

**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
д.ф.-м.н., проф. ИФМНиИТ

_____ В.В. Савин

" ____ " _____ 2020 г.

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

_____ А.А. Шпилевой

" ____ " _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Тема: «Исследование динамики движения доменной стенки в бистабильном ферромагнитном микропроводе»

Направление подготовки: 16.03.01 «Техническая физика»

Квалификация (степень): **бакалавр**

ВКР защищена на оценку:

Выполнил: студент 4 курса

_____ В.В. Савин

Руководитель: к.ф.-м.н.,
Зав. лабораторией новых магнитных материалов

_____ В.В. Родионова

Консультант: д.ф.-м.н.,
профессор НИТУ МИСИС,

ВМУ ИФМНиИТ БФУ им. И. Канта

_____ Л.В. Панина

Калининград, 2020

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Магнитные свойства аморфных ферромагнитных микропроводов.....	7
1.1. Изготовление аморфных ферромагнитных микропроводов в стеклянной оболочке методом Улитовского-Тейлора.....	7
1.2. Микромагнитная структура аморфных микропроводов.....	12
1.3. Кривая намагничивания ферромагнетика. Петля гистерезиса.....	17
1.4. Скачок Баркгаузена. Магнитная бистабильность.....	22
1.5. Типы доменных границ. Динамика движения доменной границы типа head-to-head в бистабильном микропроводе	25
Глава 2. Методика эксперимента, исследуемые образцы.....	30
2.1. Исследуемые образцы.....	30
2.2. Метод Сикстуса-Тонкса	30
2.3. Характеристики процесса перемагничивания бистабильного микропровода. Скорость, ускорение, мобильность доменной границы	35
2.4. Модернизация и сборка измерительных модулей.....	38
Глава 3. Особенности динамики движения доменной стенки типа head-to-head в микропроводах из сплава на основе Fe.....	47
3.1. Полевые зависимости скорости движения доменной границы, полученные на различных измерительных модулях.....	47
3.2. Влияние поперечного магнитного поля на скорость движения доменной границы	60
Основные результаты.....	66
Список использованной литературы.....	68

Введение

Активный научный и прикладной интерес к аморфным ферромагнитным микропроводам в последние несколько десятилетий связан, прежде всего, с проявляемыми в них актуальными для практического использования магнитными эффектами: магнитная бистабильность, высокая и контролируемая скорость перемагничивания, эффект магнитоимпеданса, а также с их малыми геометрическими размерами [2, 23]. Так, например, благодаря своим размерам, микропровода являются крайне перспективным материалом при создании и разработке сенсорных устройств [20]. С другой стороны, микронные геометрические размеры и аморфное состояние микропровода не позволяют подробно изучить процесс его перемагничивания: особенности микромагнитной структуры и ее изменение во внешнем магнитном поле.

В настоящее время большое внимание уделяется уникальным свойствам ферромагнитных бистабильных микропроводов в стеклянной оболочке, изготовленных методом Улитовского-Тейлора [15, 18]. Известно, что процесс перемагничивания этих микропроводов происходит посредством быстрого распространения доменной стенки типа head-to-head вдоль оси микропровода [18]. Размеры и состав металлической жилы, состоящей из сплавов на основе d переходных металлов четвертого периода (Fe, Co, Ni), толщина и состав внешней оболочки, состоящей из стекла (Pyrex и другие), а так же отношение их поперечных размеров $p = d/D$ (d – диаметр металлической жилы микропровода, D – диаметр микропровода в стеклянной оболочке), определяют микромагнитную структуру и, как следствие, магнитные свойства микропровода (например, параметры петли гистерезиса, наличие эффекта бистабильности). Такие провода уже нашли своё применение во многих приложениях: в роли чувствительных сенсоров [20, 21], систем кодирования информации, магнитных носителей и магнитной памяти, а также в поглощающих и/или экранирующих покрытиях, в роли сердечников трансформаторов, и других деталей электронных устройств [2]. Более

подробное изучение процесса перемагничивания аморфных ферромагнитных бистабильных микропроводов позволит повысить эффективность контроля этого процесса, что, в свою очередь, может привести к появлению новых перспективных приложений, а также к улучшению качества уже имеющихся. Так, например, знание о характере движения, форме и размерах доменной границы, позволит намного лучше понимать процесс перемагничивания ферромагнитных микропроводов, и, как следствие, создавать материалы с заданными свойствами, которые будут отвечать требованиям тех или иных приложений.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование динамики движения доменной стенки в бистабильном ферромагнитном микропроводе, посредством быстрого распространения которой происходит перемагничивание микропровода. В связи с чем, были поставлены следующие задачи:

- модифицировать приёмный узел установки для измерения скорости движения доменной границы в бистабильном микропроводе методом Сикстуса-Тонкса для реализации возможности определения типа движения доменной границы (равномерное, ускоренное, замедленное), а также детектирования перехода микропровода в мультидоменное состояние;
- измерить полевые зависимости скорости движения доменной границы с использованием разработанных и собранных приемных модулей, и установить тип движения доменной границы вдоль оси микропровода в процессе его перемагничивания для серии микропроводов с металлической жилой из различных сплавов на основе Fe;
- исследовать влияние магнитного поля, приложенного перпендикулярно оси провода, на движение доменной границы.

Апробация результатов

Результаты данной дипломной работы были представлены на международной конференции III International Baltic Conference on Magnetism: focus on nanobiomedicine and smart materials (IBCM), прошедшей в период с 18 по 22 августа 2019 года в Светлогорске, Калининградская обл. Подготовлены тезисы и постер на тему «Changes of dynamics parameters during fast head-to-head domain wall propagation».

Личный вклад автора:

Все результаты, представленные в работе, получены и обработаны лично автором, анализ проводился совместно с научным руководителем. Во время стажировки в лабораторию Магнетизма (Университет Страны Басков, Сан-Себастьян, Испания), автором был собран намагничивающий соленоид, а также модифицированы и собраны три приёмных модуля для установки по измерению скорости движения доменных границ методом Сикстуса-Тонкса. Результаты измерения с использованием собранных приёмных модулей легли в основу выпускной квалификационной работы автора. Кроме того, эти модули сопряжены с установками лаборатории в БФУ им. И. Канта: они послужат для выполнения автором работ в рамках магистерской диссертации, а также для проведения исследований другими студентами и сотрудниками лаборатории.

Благодарности:

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Родионовой Валерии Викторовне; а также заведующему лабораторией Магнетизма (Университет Страны Басков, Сан-Себастьян, Испания) Аркадию Жукову за организацию стажировки в лаборатории Магнетизма (Университет Страны Басков, Сан-Себастьян, Испания) в период с 23 октября 2019 г. по 17 декабря 2019 г; профессору НИТУ МИСИС Паниной

Ларисе Владимировне как консультанту по теме выпускной квалификационной работы.

Во время прохождения стажировки, во многом благодаря члену лаборатории Аркадия Жукова - Михаилу Ипатову, автор провел множество экспериментов, значительная часть которых представлена в данной работе, а также улучшил свои навыки работы с контрольно-измерительными приборами.

Глава 1. Магнитные свойства аморфных ферромагнитных микропроводов

1.1. Изготовление аморфных ферромагнитных микропроводов в стеклянной оболочке методом Улитовского-Тейлора

В настоящее время используется несколько методов изготовления микропроводов. Сам микропровод может производиться как со стеклянной изоляцией, так и без неё. Все способы изготовления микропровода, существующие в настоящий момент, представляют собой быстрое вытягивание тонкой нити из расплавленного металла с дальнейшим быстрым охлаждением; разница между ними заключается только в скорости и способе вытягивания, а также скорости охлаждения провода. Делается это для того, чтобы кристаллическая структура не успела сформироваться, т.е. чтобы микропровод получился аморфным.

Аморфный ферромагнитный микропровод со стеклянной изоляцией представляет собой тонкий провод с аморфной металлической жилой, покрытый стеклянной оболочкой. Диаметр жилы принимает значения от 0,8 мкм до 30 мкм, а диаметр микропровода в стеклянном покрытии – от 2 мкм до 15 мкм [2]. Наличие или отсутствие стеклянной оболочки, а также ее толщина, сильно сказываются на внутренних напряжениях в микропроводе и, как следствие, на его магнитных свойствах.

Методика для изготовления микропроводов в стеклянной оболочке появилась в 1924 году и была разработана Г.Ф. Тейлором [24]. А позже, в 1948 году, эта методика была доработана А.В. Улитовским. Сам процесс формирования микропровода методом Улитовского-Тейлора изображен схематически на рис. 1.1-1.

