемых образцов. Для примера приведён образец с диаметром кольца $D_K = 11$ мм, полученный из аморфного микропровода с диаметром жилы $D_J = 27$ мкм (рис 7). Приведенные на рис. 7 результаты измерений были получены при вертикальной ориентации плоскости кольца в магнитном поле (конфигурация №1). В процессе проводимых измерений направление внешнего магнитного поля относительно плоскости кольца изменялось от $\alpha = 0^\circ$ (плоскость параллельна направлению поля) до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15° . Причём $\alpha = 90^\circ$ соответствует перпендикулярному положению плоскости кольца относительно направления внешнего магнитного поля.



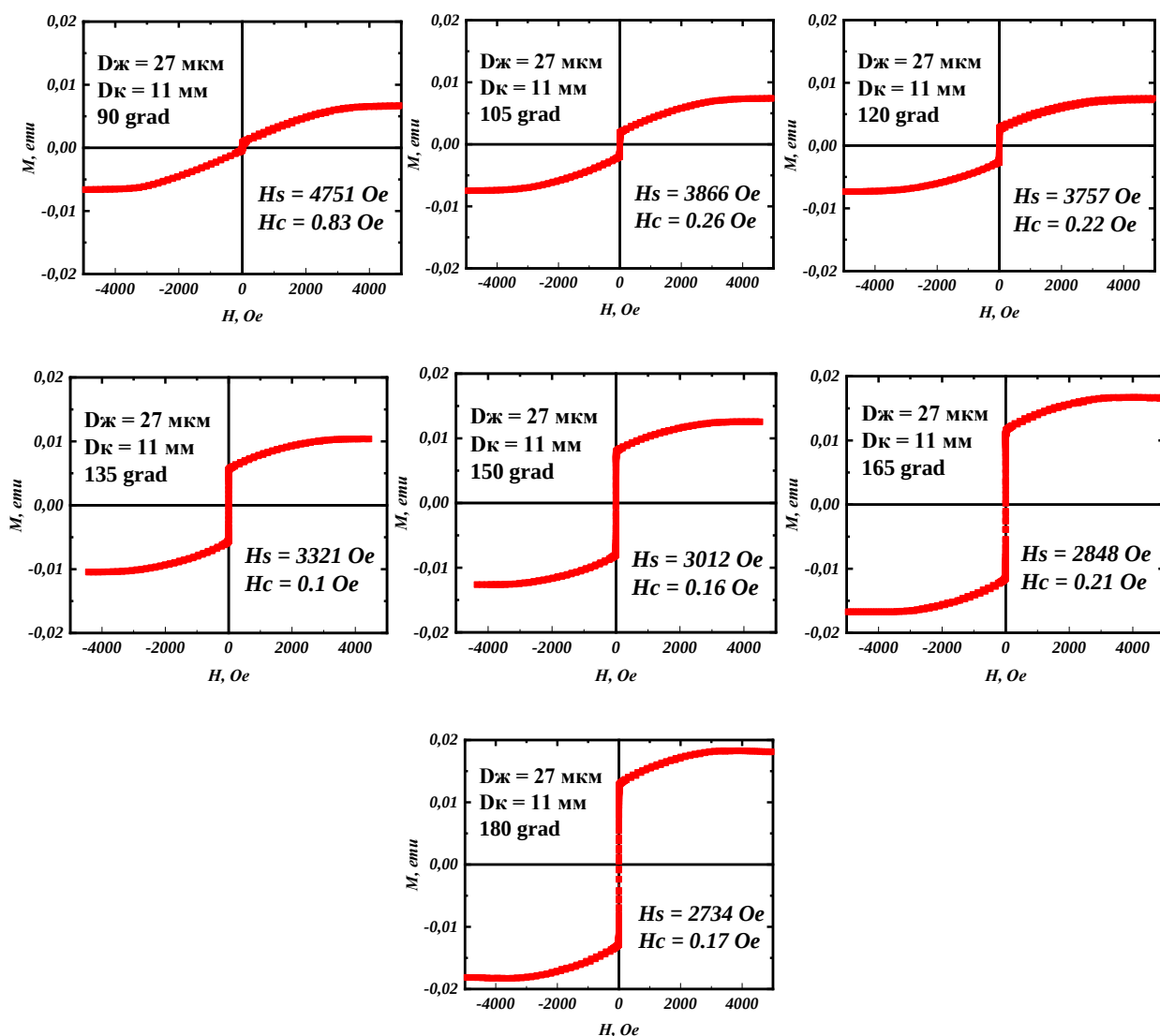


Рисунок 7. Магнитополевые зависимости аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ диаметром 27 мкм, скрученного в кольцо диаметром 11 мм, для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°). Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

Из рисунка 7 видно, что магнитополевые зависимости изучаемого образца различаются при изменении угла поворота кольца относительно магнитного поля. Для $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$ наблюдается почти безгистерезисная петля с крутым наклоном. При изменении α от 0° до 90° форма петли выпрямляется, а при $\alpha = 90^\circ$ форма петли становится диагональной.

Полученные данные позволили получить угловые зависимости таких магнитных характеристик, как коэрцитивная сила H_c и максимальный

магнитный момент M_{MAX} . В таблице 1 приведены полученные значения M_{MAX} и H_C , а на рисунке 8 графический вид зависимостей.

Таблица 1. Значения H_S , H_C и M_{MAX} , наблюдаемые для аморфного микропровода $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$ диаметром 27 мкм, скрученного в кольцо диаметром 11 мм, для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°). Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

	Конфигурация №1 (Плоскость кольца ориентирована вертикально)												
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
$H_S, \text{Э}$	2855	2931	3001	3338	3842	3959	4751	3866	3757	3321	3012	2848	2734
$H_C, \text{Э}$	0,15	0,24	0,1	0,09	0,16	0,24	0,83	0,26	0,22	0,1	0,16	0,21	0,17
$M_{MAX}, \text{теги}$	18,28	16,73	13,71	10,40	7,83	7,40	6,69	7,11	7,52	9,05	12,56	15,81	17,94