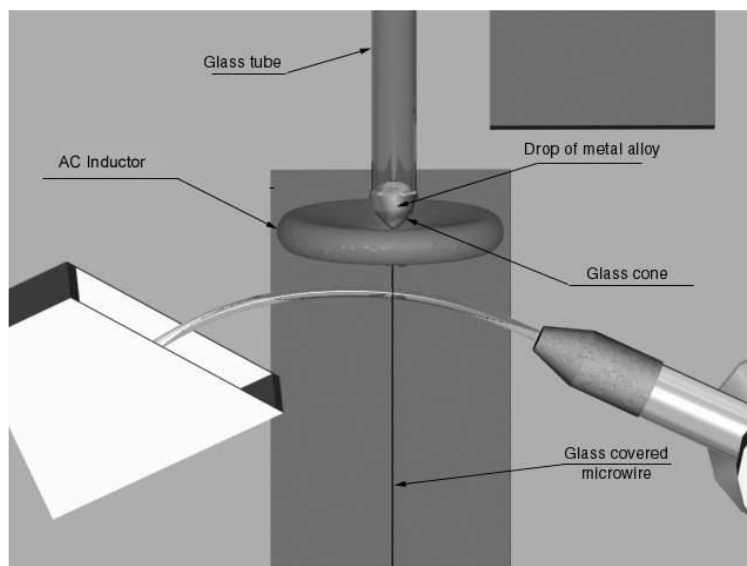


рис. 1.1-1. Схема изготовления микропровода методом Улитовского-Тейлора [2].

Несколько грамм металла или сплава металлов помещается в стеклянную трубку и вносится в поле высокочастотного индуктора. Под действием электромагнитного поля происходит разогрев и последующий расплав металла, а затем формирование из него капли. Часть стеклянной трубки, примыкающая к расплавленному металлу, размягчается, и из стекла формируется оболочка, обволакивающая каплю. Из размягченного стекла вытягивается тонкая стеклянная трубочка, которая за счёт капиллярного эффекта утягивает металл внутрь себя, а затем наматывается на бабину приёмного устройства. В процессе намотки микропровод может дополнительно охлаждаться. Регулируя скорость вытяжки, можно регулировать толщину микропровода: диаметр металлической жилы и толщину стеклянного покрытия. Охлаждение может осуществляться методом пропускания микропровода через сосуд с водой или маслом или обливанием вытягиваемого микропровода струёй воды. Микропровод можно получать «капельным методом» или «методом непрерывного литья». Капельный метод отличается от непрерывного тем, что весь процесс литья ограничен количеством металла одной капли. После уменьшения объёма капли до критической величины, процесс необходимо останавливать и выполнять операцию заправки металлом и формирования капли. При непрерывном

процессе литья стержень металла контактирует с каплей и постоянно дополняет израсходованный металл.

Диаметр металлической жилы микропровода и толщина стеклянной оболочки меняются в процессе вытягивания микропровода из расплава. По мере вытягивания микропровода, масса стержня, из которого образуется металлическая жила, уменьшается, значит и сила тяжести, действующая со стороны стержня на каплю расплава, тоже уменьшается. Поэтому уменьшается и диаметр металлической жилы. На рисунке 1.1-2 изображены контрольные измерения диаметра металлической жилы и диаметра всего микропровода в стеклянной оболочке по длине микропровода. Доказано, что самое сильное влияние на геометрические параметры микропровода оказывают свойства стекла [2].

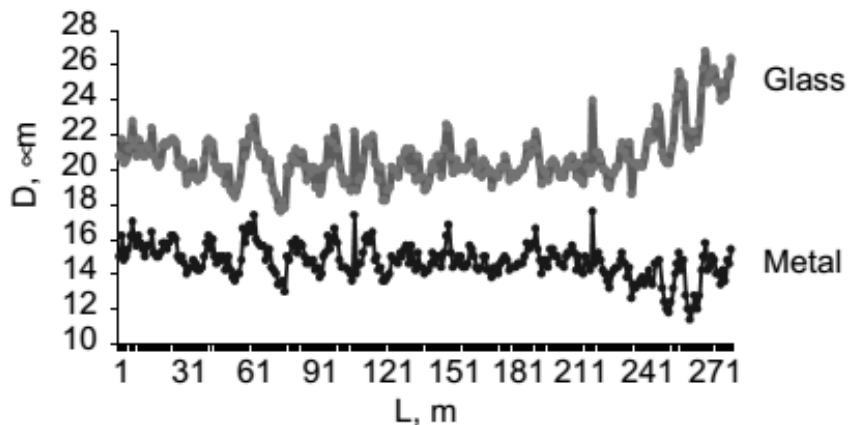


рис. 1.1-2. График контрольных измерений диаметра металлической жилы и диаметра микропровода в стеклянной оболочке по длине микропровода [25].

Как уже упоминалось выше, для получения аморфной структуры металлической жилы необходима быстрая скорость охлаждения вытягиваемого микропровода. В технологии изготовления методом Улитовского-Тейлора применяются высокие скорости охлаждения провода — 10^5 - 10^7 К/с. Однако, совсем недавно были проведены эксперименты, в ходе которых было обнаружено, что для получения аморфной структуры микропровода необязательно прибегать к большим скоростям охлаждения. Минимальная скорость вытяжки, необходимая для получения аморфной структуры,

составляет около 4 м/с [14]. Возможность варьировать скорость вытяжки, температуру расплава и скорость охлаждения микропровода позволяет получать большое число разнообразных серий микропроводов с существенно отличающимися магнитными свойствами.

Метод Улитовского-Тейлора позволяет получать километры непрерывного микропровода со скоростью вытяжки от 100 до 500 метров в минуту. Ниже представлена СЭМ-фотография микропровода в стеклянной оболочке, изготовленного по методу Улитовского-Тейлора (рис. 1.1-3).

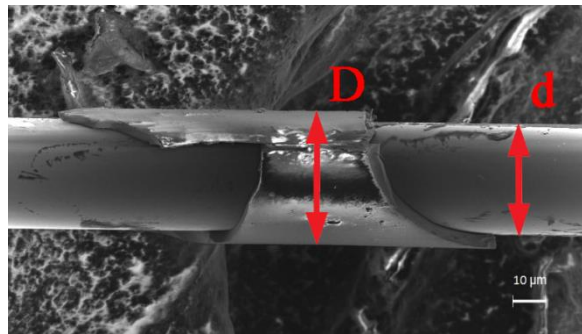


рис. 1.1.-3. СЭМ-изображение микропровода (d – диаметр металлической жилы, D – диаметр микропровода в стеклянной оболочке).

Стоит отметить, что скорость вытяжки микропровода из расплава имеет верхнее предельное значение, определяемое условиями процесса изготовления этого микропровода [2]. Так, максимальная скорость вытяжки определяется следующим выражением:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{6F_a}{\pi\rho(R^2+r^2+Rr)}} \quad (1.1)$$

где:

F_a – сила сцепления поверхностей металла и стекла;

ρ – плотность металла;

R – радиус провода в стеклянной оболочке;

r – радиус металлической жилы.

Из выражения следует, что максимальная скорость вытяжки прямо пропорциональна силам сцепления между металлом и стеклом и обратно

пропорциональная плотности металла, из которого состоит жила, а также радиусу металлической жилы и радиусу микропровода в стеклянной оболочке.

В свою очередь, геометрические характеристики аморфного микропровода зависят от физических свойств металла и стекла, диаметра стеклянной трубки, из которой вытягивается микропровод, а также параметров нагревающего индуктора (например, рабочая частота и область нагрева). Было доказано, что наибольший эффект на геометрические параметры аморфного микропровода оказывают физические свойства стекла, из которого состоит стеклянная оболочка [2].

Радиус микропровода можно приближенно рассчитать с помощью следующего выражения:

$$r_m = \frac{0,9}{d} \left(\frac{\eta^5}{\sigma^2 v_\lambda} \right)^{\frac{4}{3}} f(\eta, \sigma, v, d), \quad (1.2)$$

где:

r_m – радиус микропровода;

σ – поверхностное натяжение;

d – плотность металла;

η – константа, определяемая из эксперимента;

v_λ – скорость вытягивания микропровода;

$f(\eta, \sigma, v, d)$ – параметр, который определяется экспериментально.

Радиус микропровода также имеет верхнее и нижнее предельные значения, которые, в свою очередь, определяются не только параметрами стекла и металла, из которого изготавливается металлическая жила, но и технологическими параметрами процесса изготовления микропровода: скоростью вытягивания микропровода, способом и скоростью охлаждения, рабочей температурой индуктора и др. [2].

При исследовании ферромагнитных микропроводов стоит помнить о возможных флуктуациях величины радиуса металлической жилы и толщины стеклянной оболочки. Так, обычно диаметр металлической жилы больше в

самом начале намотки, чем при ее окончании. Величина флуктуаций может достигать порядка десяти процентов.

1.2. Микромагнитная структура аморфных микропроводов

После вытягивания микропровода из расплава методом Улитовского-Тейлора в нём остаются так называемые «остаточные» упругие закалочные напряжения, определяемые самим способом изготовления микропровода и возникающие из-за неравновесности процесса его закалки, а также упругие напряжения, возникающие в результате различия коэффициентов теплового расширения металлического расплава, формирующего жилу, и стекла, которое образует оболочку микропровода [23]. Остаточные напряжения можно значительно уменьшить с помощью отжига [19]. Важно отметить, что температура отжига не должна превышать температуру кристаллизации металлической жилы, в противном случае микропровод потеряет аморфную структуру. Эти напряжения значительным образом влияют на микромагнитную структуру аморфного провода.

Микромагнитная структура – расположение и организация магнитных доменов внутри ферромагнетика, определяемая минимумом полной энергии этого ферромагнетика. В свою очередь, ферромагнитные домены – макроскопические области ферромагнетика с различными ориентациями спонтанной однородной намагниченности в одном из возможных направлений, соответствующих минимуму энергии [4]. Домены с разными направлениями вектора намагниченности разделяются между собой так называемыми доменными границами, или доменными стенками. Полная энергия ферромагнетика определяется следующим выражением [3]:

$$E = E_{\text{обм}} + E_{\text{К}} + E_{\lambda} + E_{\sigma} + E_0 + E_{\text{М}}, \quad (2.1)$$

где:

$E_{\text{обм}}$ – обменная энергия;

$E_{\text{К}}$ – магнитокристаллическая энергия;

E_{λ} – энергия магнитострикционной деформации;

E_σ – магнитоупругая энергия;

E_0 – магнитостатическая энергия;

E_M – магнитная энергия или зеемановская энергия.

Так, обменная энергия возникает в результате электростатического взаимодействия между электронами в ферромагнетике и определяется выражением:

$$E_{\text{обм}} = - \sum J_{ij}(\mathbf{S}_i \mathbf{S}_j), \quad (2.2)$$

где:

J_{ij} – обменный интеграл, определяющий взаимодействие между i -тым и j -тым электроном.

Магнитокристаллическая энергия, прежде всего, связана с анизотропией кристаллической решётки ферромагнетика. В кристаллах существуют так называемые оси лёгкого и трудного намагничивания. В отсутствие магнитного поля ферромагнетик обычно намагничен в направлении легкой оси намагничивания. Магнитокристаллическая энергия определяется тем, что для того, чтобы намагнитить кристалл в выбранном направлении, необходимо повернуть вектор намагниченности относительно лёгкой оси намагничивания, т.е. совершить работу. Однако, в данной работе мы имеем дело с аморфными телами, следовательно, вклад магнитокристаллической энергии можно не учитывать.

Магнитострикция – эффект изменения макроскопических размеров тела при помещении его во внешнее магнитное поле, т.е. при намагничивании образца. Константа магнитострикции есть величина, определяющая относительное удлинение образца в конкретном направлении. В общем случае, константа магнитострикции является тензором, однако, в большинстве случаев справедлива формула:

$$\lambda_s = \frac{\Delta L}{L}, \quad (2.3)$$

где:

ΔL – удлинение образца;

L – длина образца.

Тогда энергия магнитострикционной деформации определяется следующей формулой:

$$E_{\lambda} = \frac{E\lambda_s^2}{2}, \quad (2.4)$$

где:

E – модуль Юнга.

При оценке общего энергетического состояния материала также необходимо учитывать магнитоупругую энергию. Магнитоупругая энергия связана с механическими упругими напряжениями, существующими в ферромагнетике. Так, при наличии внешнего напряжения, магнитоупругая энергия равна

$$E_{\sigma} = -\alpha \sum \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^M, \quad (2.5)$$

где:

α – функция направления намагниченности домена;

σ_{ij} – тензор внешних упругих напряжений;

ε_{ij}^M – тензор магнитострикционной деформации.

Существование магнитостатической энергии связано с тем, что при наличии свободных полюсов возникает размагничивающее поле. При конфигурации, изображенной на рис. 1.2.-1, соответствующей одному домену (весь образец намагничен), на концах образца возникают магнитные полюса. Это приводит к возникновению больших полей рассеяния. Тогда магнитостатическая энергия определяется следующим выражением:

$$E_0 = \frac{N_p M_s^2}{2}, \quad (2.6)$$

где:

N_p - размагничивающий фактор;

M_s - намагниченность насыщения.

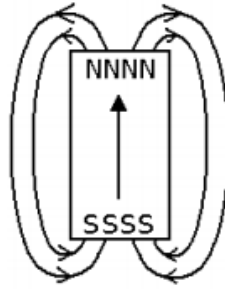


рис. 1.2.-1. Внутреннее поле и поля рассеяния ферромагнитного образца в состоянии насыщения [1].

Магнитостатическая энергия уменьшается, если образец разбивается на домены с противоположно направленными моментами. Поэтому, при отсутствии влияния внешнего намагничивающего поля, ферромагнитный образец, с целью минимизации энергии, разбивается на домены.

Последний тип энергии связан с взаимодействием магнитного образца с внешним магнитным полем и определяется выражением:

$$E_M = -(\mathbf{M}\mathbf{H}), \quad (2.7)$$

где:

\mathbf{H} – напряженность внешнего магнитного поля;

\mathbf{M} – намагниченность образца в поле \mathbf{H} .

Минимумом суммы всех этих энергий ферромагнетика и определяется его микромагнитная структура и особенности ее изменения во внешнем магнитном поле.

Если в изотропном аморфном материале с отличной от нуля константой магнитострикции существуют упругие напряжения, то они и определяют направление преимущественной ориентации магнитного момента – магнитный момент направлен перпендикулярно или параллельно оси действия упругих напряжений в зависимости от их направления и знака константы магнитострикции материала λ_s . Эта зависимость схематически показана на рисунке 1.2.-2.

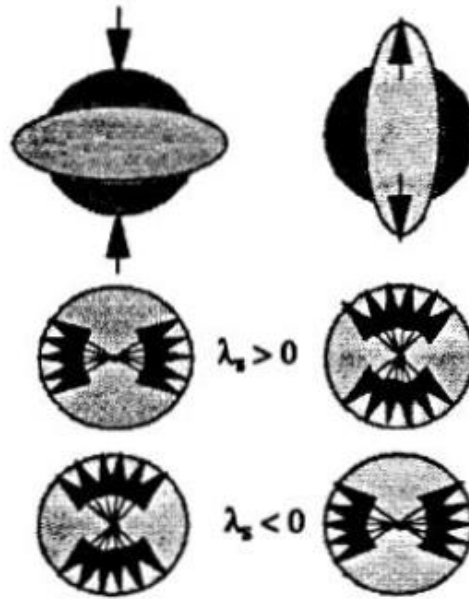


рис. 1.2.-2. Схематичное изображение формирования оси преимущественной ориентации магнитного момента в образце в зависимости от знака константы магнитострикции [26].

Значение λ_s зависит от состава сплава, из которого изготавливается металлическая жила микропровода, а также от напряжений в микропроводе и от внешних напряжений, прикладываемых к микропроводу [2].

В центральной части металлической жилы микропровода преобладают растягивающие аксиальные упругие напряжения, а на периферии – сжимающие, направленные по касательной к поверхности микропровода. С учетом связи направления преимущественной ориентации магнитного момента со знаком λ_s и направлением напряжений, для микропроводов из сплавов на основе Fe и Co с положительной и отрицательной константой магнитострикции формируется доменная структура, которая показана на рисунке 1.2.-3. Для микропровода из сплава на основе Fe аксиально намагниченный керн занимает больший объем металлической жилы, в то время как радиальная доменная структура периферии занимает малую часть. Для микропровода из сплава на основе Co и аксиальные растягивающие напряжения в центре микропровода, и циркулярно направленные сжимающие напряжения на периферии приводят к возникновению направления преимущественной ориентации магнитного

момента по азимуту, то есть к циркулярной доменной структуре во всем объеме металлической жилы микропровода [14]. Однако, резкое увеличение обменной энергии с уменьшением радиуса приводит к возникновению тонкого аксиально намагниченного керна.