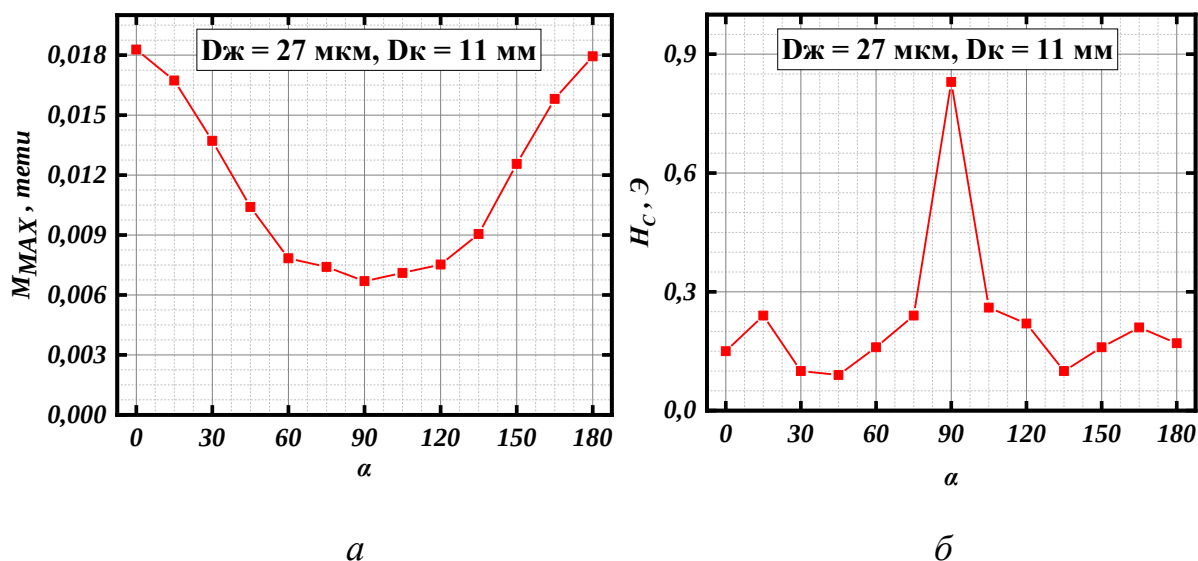


Рисунок 8. Угловые зависимости M_{MAX} (а) и H_C (б), наблюдаемые для аморфного микропровода $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$ диаметром 27 мкм, скрученного в кольцо диаметром 11 мм, для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°). Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

Анализ полученных данных показал следующее.

Во-первых, можно отметить симметричность характеристик (коэрцитивной силы H_C и максимального магнитного момента M_{MAX}) и форм петель гистерезиса при изменении угла от 0° до 90° и от 90° до 180° . При повороте кольца от 0° до 90° наблюдаются определенные изменения формы петель гистерезиса и значений характеристик. Дальнейший поворот от 90° до 180° сопровождается симметричным сходством получаемых характеристик вследствие симметричности самого образца.

Во-вторых, наблюдается зависимость максимального магнитного момента кольца M_{MAX} от его угла поворота α . В исходном положении кольца ($\alpha = 0^\circ$) его магнитный момент в насыщении M_{MAX} равен 18,28 мему. При повороте на $\alpha = 90^\circ$ момент M_{MAX} принимает значение 6,69 мему. Таким образом, при изменении ориентации плоскости кольца от параллельной полю к перпендикулярной максимальный магнитный момент M_{MAX} кольца уменьшается на 11,59 мему, то есть на 37%.

В-третьих, обнаружено резкое увеличение коэрцитивной силы H_C кольца в зависимости от значений α . При повороте образца от 0° до 75° градусов наблюдались значения H_C , не превышающие 0.26 Э, однако при переходе к перпендикулярной ориентации кольца относительно направления магнитного поля ($\alpha = 90^\circ$) коэрцитивная сила увеличилась до 0.83 Э.

Далее следует отметить, что были получены заслуживающие внимание результаты при исследовании колец, скрученных из микропроводов, с тем же диаметром жилы микропровода $D_{Ж} = 27$ мкм, но с диаметрами колец $D_K = 3$ мм (рис. 9, а) и $D_K = 6$ мм (рис. 9, б). Это позволило проанализировать влияние диаметра кольца на его магнитные характеристики.

Полученные магнитополевые зависимости для различных ориентаций кольца α представлены на рисунке 9. На рисунке 10 приведены угловые зависимости M_{MAX} и H_C . Для удобства сравнения результатов на рисунках

представлены измерения для всей серии колец с диаметром жилы $D_{\text{ж}} = 27$ мкм, включая кольцо с диаметром $D_{\text{к}} = 11$ мм, результаты для которого уже были представлены выше.

Можно подчеркнуть, что магнитопольевые зависимости представлены для углов от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 90^\circ$. Это обусловлено симметричностью полученных данных для положений кольца от $\alpha = 90^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$.

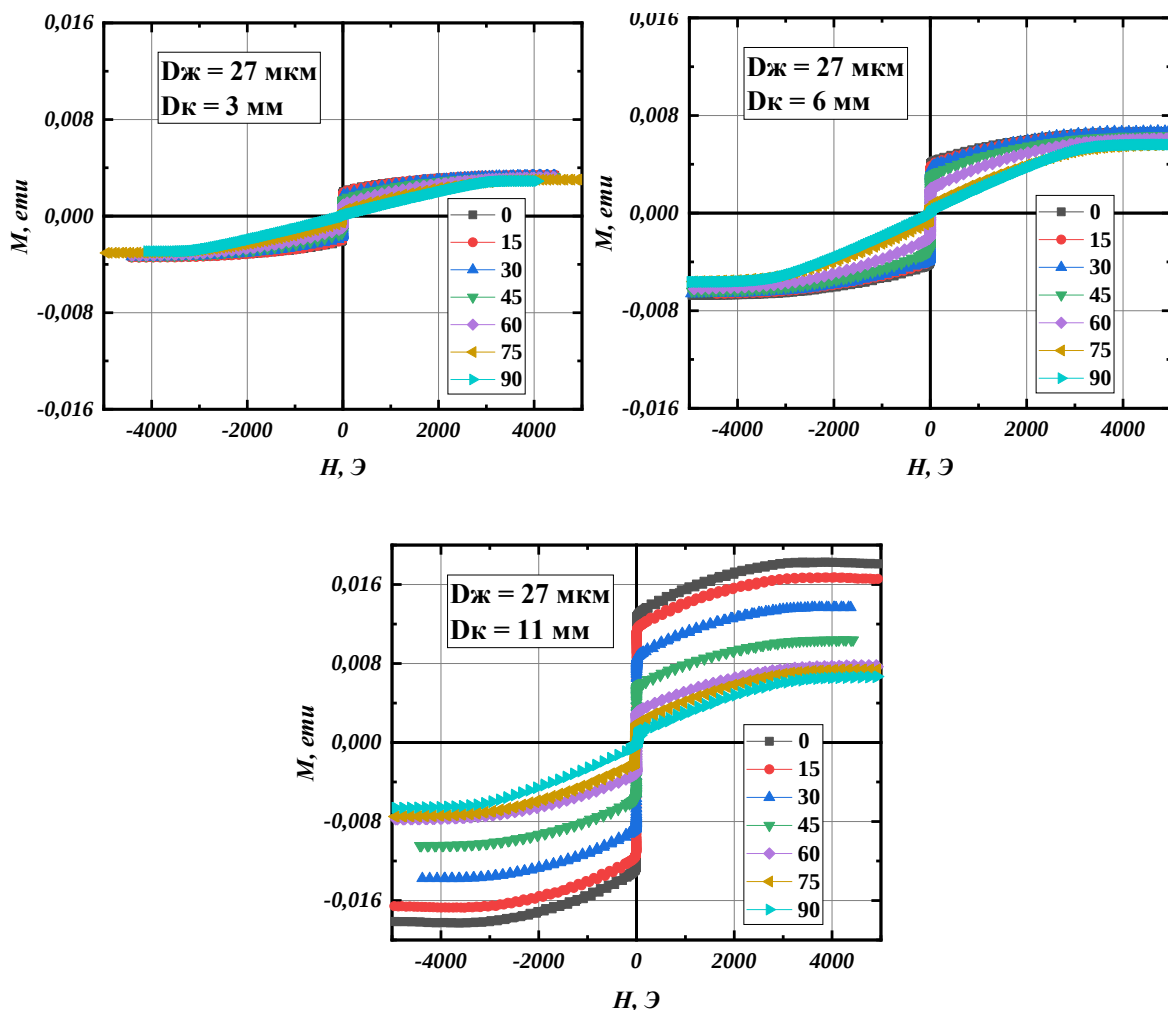


Рисунок 9. Магнитопольевые зависимости аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ диаметром 27 мкм, скрученного в кольца диаметром 3 мм (а), 6 мм (б), 11 мм (в) для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°). Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

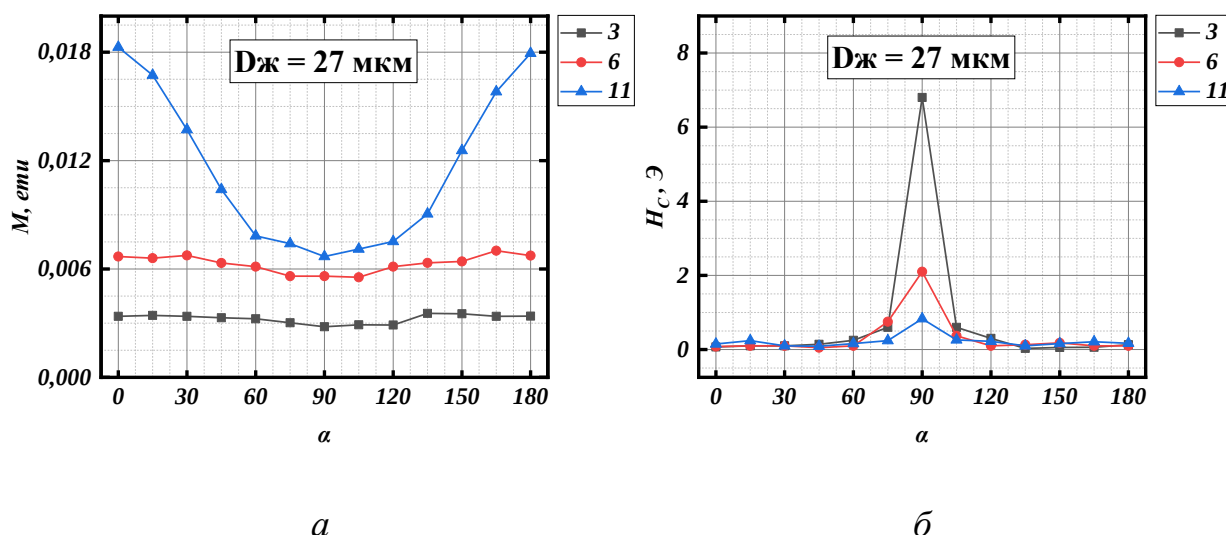


Рисунок 10. Угловые зависимости M_{MAX} (а) и H_C (б), наблюдаемые для аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ диаметром 27 мкм, скрученного в кольца диаметром 3 мм, 6 мм, 11 мм, для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°). Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

Во-первых, сразу можно отметить воспроизводимость полученных выше результатов для кольца диаметром 11 мм. Фактически наблюдаются идентичное изменение формы петель и качественно аналогичные зависимости $M_{\text{MAX}}(\alpha)$ и $H_C(\alpha)$ и для других диаметров колец. Количественно же характеристики отличаются.

Во-вторых, наблюдается увеличение максимального магнитного момента кольца M_{MAX} при увеличении его диаметра D_K .

В-третьих, было обнаружено, что коэрцитивная сила H_C ведет себя аналогично вышеприведённому результату – при повороте кольца от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 75^\circ$ коэрцитивная сила имеет значение в пределах 0.1-0.3 Э, а её резкое увеличение при достижении 90° наблюдается для всех трёх образцов. При этом чем больше диаметр исследуемого кольца, тем меньшее значение коэрцитивной силы наблюдается при $\alpha = 90^\circ$. Как уже отмечалось ранее, при диаметре кольца $D_K = 11 \text{ мм}$ коэрцитивная сила увеличилась до 0.83 Э. При

этом для кольца диаметром $D_K = 6$ мм коэрцитивная сила увеличилась до 2 Э, а для кольца диаметром $D_K = 3$ мм H_C достигает значения 6.8 Э.

Далее было проанализировано влияние толщины жилы кольца на его магнитные характеристики. В связи с этим были измерены еще две серии колец из аморфных микропроводов с диаметрами жилы 50 мкм и 100 мкм. Ниже приведены магнитополевые зависимости, наблюдаемые для колец из микропроводов диаметром $D_{Ж} = 50$ мкм (рис. 11) и $D_{Ж} = 100$ мкм (рис. 13), а также угловые зависимости M_{MAX} (рис.12) и H_C (рис. 14).

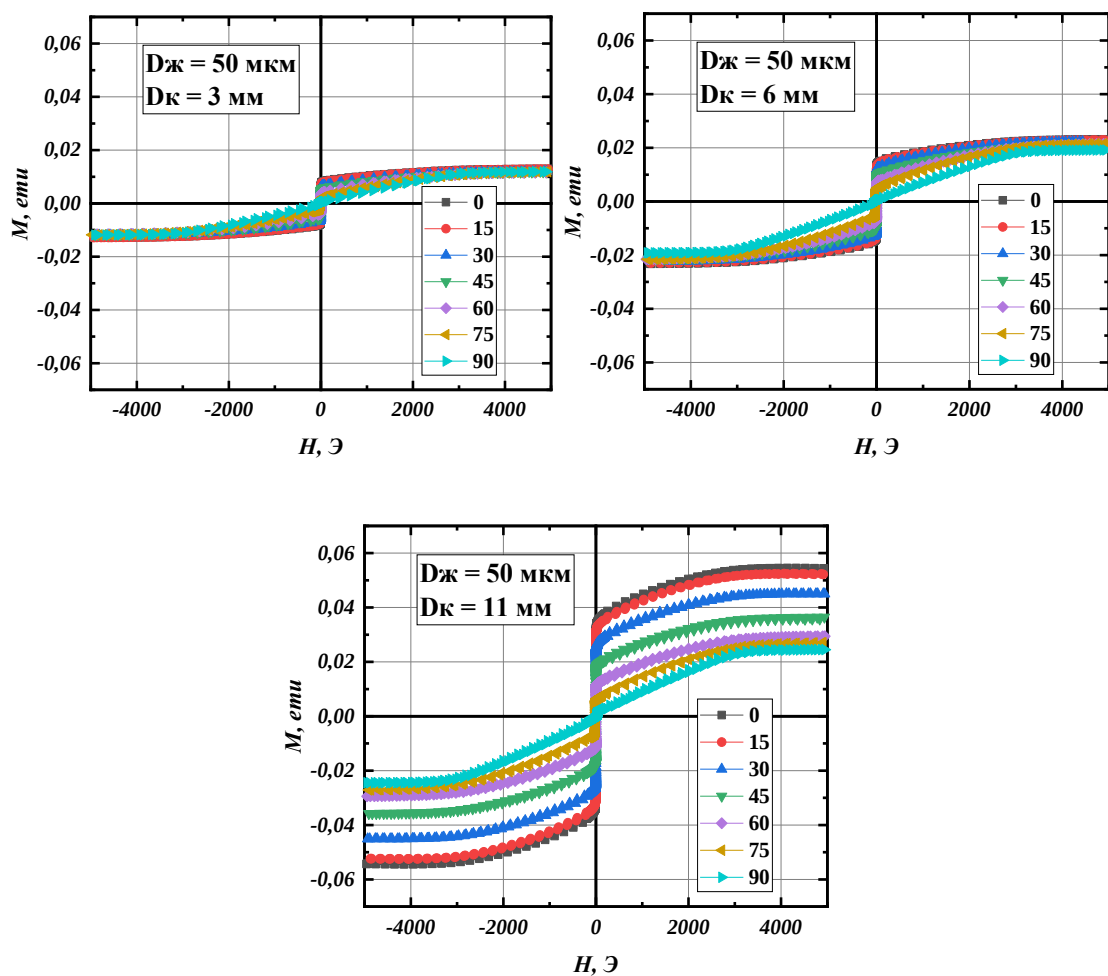


Рисунок 11. Магнитополевые зависимости аморфного микропровода $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$ диаметром 50 мкм, скрученного в кольца диаметра 3 мм (а), 6 мм (б), 11 мм (в), для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°).
Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