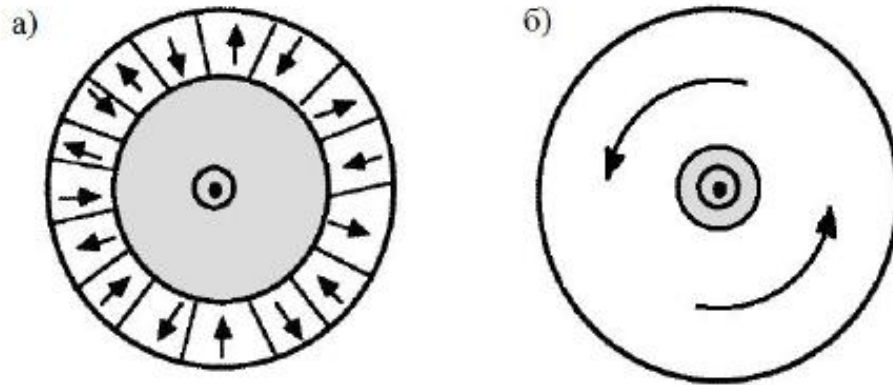


рис. 1.2.-3. Схематичное представление доменной структуры аморфного ферромагнитного микропровода в стеклянной оболочке а) из сплава на основе Fe с положительной константой магнитострикции; б) из сплава на основе Co с отрицательной константой магнитострикции [21].

1.3. Кривая намагничивания ферромагнетика. Петля гистерезиса

Процесс намагничивания ферромагнетика можно целиком описать двумя процессами: намагничиванием за счёт смещения границы между доменами и вращением вектора намагниченности этих доменов. Сам процесс намагничивания можно схематически изобразить с помощью так называемой кривой намагничивания (рис. 1.3.-1), которая представляет собой зависимость намагниченности образца M от напряженности внешнего магнитного поля H .

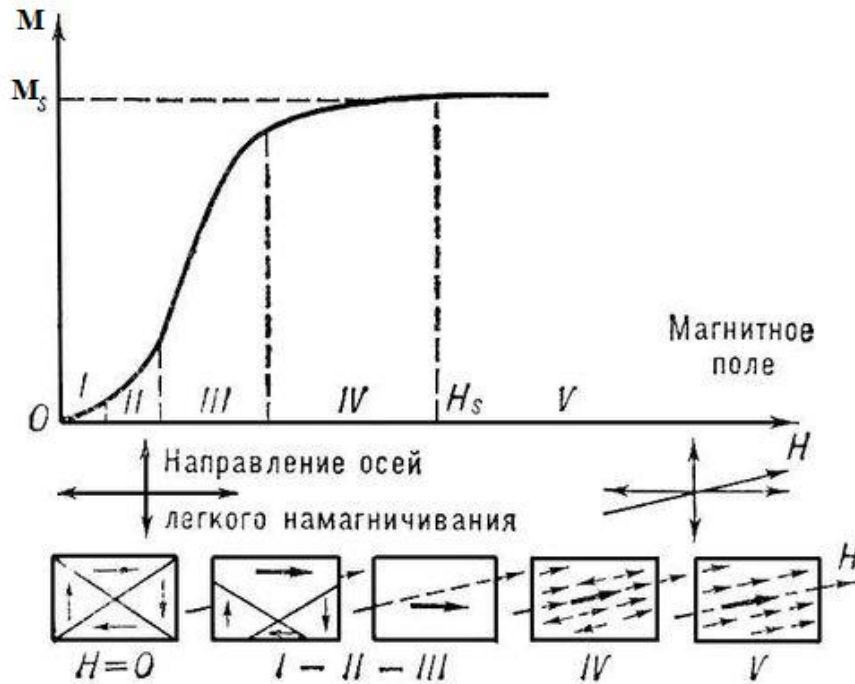


рис. 1.3.-1. Кривая намагничивания ферромагнетика
во внешнем магнитном поле [8].

Кривая намагничивания состоит из пяти участков [4]. Первый участок представляет собой область начального (обратимого) перемангничивания, на котором намагниченность образца M линейно зависит от напряженности внешнего магнитного поля H (формула 3.1). В этой области протекают, главным образом, процессы упругого смещения границ доменов (при постоянной начальной магнитной восприимчивости χ).

$$M = \chi H \quad (3.1)$$

Второй участок носит название «область Рэлея» и представляет собой участок кривой, который характеризуется квадратичной зависимостью M от H (в этой области χ линейно возрастает с H). В этой области намагничивание осуществляется благодаря процессам смещения: обратимым, линейно зависящим от напряжённости внешнего магнитного поля, и необратимым, квадратично зависящим от напряжённости внешнего магнитного поля.

Третий участок под названием «область наибольших проницаемостей» характеризуется самым быстрым ростом M , который связан с необратимым смещением междоменных границ.

На четвёртом участке, области приближения к насыщению, рост намагниченности M обусловлен процессом вращения доменов и ориентации их по направлению внешнего магнитного поля.

Пятый участок соответствует области парапроцесса. Парапроцесс – процесс возрастания во внешнем магнитном поле величины M намагниченности на завершающем этапе намагничивания ферромагнетиков. Данный процесс обусловлен ориентацией по внешнему магнитному полю магнитных моментов атомов, оставшихся неупорядоченными при температурах выше 0 К вследствие дезорганизующего действия теплового движения.

Если после намагничивания ферромагнетика до насыщения начать его медленно размагничивать, то кривая намагничивания не будет повторять сама себя, а пройдёт выше (рис 1.3-2). Такое явление носит название магнитного гистерезиса. Гистерезис (от греч. *hysteresis* — отставание, запаздывание), явление, которое состоит в том, что физическая величина, характеризующая состояние тела (например, намагниченность), неоднозначно зависит от физической величины, характеризующей внешние условия (например, магнитного поля). Гистерезис наблюдается в тех случаях, когда состояние тела в данный момент времени определяется внешними условиями не только в тот же, но и в предшествующие моменты времени.

Если ферромагнетик намагнитить до насыщения в условно положительном направлении, потом в отрицательном направлении и затем ещё раз в положительном, то измеренная при этом зависимость момента от поля опишет так называемую петлю или цикл гистерезиса (рис. 3.1-2).

Такая зависимость намагниченности образца от внешнего магнитного поля при размагничивании объясняется необратимыми процессами. Существуют три основные причины магнитного гистерезиса [1]:

- гистерезис, обусловленный задержкой смещения границ между магнитными доменами;

- гистерезис, обусловленный задержкой роста зародышей перемангничивания (т.е. доменов, имеющих противоположное направление намагниченности);

- гистерезис, обусловленный необратимыми процессами вращения намагниченности доменов.

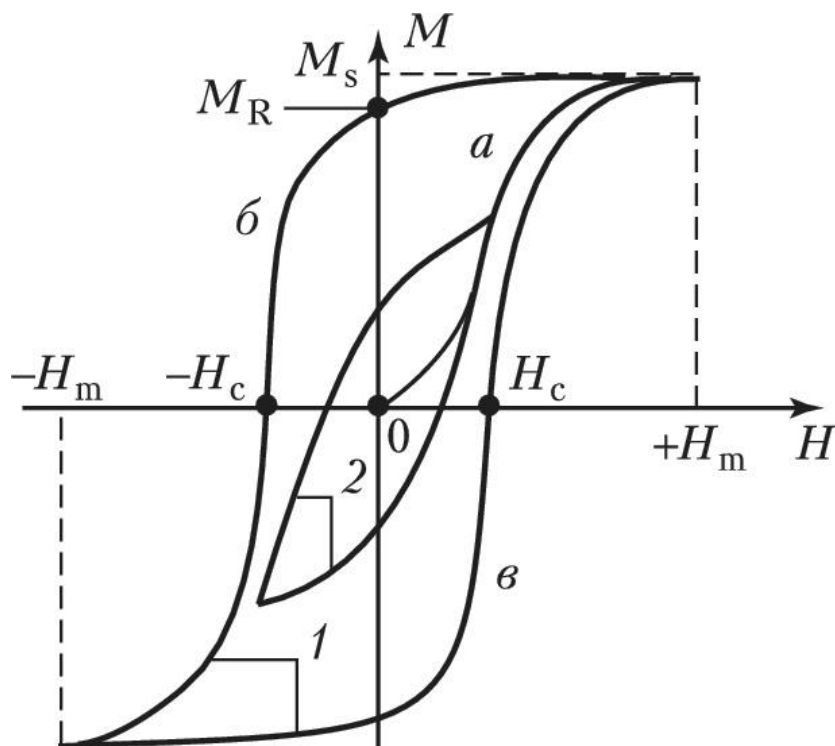


рис. 1.3.-2. Магнитная петля гистерезиса ферромагнетика $M = M(H)$ [8].

Описание явления гистерезиса учитывает конкретную магнитную доменную структуру образца и её изменения в ходе намагничивания и перемангничивания.