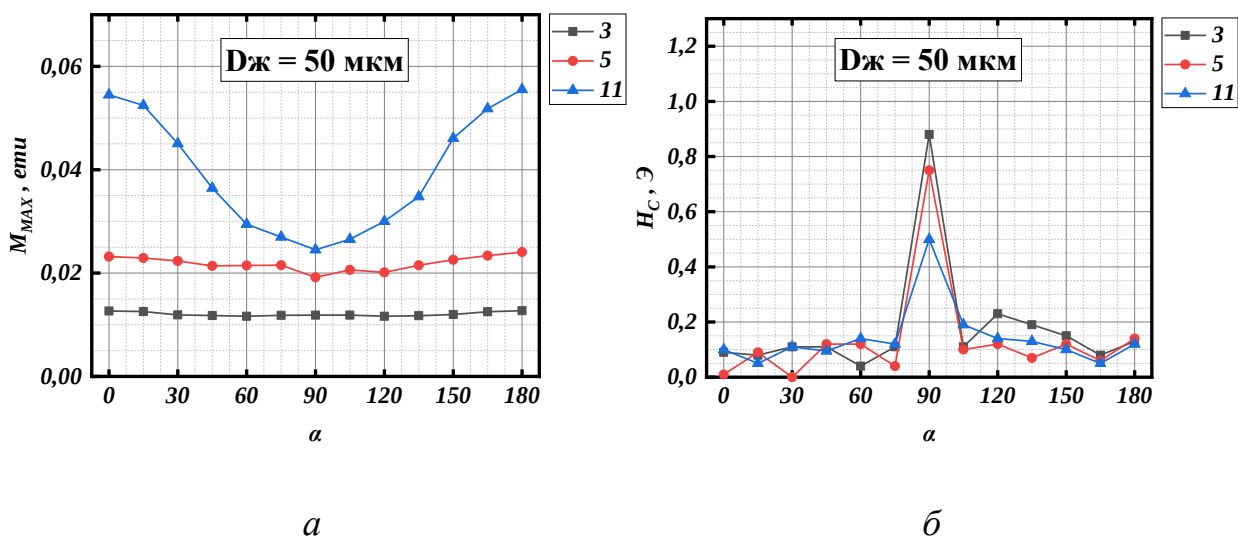


Рисунок 12. Угловые зависимости M_{max} (а) и H_c (б), наблюдаемые для аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ диаметром 50 мкм, скрученного в кольца диаметром 3 мм, 6 мм, 11 мм для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°). Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

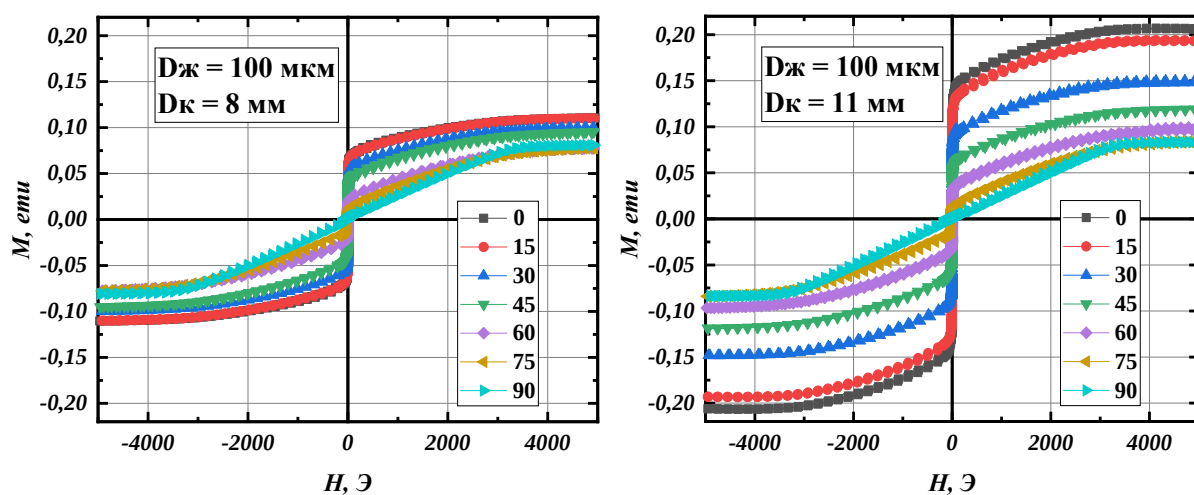


Рисунок 13. Магнитопольевые зависимости аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ диаметром 100 мкм, скрученного в кольца диаметра 8 мм (а), 11 мм (б), для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°). Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

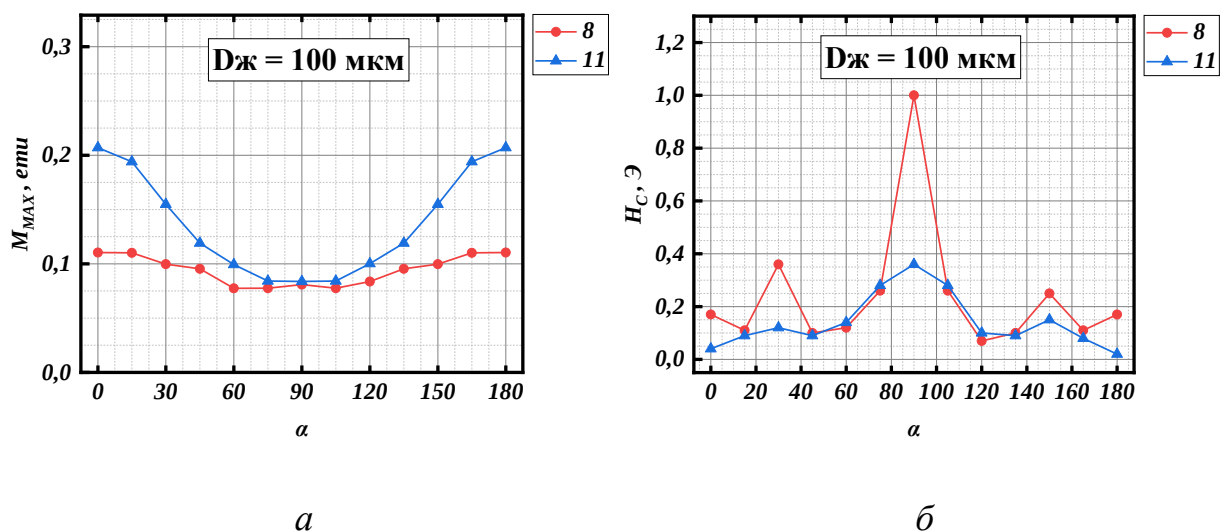


Рисунок 14. Угловые зависимости M_{MAX} (а) и H_C (б), наблюдаемые для аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ диаметром 100 мкм, скрученного в кольца диаметром 8 мм и 11 мм, для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°). Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

В данном случае также можно отметить воспроизводимость полученных результатов. В частности, для различных толщин микропроводов и диаметров получаемых из них колец наблюдаются идентичные формы магнитопольных зависимостей и зависимостей $M_{\text{MAX}}(\alpha)$, $H_C(\alpha)$.

На рисунке 15 представлена типичная закономерность изменения магнитных характеристик аморфных микропроводов, скрученных в кольца одинакового диаметра, в зависимости от изменения толщины микропровода. В качестве примера приведены измерения, полученные для колец диаметром $D_K = 11 \text{ мм}$ из аморфных микропроводов толщиной $D_{\text{ж}}$ 27, 50 и 100 мкм.

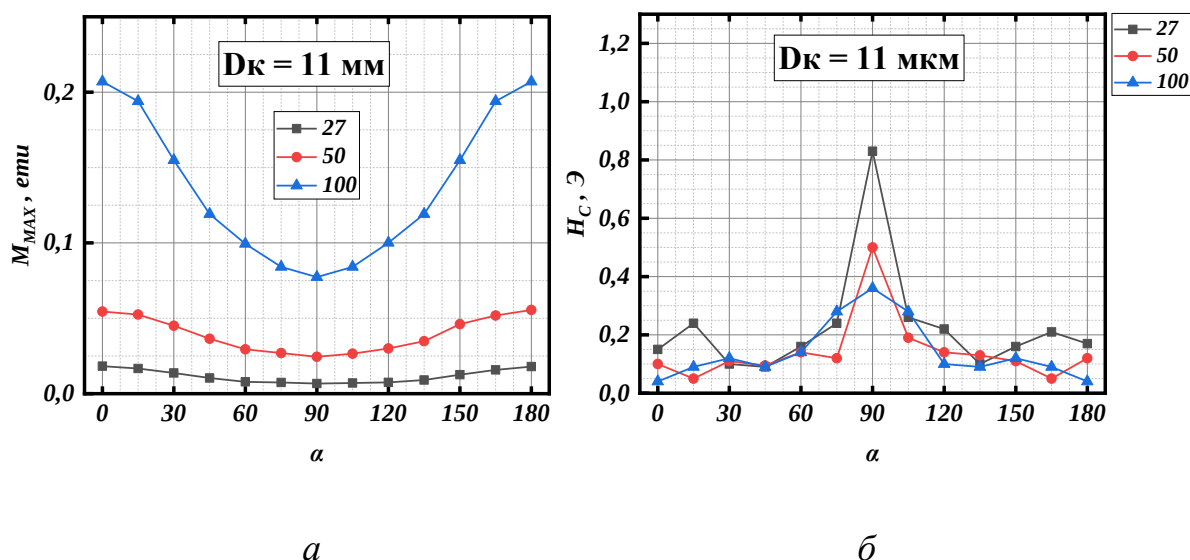


Рисунок 15. Угловые зависимости M_{MAX} (а) и H_C (б), наблюдаемые для аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ диаметром 27, 50 и 100 μm , скрученных в кольца диаметром 11 мм, для разных положений кольца относительно направления внешнего магнитного поля (от $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ с шагом 15°). Плоскость кольца ориентирована вертикально (конфигурация №1).

Было найдено, что при увеличении толщины микропровода, из которого скручивается кольцо, увеличивается магнитный момент в насыщении M_{MAX} и уменьшается величина пика угловой зависимости H_C .

Выше были представлены результаты исследования только для вертикальной ориентации плоскости колец относительно наблюдателя (конфигурация №1, рис. 6). Далее были изучены магнитные характеристики колец, ориентированных горизонтально (конфигурация №2, рис. 7).

Ранее было установлено, что для конфигурации №1 максимальное значение магнитного момента в насыщении M_{MAX} достигается при величине угла между плоскостью кольца и направлением магнитного поля $\alpha = 0^\circ$. Полученные в результате измерений колец в конфигурации №2 данные показывают, что при горизонтальной ориентации кольца M_{MAX} незначительно увеличивается по сравнению с значениями $M_{\text{MAX}} (\alpha = 0^\circ)$ в конфигурации №1. Графически результат представлен на рисунке 16.