Петля гистерезиса имеет ряд характеристик, помогающих более точно описать, а также классифицировать ферромагнитные образцы. Так, первая из них – максимальная намагниченность образца M_s , соответствующая состоянию насыщения образца, - намагниченность насыщения. Точка M_r , соответствующая нулевому значению внешнего магнитного поля, носит название остаточной намагниченности и показывает, какая намагниченность остается у образца после выключения внешнего магнитного поля. Точки $+H_m$ и $-H_m$ соответствуют значениями поля насыщения образца, а значения $+H_c$ и $-H_c$, – коэрцитивной

силе (т.е. значению поля, которое необходимо приложить, чтобы намагниченность образца стала равной нулю).

Вид петли гистерезиса сильно отличается от образца к образцу и полностью определяется составом (константой магнитострикции) и сформированными в микропроводе напряжениями, то есть микромагнитной структурой исследуемого образца. Так, ниже представлены петли гистерезиса для различных образцов (рис. 1.3.-3).

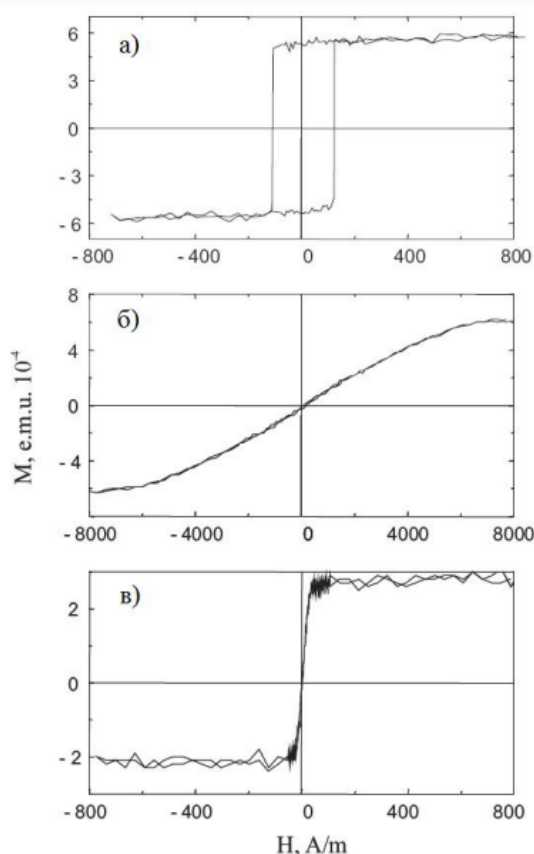


рис. 1.3.-3. Петли гистерезиса для микропроводов, изготовленных из сплавов с различными константами магнитострикции: а) $\lambda_S > 0$, б) $\lambda_S < 0$, в) $\lambda_S \sim 0$ [29].

Именно благодаря различным магнитным свойствам ферромагнитные микропровода нашли свое применение во многих областях использования: микропровода из сплавов на основе FeCo – в ГМИ (гигантский магнитный импеданс) датчиках и других высокочастотных устройствах, кобальтовые микропровода – в магнитных метках, а микропровода из сплавов на основе Fe – в системах кодирования [14].

1.4. Скачок Баркгаузена. Магнитная бистабильность

Рассмотрим третий участок кривой намагничивания, а именно «область наибольших проницаемостей». Рассмотрим 180-градусную границу (т.е. границу, которая разделяет домены с противоположно ориентированными магнитными моментами) [1]. Пусть доменная граница является плоской и находится в плоскости YOZ (рис. 1.4.-1а). Энергию γ , приходящуюся на единичную поверхность доменной границы, с учётом возможных флуктуация и дефектов образца, можно представить как функцию координаты x (рис 1.4.-1б):

$$\gamma = f(x) \quad (4.1)$$

Кривая, изображенная на рисунке 1.4.-1в, характеризует производную энергии доменной границы $\frac{d\gamma}{dx}$ вдоль оси x .

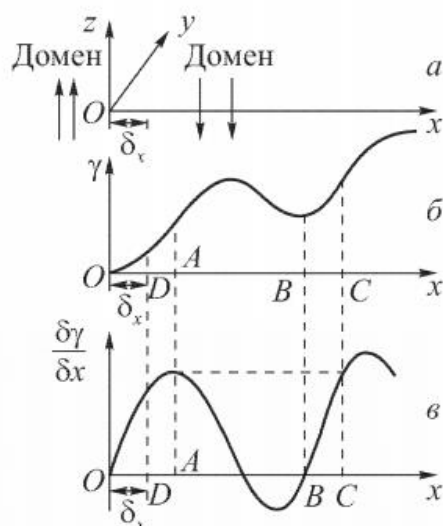


рис 1.4.-1. График зависимости энергии γ (б) и градиента энергии вдоль оси x (в) [1].

Если вдоль оси z (вдоль направления намагниченности одного из граничащих доменов) приложить магнитное поле, то доменная граница сместится так, что размер домена, магнитный момент которого совпадает по направлению с внешним магнитным поле, увеличится, а размер домена с противоположно направленным магнитным моментом – уменьшится. Новое

положение равновесия доменной границы определится из следующих соображений: если доменная стенка при приложении внешнего магнитного поля сместится вправо на расстояние δx , то магнитная энергия в объёме $yz\delta x$ уменьшится на $2NM_s yz\delta x$. Эта энергия будет потрачена на совершение работы по перемещению доменной границы.

$$2NM_s yz\delta x = \frac{d\gamma}{dx} \delta x. \quad (4.2)$$

При приложении внешнего магнитного поля график зависимости энергии единичной поверхности доменной границы γ вдоль оси x изменится, а новое положение доменной границы будет определяться новым минимумом энергии γ .

Если новому минимуму свободной энергии соответствует смещение $\delta x < OA$ (рис. 1.4.-1в), то, после прекращения воздействия внешнего магнитного поля на исследуемый образец, граница сместится в первоначальное положение в точку O , т.е. в состояние начальной намагниченности образца. Иными словами, образец вернётся в начальное размагниченное состояние.

Если же новому минимуму свободной энергии соответствует смещение $\delta x = OA$ (рис. 1.4.-1в), т.е. доменная граница достигает максимального значения градиента поверхностной энергии, то без дальнейшего увеличения внешнего магнитного поля стенка совершит дополнительное перемещение до точки C (рис. 1.4.-1в), в которой значение градиента энергии такое же, как в точке A . Перемещение доменной границы из точки A в точку C без увеличения значения внешнего магнитного поля называется скачком Баркгаузена. Если после совершения доменной границей скачка Баркгаузена отключить внешнее магнитное поле, то доменная граница уже не сможет вернуться в первоначальное положение, а остановится в положении минимума поверхностной энергии между точками A и C . Такой способ перемагничивания является одной из причин существования магнитного гистерезиса.

Существуют ферромагнитные провода, в которых процесс перемагничивания осуществляется благодаря одному большому скачку

Баркгаузена (т.е. доменная граница имеет всего два положения минимума энергии). Такие провода называются магнитно-бистабильными (или просто бистабильными). Аморфные микропровода с металлической жилой из сплава на основе Fe являются бистабильными: они имеют только два значения намагниченности: $+M_S$ и $-M_S$. Процесс перемагничивания такого микропровода схематически изображён на рис. 1.4.-2. Красная точка на петле гистерезиса соответствует моменту перемагничивания, при котором доменная граница находится в положении, изображённом на рисунке слева. Стоит отметить, что устойчивыми положениями доменной границы являются только положения 1 и 5. Положения 2, 3 и 4 являются промежуточными: доменная граница не может остановиться в этих положениях, - эти положения приведены лишь с целью отображения процесса перемагничивания и его связи с движением доменной границы.

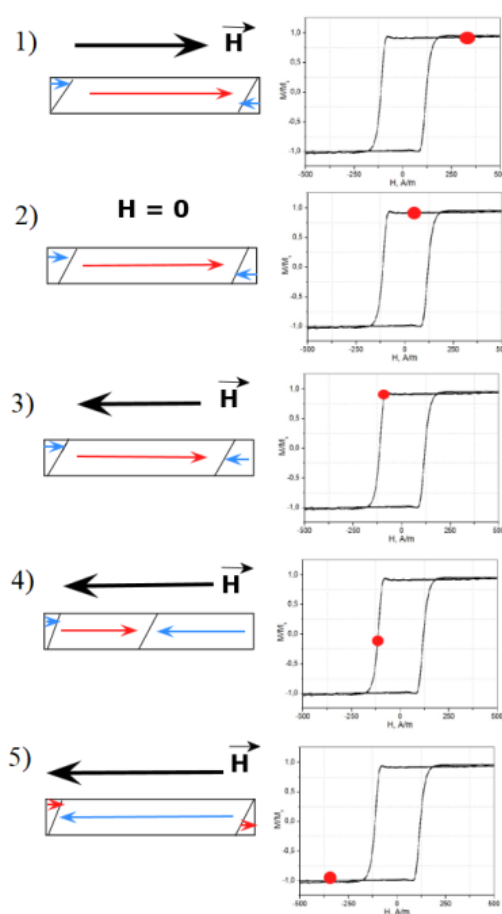


рис. 1.4.-2. Схематическое изображение процесса перемагничивания бистабильного аморфного ферромагнитного микропровода.