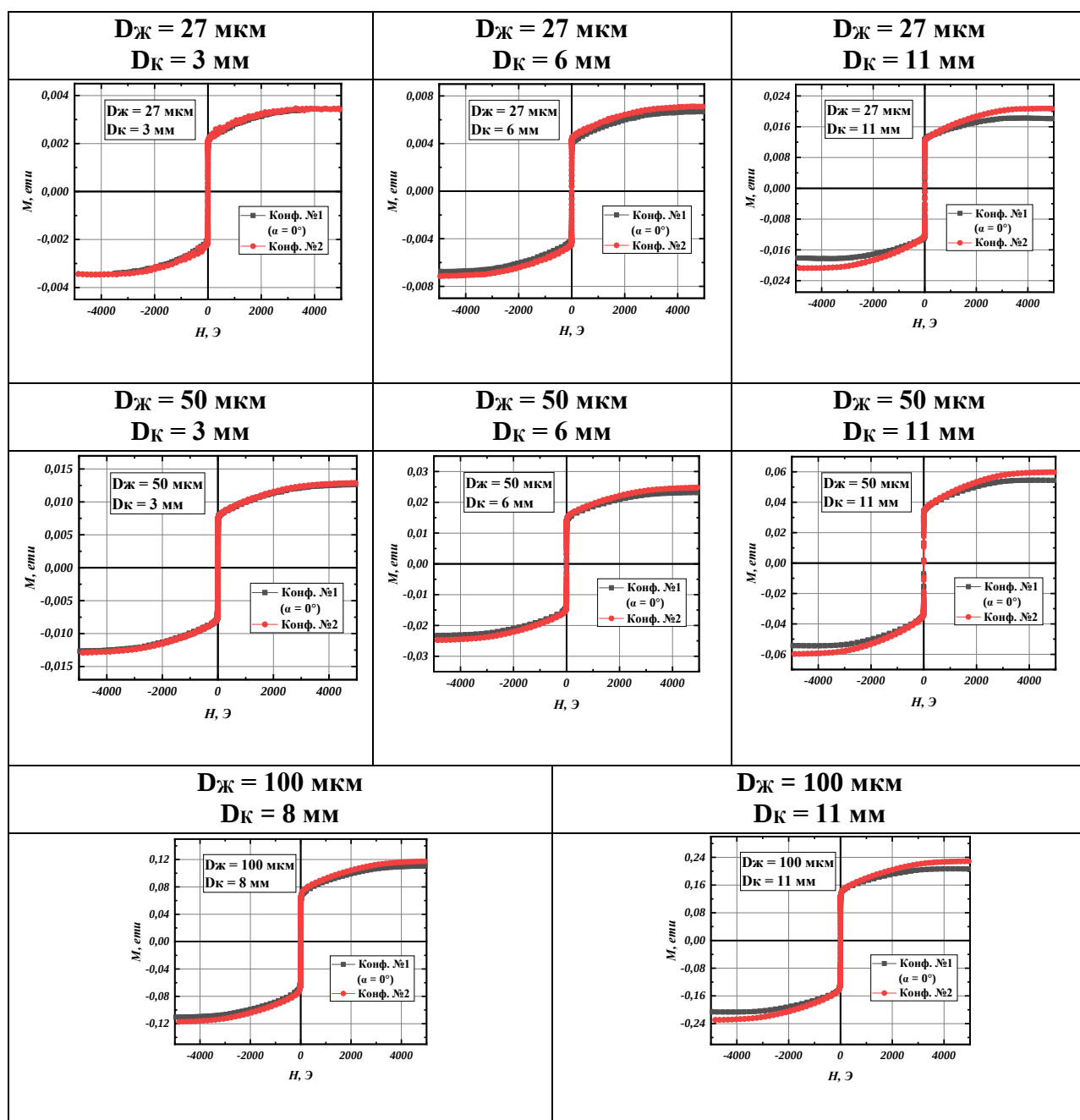


Рисунок 16. Магнитополевые зависимости аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, скрученных в кольца. На каждом графике приведено две зависимости: для кольца в конфигурации № 1 ($\alpha = 0^\circ$) – черным цветом, для кольца в конфигурации №2 – красным цветом.

Численные значения полученных магнитных характеристик для трех серий образцов представлены в таблице 2. Можно подчеркнуть, что коэрцитивная сила при горизонтальной ориентации кольца не сильно изменяется относительно вертикальной и также находится в пределах до 0.3 Э.

Таблица 2. Значения магнитных характеристик скрученных в кольца аморфных микропроводов $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$ различных диаметров колец и толщин микропроводов в зависимости от ориентации образца во внешнем магнитном поле.

Конф:	Конф.№1													Конф.№2
α:	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	—
	D_Ж = 27 мкм													
	D_К = 3 мм													
H_S, Э	3044	3354	3260	3655	3947	3827	3230	3726	4050	3513	3342	3401	2981	4255
H_C, Э	0,07	0,1	0,1	0,14	0,25	0,6	6,8	0,6	0,3	0,03	0,056	0,06	0,13	0,13
M_{MAX}, emu	0,00338	0,00343	0,00338	0,0033	0,00324	0,00302	0,0028	0,00291	0,0029	0,00354	0,00352	0,00338	0,00339	0,00347
	D_К = 6 мм													
H_S, Э	3952	3601	3621	3832	4289	4360	3750	4047	4139	4010	3759	3845	3905	3909
H_C, Э	0,08	0,1	0,1	0,05	0,1	0,75	2,1	0,37	0,1	0,13	0,18	0,1	0,1	0,21
M_{MAX}, emu	0,00669	0,0066	0,00675	0,00633	0,00613	0,0056	0,0056	0,00554	0,00613	0,00634	0,00642	0,00701	0,00674	0,00712
	D_К = 11 мм													
H_S, Э	2855	2931	3001	3338	3842	3959	4751	3866	3757	3321	3012	2848	2734	3406
H_C, Э	0,15	0,24	0,1	0,09	0,16	0,24	0,83	0,26	0,22	0,1	0,16	0,21	0,17	0,26
M_{MAX}, emu	0,01828	0,01673	0,01371	0,0104	0,00783	0,0074	0,00669	0,0071	0,00752	0,00905	0,01256	0,01581	0,01794	0,02074
	D_Ж = 50 мкм													
	D_К = 3 мм													
H_S, Э	3734	4112	4217	4265	4370	4484	3349	4484	4271	4349	4201	4117	3892	4084
H_C, Э	0,09	0,08	0,11	0,11	0,04	0,11	0,88	0,11	0,23	0,19	0,15	0,08	0,13	0,12
M_{MAX}, emu	0,01266	0,01256	0,01191	0,01178	0,01165	0,01183	0,01187	0,01186	0,01164	0,01174	0,01198	0,01252	0,01271	0,01288
	D_К = 6 мм													
H_S, Э	3658	3649	3627	3921	4137	3978	3674	4255	4290	4132	3674	3732	3705	3905
H_C, Э	0,01	0,09	0,01	0,12	0,12	0,04	0,75	0,1	0,12	0,07	0,12	0,06	0,14	0,05
M_{MAX}, emu	0,02319	0,02291	0,02234	0,02139	0,02148	0,02153	0,01917	0,02062	0,02013	0,02151	0,02259	0,02338	0,02406	0,02479
	D_К = 11 мм													
H_S, Э	2969	3051	3212	3304	3777	3976	3655	4140	3777	3645	3212	3051	3059	3566
H_C, Э	0,1	0,05	0,11	0,095	0,14	0,12	0,5	0,19	0,14	0,13	0,11	0,05	0,12	0,1
M_{MAX}, emu	0,0545	0,05246	0,04507	0,03644	0,02945	0,02697	0,0245	0,02655	0,03001	0,03478	0,04609	0,05182	0,05553	0,05977
	D_Ж = 100 мкм													
	D_К = 8 мм													
H_S, Э	3741	3760	3923	4557	4380	4395	3896	4395	4888	4557	3923	3922	3741	3927
H_C, Э	0,17	0,11	0,36	0,1	0,12	0,26	1	0,25	0,07	0,1	0,25	0,11	0,17	0,2
M_{MAX}, emu	0,11041	0,11009	0,09975	0,09539	0,07746	0,07756	0,08088	0,07756	0,08366	0,09539	0,09975	0,11009	0,11041	0,11741
	D_К = 11 мм													
H_S, Э	3059	3379	3320	3743	3746	4674	4059	4678	3946	3748	3331	3382	3051	3712
H_C, Э	0,04	0,09	0,12	0,09	0,14	0,26	0,36	0,28	0,11	0,1	0,14	0,09	0,03	0,13
M_{MAX}, emu	0,20699	0,19399	0,15482	0,11911	0,09937	0,08414	0,07735	0,08414	0,10013	0,11911	0,15482	0,19399	0,20699	0,22919

3.2 Сравнительный анализ магнитных характеристик скрученных в кольца и прямых аморфных микропроводов

Для того, чтобы проанализировать, как изменяются характеристики аморфного микропровода при скручивании его в кольцо, были исследованы прямые микропровода аналогичной длины.

Прямые микропровода измерялись в трех положениях в зависимости от направления внешнего магнитного поля.

- Положение №1: провод параллелен полю и горизонтален.
- Положение №2: провод перпендикулярен полю и горизонтален.
- Положение №3: провод перпендикулярен полю и вертикален.

Полученные результаты рассмотрены на примере второй серии колец с диаметром жилы микропровода 50 мкм. Кольцам из такого микропровода диаметрами 3 мм и 6 мм соответствовали прямые микропровода длиной 9.5 мм и 18 мм соответственно. Для сравнения приводятся уже рассмотренные выше данные для скрученных в кольца микропроводов в положениях «конфигурация №1» $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$, а также «конфигурация №2».

Таблица 3. Значения H_S , H_C и M_{MAX} , наблюдаемые для прямых и скрученных в кольца аморфных микропроводов $Co_{69}Fe_4Cr_4Si_{12}B_{11}$ диаметром 50 мкм.

D _ж = 50 мкм. L = 9.5 мм (в соответствие кольцу диаметром D _к = 3 мм)						
	Прямой микропровод			Свернутый в кольцо микропровод		
	Полож. №1	Полож. №2	Полож. №3	Конф. №1 $\alpha = 0^\circ$	Конф. №1 $\alpha = 90^\circ$	Конф. №2
H _S , Э	132	3907	4093	3734	3349	4084
H _C , Э	0,07	0,6	6,3	0,09	0,88	0,12
M _{MAX} , emu	0,01405	0,00963	0,00872	0,01266	0,01187	0,01288
D _ж = 50 мкм. L = 18 мм (в соответствие кольцу диаметром D _к = 6 мм)						
H _S , Э	269	3473	3146	3658	3674	3905
H _C , Э	0,07	0,5	6,5	0,01	0,75	0,05
M _{MAX} , emu	0,04524	0,01471	0,01050	0,02319	0,01917	0,02479

Анализ результатов показывает следующее.

Во-первых, обнаружено возрастание величины поля насыщения H_s при скручивании микропроводов в кольца. В направлении легкой оси прямой микропровод насыщается в поле порядка 10^2 Э. Для микропровода, свернутого в кольцо, не обнаружено положений с полем насыщения менее 2×10^3 Э.

Во-вторых, установлено изменение величины M_{MAX} . Максимальная величина сигнала от прямого микропровода диаметром $D_{ж} = 50$ мкм и длины $L = 9.5$ мм достигается при намагничивании микропровода в направлении его легкой оси и имеет значение 14.05 мему. При измерении такого же микропровода, но свернутого в кольцо M_{MAX} принимает значения 12.66 мему, 11.87 мему и 12.88 мему (при конфигурации №1 и $\alpha = 0^\circ$, при конфигурации №1 и $\alpha = 90^\circ$, при конфигурации №2 соответственно). Таким образом, скручивание микропровода в кольцо уменьшает максимальную величину сигнала M_{MAX} , которая может быть получена для данного образца.

Однако, одновременно с этим, величина M_{MAX} для положения №3 прямого микропровода равна 8.72 мему. При любом из предложенных положений кольца его магнитный момент в насыщении не достигает таких низких значений. Аналогичные результаты были получены и для других исследуемых образцов. Этот факт может быть полезен при практическом применении аморфных микропроводов, для которых важна высокая величина сигнала для возможности его регистрации.

На рисунке 17 представлены наблюдаемые магнитополевые зависимости для прямого (а) и скрученного в кольцо (б) микропровода диаметром жилы $D_{ж} = 50$ мкм и длиной $L = 9.5$ мм. В таком случае диаметр кольца равен $D_K = 3$ мм.

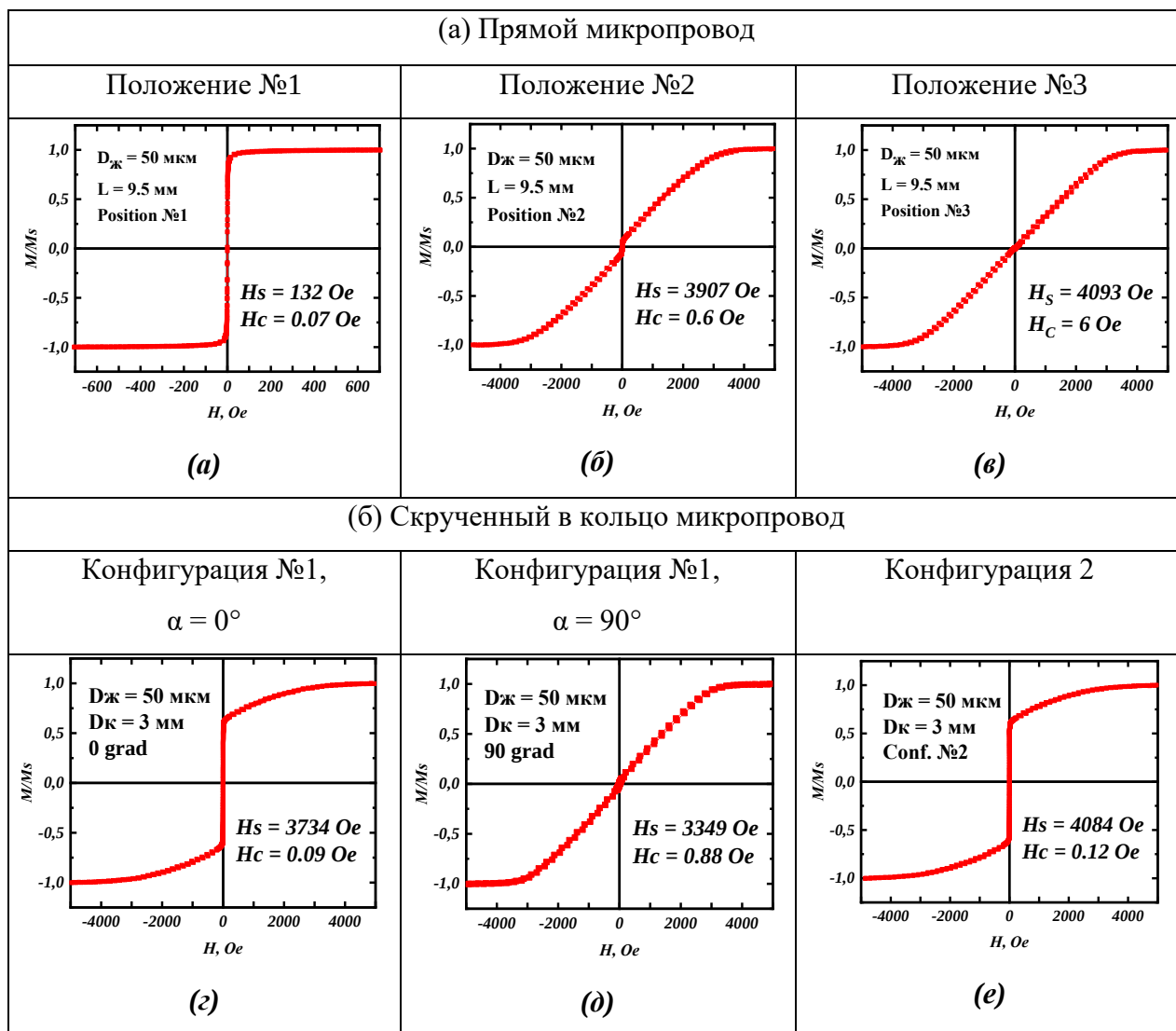


Рисунок 17. Магнитополевые зависимости для прямого (а) и скрученного в кольцо (б) аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ диаметром жилы 50 мкм длиной $L = 9.5 \text{ мм}$ (соответствующий диаметр кольца $D_{\text{К}} = 3 \text{ мм}$).

Анализ вышеприведенных данных показывает, что случай намагничивания прямого микропровода (а), а также (г) и (е) кольца сопровождаются петлями с крутым наклоном, однако в случае измерения колец форма петли гистерезиса не такая резкая, как для прямого микропровода.

Положения (б) и (в) прямого микропровода, а также (д) кольца сопровождаются схожими диагональными петлями с характерным перегибом вблизи нуля.