1.5. Типы доменных границ. Динамика движения доменной границы типа head-to-head в бистабильном микропроводе

Как уже упоминалось выше, доменная граница – переходная область между магнитными доменами с различным направлением намагниченности. Сама доменная граница не имеет определённого направления вектора намагниченности, оно меняется от точки к точке. Таким образом, направление вектора намагниченности внутри доменной границы меняется постепенно от направления намагниченности одного граничащего с доменной стенкой домена к направлению намагниченности другого магнитного домена.

Первая теория о структуре и строении доменной границы принадлежит Феликсу Блоху, который предполагал, что локальное направление намагниченности меняется равномерно по величине вдоль стенки и проходит через ноль в середине доменной границы. Изменение направления магнитных моментов атомов, находящихся в области доменной границы, не может быть резким, иначе бы значение обменной энергии сильно возросло. Считается, что ферромагнитный материал в области доменной границы представляет собой среду со спонтанной намагниченностью, направление которой является функцией координат, а модуль намагниченности остаётся неизменным [7].

В ферромагнетиках, в том числе аморфных материалах, преобладает два типа доменной стенки: стенка Блоха и стенка Нееля. Обе эти стенки являются 180-градусными. Отличие заключается лишь в том, что в ситуации со стенкой Блоха поворот вектора намагниченности происходит в плоскости, параллельной плоскости доменной границы, а в случае стенки Нееля, поворот вектора намагниченности осуществляется в плоскости, перпендикулярной плоскости доменной границы.

Из всех ферромагнитных аморфных сплавов принято выделять особый класс материалов, обладающих бистабильными свойствами. Как уже упоминалось выше, бистабильные ферромагнетики характеризуются двумя стабильными магнитными состояниями с противоположно направленными

векторами намагниченности насыщения, которые переходят друг в друга посредством одного большого скачка Баркгаузена. Примером бистабильного ферромагнитного материала является аморфный ферромагнитный микропровод из сплава на основе железа. Такой микропровод характеризуется следующей микромагнитной структурой: в центре микропровода находится протяжённый домен цилиндрической формы, который занимает почти весь объём микропровода. Вектор намагниченности этого домена направлен вдоль оси микропровода (рис. 1.5.-1). Эту часть микропровода называют аксиально намагниченным керном. Следом за керном располагается тонкий цилиндрический слой, состоящий из доменов, которые имеют другое направление намагниченности (рис. 1.5.-1). Направление преимущественной ориентации магнитных моментов этих доменов определяется знаком константы магнитострикции.

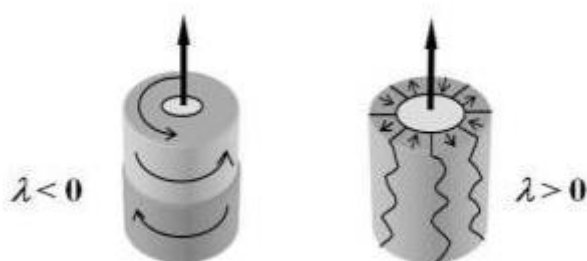


рис. 1.5.-1. Схематическое изображение микромагнитной структуры жилы ферромагнитного микропровода в стеклянной изоляции для: а) микропровода с отрицательным значением константы магнитострикции; б) микропровода с положительным значением константы магнитострикции [30].

В основе разбиения ферромагнитных материалов на домены лежит принцип минимума полной энергии ферромагнетика [1, 3]. Иметь один большой осевой домен энергетически невыгодно, поэтому микропровод имеет также так называемые концевые домены с противоположным аксиальному керну направлением намагниченности, которые с обеих сторон «закрывают» большой осевой домен, тем самым уменьшая магнитостатическую энергию микропровода (при отсутствии влияния внешнего намагничивающего поля,

ферромагнитный образец, с целью минимизации энергии, разбивается на домены). В процессе перемагничивания такого микропровода одна или сразу обе доменные стенки (в зависимости от области, к которой прикладывается внешнее магнитное поле) начинают движение, т.е. растут концевые домены (зародыши обратной фазы). Если микропровод целиком внесен во внешнее магнитное поле, то движение начинают сразу две стенки. Когда они встречаются, то «схлопываются» и уничтожают друг друга [27]. После перемагничивания микропровода на концах снова появляются концевые домены с магнитным моментом, направленным противоположно магнитному моменту микропровода.

Как было сказано выше, такие магнитные материалы с двумя устойчивыми положениями направления намагниченности являются перспективными для разработки магнитной памяти, чувствительных датчиков магнитного поля и других физических величин, а также устройств автоматики на их основе [20, 21]. Поэтому исследованию подобных материалов уделяется огромное внимание. Знание о форме, размерах и типе движения доменной границы сыграет немаловажную роль в реализации устройств на основе бистабильных ферромагнитных материалов.

В настоящее время точные размеры и геометрическая форма доменной границы неизвестны: аморфное состояние металлической жилы и большие размеры микропроводов не позволяют смоделировать процесс перемагничивания. Также микромагнитную структуру нельзя определить с помощью сканирующих устройств, т.к. глубина проникновения современных сканирующих устройств на несколько порядков меньше, чем толщина микропровода. Однако, существует множество моделей, которые используют ученые, чтобы так или иначе описать движение доменной границы в процессе перемагничивания бистабильного микропровода. Так, с точки зрения геометрической формы, доменные границы можно разделить на следующие виды: плоская [10, 18], косая плоская [27], параболическая (или же

колоколообразную) [10, 27, 28] и коническая [27]. Схематически они изображены на рис 1.5.-2.

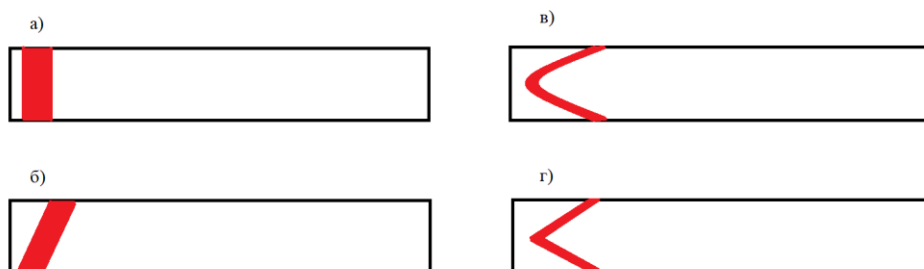


рис. 1.5.-2 Типы доменных границ:

а) прямая плоская б) косая плоская в) параболическая г) коническая.

С точки зрения способа поворота вектора намагниченности внутри доменной границы, существуют симметричная поперечная, антисимметричная поперечная, вихревая, двойная вихревая и тройная вихревая доменные границы (рис 1.5.-3) [6]. Стоит отметить, что все приведённые выше типы доменных стенок являются стенками Нееля.

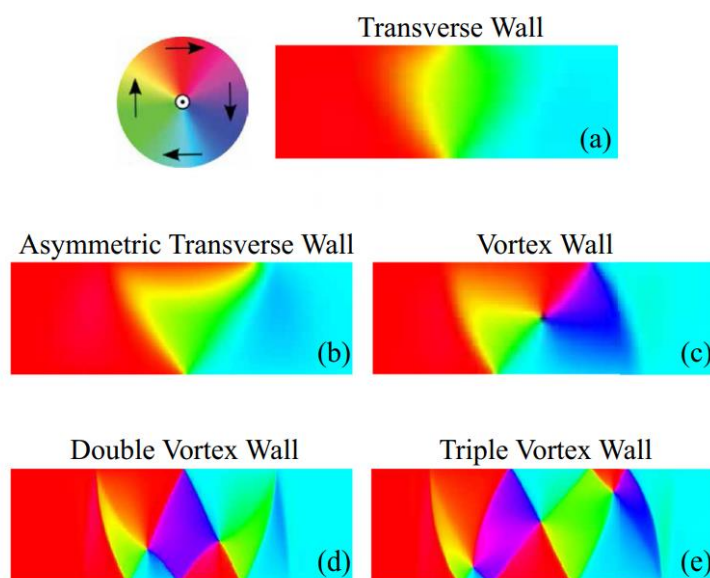


рис. 1.5.-3. Типы доменных границ в зависимости от способа вращения вектора намагниченности: а) поперечная симметричная; б) поперечная антисимметричная; в) вихревая; г) двойная вихревая; д) тройная вихревая [6].