Таким образом, в случае изменений положения образца в магнитном поле скручивание микропроводов в кольца уменьшает количество положений, соответствующих трудной оси намагничивания. Этот факт может быть полезен при практическом применении аморфных микропроводов, для которых важно резкое изменение сигнала магнитного момента при его перемагничивании.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Изменение ориентации скрученных в кольца аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ относительно направления намагничивающего поля влияет на значения коэрцитивной силы, поля насыщения и магнитного момента колец в состоянии насыщения.
2. Поворот плоскости кольца от параллельного полю положения к перпендикулярному при его вертикальной ориентации сопровождается уменьшением угла наклона петли гистерезиса и переходом к диагональной форме петли, уменьшением M_{MAX} , а также резким увеличением H_C .
3. Переход от вертикальной ориентации кольца, параллельной направлению внешнего магнитного поля, к горизонтальной ориентации сопровождается увеличением M_{MAX} , а также сохранением формы петли гистерезиса.
4. Увеличение диаметра кольца или толщины аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$, скрученного в кольцо, обуславливает уменьшение пика угловой зависимости коэрцитивной силы H_C и увеличение M_{MAX} .
5. Скручивание прямого аморфного микропровода $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ в кольцо сопровождается снижением влияния трудной оси на его магнитные свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучены магнитные характеристики скрученных в кольца аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$.

В ходе исследования были проанализированы закономерности их поведения в зависимости от геометрических размеров колец и их ориентации относительно направления внешнего магнитного поля.

Был проведен сравнительный анализ поведения магнитных характеристик скрученных в кольца аморфных микропроводов $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ и аналогичных по длине и составу прямых микропроводов.

Обнаруженные особенности магнитного поведения колец из аморфных микропроводов могут быть полезны при их использовании в практических приложениях, в частности, в качестве идентификационных меток противокражных систем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Е. Е. Шалыгина, В. Д. Рубцов, А. Н. Шалыгин, В. В. Молоканов, Т. Р. Чуева, П. П. Умнов, Н. В. Умнова, Д. А. Петров. Особенности структурных и магнитных характеристик аморфных «толстых» микропроводов, обогащенных кобальтом // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ. – 2019. – Т. 83. – № 7. – С. 888–890.
- [2] Т. Р. Чуева, В. В. Молоканов, В. Т. Заболотный, П. П. Умнов, Н. В. Умнова, Е. Е. Шалыгина, А. Н. Шалыгин, А. М. Харламова. Составы, получение, структура и свойства «толстых» ферромагнитных аморфных микропроводов // Физика и химия обработки материалов. – 2014. – №2. – С. 48-55.
- [3] В. В. Молоканов, А. В. Крутилин, Н. А. Палий, М. А. Каплан, П. П. Умнов, Т. Р. Чуева. Исследование механических, электромагнитных и трибологических свойств микроспиралей из аморфных и кристаллических металлических материалов // Деформация и разрушение материалов. – 2020. – №12. – С. 8-11.
- [4] Л. Г. Устименко, Д. Н. Владимиров, В. С. Ларин, М. С. Сергеев, Е. Н. Хандогина, К. А. Черемисина. Устройство для идентификации и кодирования объекта // Патент ОАО «Центральное конструкторское бюро специальных радиоматериалов». – № RU 83854 U1. – 2009.
- [5] Ulitovski A.V., Maianski I.M., Avramenco A.I. Method of continuous casting of glass coated microwire // Patent № 128427 (USSR), Bulletin, 10 (1960) 14.
- [6] А. Н. Шалыгин. Машиночитаемая идентификационная метка на основе аморфного микропровода для бумажного листового материала на целлюлозной основе // Патент № RU 2725755C1. – 2020.
- [7] Inoue A., Makino A., Mazushima T. Ferromagnetic bulk glassy alloys // J. Magn. Magn. Mater. – 215-216 (2000) 246-252.

- [8] Дорофеева Е.А., Проношин А.Ф. О формировании магнитной анизотропии и доменной структуры в аморфных металлических сплавах // ФММ, 54 (1982) 946-952.
- [9] Sato Turtell R., Holzer D., Grossinger R., Sassik H., Pillmayer N. Low-temperature hardening of coercivity of amorphous alloys // J. Magn. Magn. Mater., 226-230 (2001) 1496-1497.
- [10] Wright J.G. Amorphous transition metal films // IEEE Trans. Magn., 12 (1976) 95-99.
- [11] Tsuei C.C., Lilienthal H. Magnetization distribution in amorphous ferromagnet // Phys. Rev., B 13 (1976) 4899-4901.
- [12] Kronmuller H. Magnetic properties of amorphous ferromagnetic alloys. // J. Magn. Magn. Mater., 13 (1979) 53-65.
- [13] Ulitovski A.V., Avernin N.M. Method of fabrication of metallic microwire. // Patent № 161325 (USSR), Bulletin, 7 (1964) 14.
- [14] Умнов П.П., Молоканов В.В., Шалимов Ю.С., Умнова Н.В., Чуева Т.Р., Заболотный В.Т. Особенности получения аморфного провода методом Улитовского-Тейлора с использованием варианта непрерывного процесса литья // Перспективные материалы, 2 (2010) 87.
- [15] Vazquez M., Chen D.-X. The magnetization reversal process in amorphous wires. IEEE Trans. Magn., 31 (1995) 1229-1238.
- [16] Panina L.V., Katoh H., Mizutani M., Mohri K., Humphry F.B. Domain collapse in magnetostrictive wires // IEEE Trans. Magn., 28 (1992) 2922-2924.
- [17] Vazquez M., Gomez-Polo C., Chen D.-X., Hernando A. Magnetic bistability of amorphous wires and sensor applications // J. Magn. Magn. Mater., 130 (1994) 907-912.

- [18] Nderu J.N., Shinokawa Y., Yamasaki J., Humphrey F.B., Ogasawara I. Dependence of magnetic properties of $(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{78}\text{Si}_7\text{B}_{15}$ amorphous wire on the diameter // IEEE Trans. Magn., 32 (1996) 4878-4880.
- [19] Yamasaki J., Humphrey F.B., Morhi K., Kawamura H., Takamure H. Large Barkhausen discontinuities in Co-based amorphous wires with negative magnetostriction // J. Appl. Phys., 63 (1988) 3949-3951.
- [20] Usov N., Antonov A., Dykhne A., Lagar'kov A. Possible origin for the bamboo domain structure in Co-rich amorphous wires // J. Magn. Magn. Mater., 174 (1997) 127-132.
- [21] Nderu N., Yamasaki J., Humphrey F.B. Switching mechanism in Co-based amorphous wire // J. Appl. Phys., 81 (1997) 4036-4038.
- [22] Клаус Финкенцеллер. RFID-технологии. Справочное пособие; пер. с нем. Сойунханова Н.М. // Додэка-XXI, 2010. — 496 с.
- [23] Н. С. Перов, В. В. Родионова, М. В. Прудникова и др. Вибрационный магнитометр. Специальный физический практикум // Физический факультет МГУ. Типография Флай-Арт Москва, 2016. — 31 с.

Автор выражает благодарность научному руководителю, Шалыгиной Елене Евгеньевне, за всестороннюю поддержку и неоценимую помощь как во время выполнения выпускной работы, так и за всё время обучения на кафедре.

Также благодарю всех сотрудников кафедры магнетизма за их профессионализм, понимание и неравнодушное отношение к студентам.