Все формы доменных границ, представленные выше, являются теоретическими моделями, разработанными для наноразмерных образцов. Доменная стенка каждой представленной конфигурации может быть сформирована и в микропроводах. Как уже было сказано ранее, аморфность (т.е. отсутствие дальнего порядка в структуре микропровода) и микронные размеры (такие размеры являются слишком большими для сканирующих приборов и для моделирования процесса перемагничивания) микропроводов являются причиной отсутствия непосредственно измеренных или теоретически полученных данных о структуре доменной границы в бистабильных аморфных микропроводах. Знание структуры доменной границы позволит лучше понимать и, как следствие, контролировать процессы перемагничивания бистабильных проводов, что, в свою очередь, позволит более успешно внедрять приложения на их основе, а также находить им применение в новых сферах.

Таким образом, исследования, посвящённые изучению формы и размеров доменной границы, а также изучению движения доменной границы, являются актуальными как в прикладной, так и в фундаментальной физике. Данная работа посвящена исследованиям особенностей динамики движения доменной границы в аморфных бистабильных ферромагнитных проводах с металлической жилой из различных сплавов на основе железа.

Глава 2. Методика эксперимента, исследуемые образцы

2.1. Исследуемые образцы

В данной работе были использованы аморфные ферромагнитные бистабильные микропровода следующего состава и поперечных размеров:

- $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$, $d/D = 13/26$;
- $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$, $d/D = 19/29$;
- $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$, $d/D = 23/29$;
- $\text{Fe}_{77}\text{Si}_{10}\text{B}_{10}\text{C}_3$, $d/D = 17.2/20.4$;
- $\text{Fe}_{77}\text{Si}_{10}\text{B}_{10}\text{C}_3$, $d/D = 20/22$;
- $\text{Fe}_{47,42}\text{Ni}_{26,6}\text{B}_{12,99}\text{Si}_{11}\text{C}_{1,99}$, $d/D = 18.6/21.4$.

В распоряжении автора была несколько образцов каждого состава. Все провода являются бистабильными и аморфными. Все исследуемые образцы были изготовлены методом Улитовского-Тейлора. Нижний индекс у химического элемента отображает количественное отношение элемента в составе микропровода. Параметр d/D : d – диаметр металлической жилы микропровода, D – диаметр микропровода в стеклянной оболочке (величина указана в мкм).

2.2. Метод Сикстуса-Тонкса

Все зависимости скорости движения доменной границы в процессе перемагничивания микропровода от приложенного внешнего магнитного поля в данной работе были получены методом Сикстуса-Тонкса [9]. Метод Сикстуса-Тонкса основывается на явлении электромагнитной индукции — возникновении ЭДС (электродвижущей силы) в приёмной катушке при

изменении магнитного потока Φ , проходящего через контур приёмной катушки.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.1)$$

Схема установки для измерения скорости движения доменной границы в процессе перемагничивания микропровода [23] представлена на рисунке 2.1.-1. Фотография приемного узла изображена на рисунке 2.2.-2.

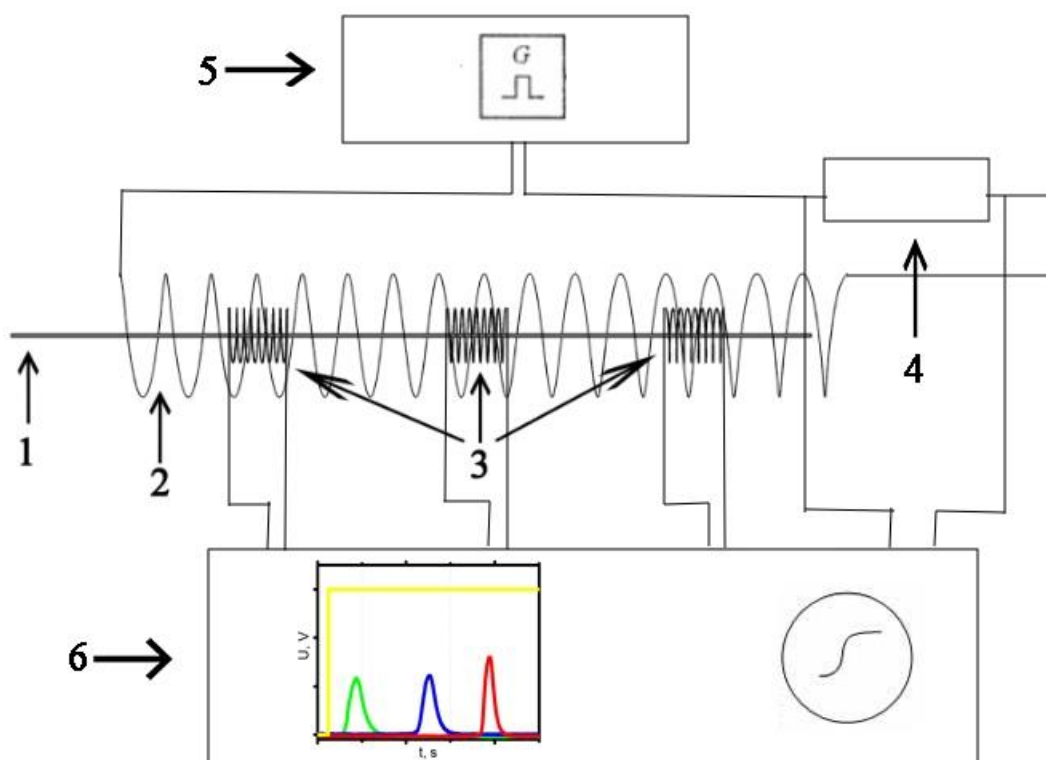


рис. 2.2.-1. Схематическое изображение установки по измерению скорости движения доменной границы методом Сикстуса-Тонкса: 1) исследуемый образец; 2) намагничивающий соленоид; 3) приёмные катушки; 4) резистор; 5) генератор квадратных импульсов напряжения; 6) осциллограф.

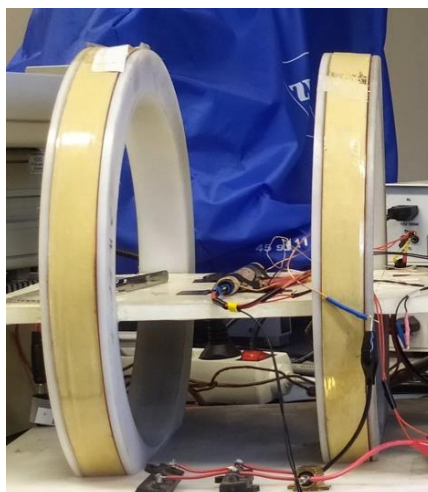


рис 2.2.-2. Установка по измерению скорости движения доменной границы методом Сикстуса-Тонкса, используемая в данной работе [23].

Так, главная цепь установки состоит из генератора квадратных импульсов напряжения 5, которые посылаются на соленоид 2, который, в свою очередь, намагничивает образец, помещённый в соленоид. Также в главную цепь последовательно к намагничивающему соленоиду подключается резистор, к которому параллельно присоединяется один (первый) из четырёх каналов осциллографа для того, чтобы снимать падение напряжения на резистор. Тогда, по закону Ома для участка цепи (2.2) можно рассчитать электрический ток, текущий в цепи:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.2)$$

Зная значение электрического тока и параметры соленоида, можно рассчитать значение внешнего магнитного поля, прикладываемое к образцу:

$$H = NI, \quad (2.3)$$

где N – коэффициент передачи соленоида, полученный экспериментально.

Также внутри соленоида располагается подвижный приёмный модуль, в состав которого входят приёмные катушки 3. Каждая приёмная катушка

подключается к отдельному каналу осциллографа. Приёмные катушки нумеруются справа налево от того конца микропровода, который помещён внутрь соленоида. Другой конец микропровода находится вне соленоида. Делается это с той целью, чтобы знать, с какой стороны начнёт перемагничиваться микропровод. Когда прикладываемое к образцу поле достигает критического значения, называемого также полем переключения, H_{sw} , он начинает перемагничиваться. С обеих сторон доменной границы находятся магнитные домены с противоположным направлением намагниченности, следовательно, при прохождении доменной границы через приёмную катушку, магнитный поток будет меняться на величину $2\mu_0 M_z S_s$ (где S_s – площадь поперечного сечения микропровода). Тогда, согласно (2.1), в приёмной катушке будет возникать электродвижущая сила ε (рис. 2.2-3):

$$\varepsilon = - \frac{2\mu_0 M_z S_s}{dt}. \quad (2.1a)$$

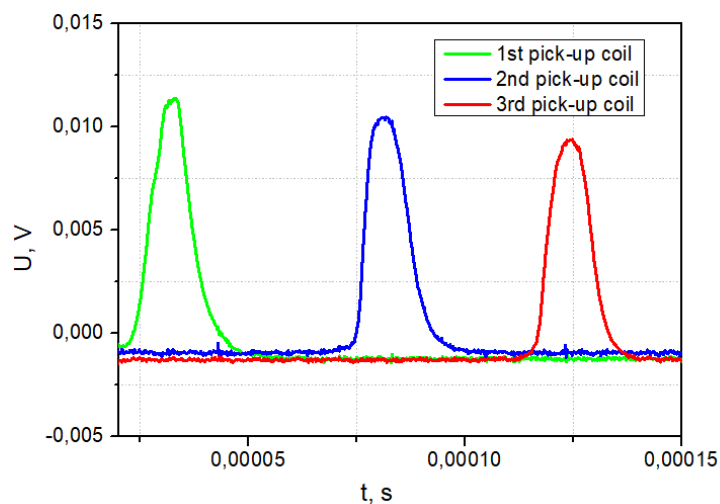


рис. 2.2.-3. Сигналы ЭДС, возникающие в приёмных катушках в процессе перемагничивания микропровода.

Зная расстояние между максимумами индуцируемых пиков ЭДС и расстояние между приёмными катушками (рис 2.2.-4), можно найти среднюю скорость движения доменной границы между этими приёмными катушками:

$$V_{1-2} = \frac{L}{\Delta T_{1-2}}; \quad V_{2-3} = \frac{L}{\Delta T_{2-3}}, \quad (2.4a, 2.4b)$$

где:

ΔT_{1-2} – расстояние между максимумами первого и второго пиков ЭДС;

ΔT_{2-3} – расстояние между максимумами второго и третьего пиков ЭДС;

V_{1-2} – скорость движения доменной границы, измеренная между первой и второй приёмной катушкой;

V_{2-3} – скорость движения доменной границы, измеренная между второй и третьей приёмной катушкой.

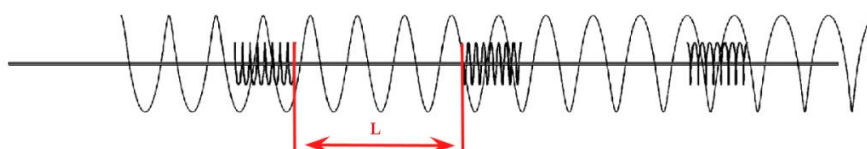
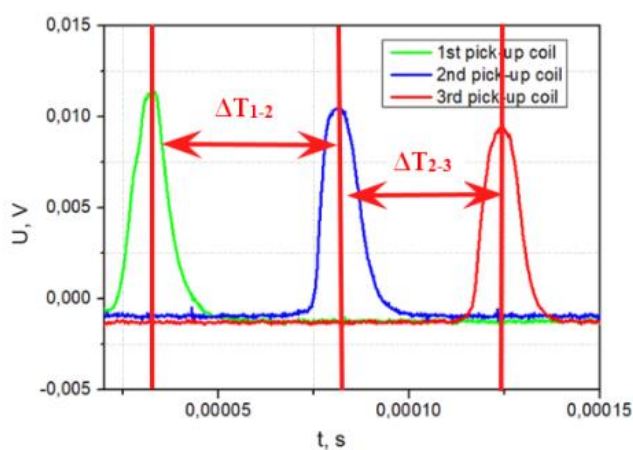


рис. 2.2.-4. Типичная форма сигналов ЭДС, индуцируемых в приёмных катушка, и схема приёмного узла.

Стоит отметить, что форма выходного сигнала генератора не обязательно должна быть квадратной. Из-за резкого скачка внешнего магнитного поля, в приёмной катушке индуцируется второй сигнал ЭДС (рис 2.2.-5).

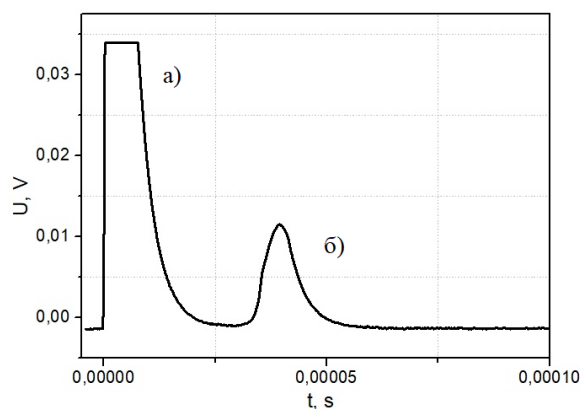


рис. 2.2.-5. Индуцируемые в приёмной катушке сигналы ЭДС:

- а) сигнал, возникающий из-за резкого скачка магнитного поля соленоида;
- б) сигнал, возникающий из-за перемагничивания микропровода.

Таким образом, на экране осциллографа наблюдается сразу два сигнала. Если конец микропровода окажется слишком близко к первой приёмной катушке или доменная стенка окажется достаточно быстрой, то два эти пика могут слиться, и это исказит результат. Подобного пика не наблюдается у синусоидальной формы выходного сигнала, потому что поле нарастает постепенно. Однако, в случае синусоидального сигнала намного сложнее определить значение поля, при котором начинается процесс перемагничивания, также процесс измерения скорости движения доменной границы при синусоидальном значительнее сложнее автоматизировать.

2.3. Характеристики процесса перемагничивания бистабильного микропровода. Скорость, ускорение, мобильность доменной границы

Как уже отмечалось ранее, зная расстояние между приёмными катушками и время между индуцируемыми сигналами ЭДС в приёмных катушках, можно рассчитать среднюю скорость доменной границы:

$$V = \frac{L}{\Delta T}. \quad (3.1)$$

Типичная зависимость скорости движения доменной границы в процессе перемангничивания бистабильного микропровода V от внешнего магнитного поля H представлена на рис 2.3.-1.

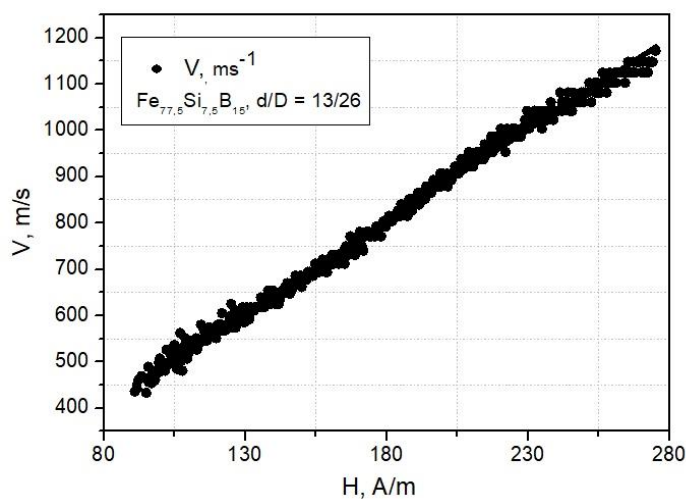


рис 2.3.-1. Зависимость скорости движения доменной границы от внешнего магнитного поля.

С увеличением значения внешнего магнитного поля скорость движения доменной стенки, а, значит, и перемангничивания так же увеличивается. В некоторых работах (например, [12, 13]) движение доменной границы описывается с помощью второго закона Ньютона:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + \alpha x = 2M_s H, \quad (3.2)$$

где:

x – текущее положение доменной границы;

m – эффективная масса доменной границы;

β – коэффициент затухания движения;

α – коэффициент упругости;

M_s – намагниченность насыщения микропровода;

$2M_s H$ – движущая сила внешнего магнитного поля.

Если зависимость скорости движения доменной границы от внешнего магнитного поля является линейной функцией (доменная границы движется

равномерно или ускорение очень мало), т.е. $\frac{d^2x}{dt^2} \rightarrow 0$, то уравнение движения (3.2.) примет следующий вид:

$$\frac{dx}{dt} = v = S(H - H_0) \quad (3.3)$$

где:

$S = \frac{2M_s}{\beta}$ – подвижность доменной границы;

$H_0 = \frac{\alpha x}{2M_s}$ – значение поля, при котором начинается распространение доменной стенки (или же поле переключения), ниже которого движение доменной границы теоретически невозможно.

Значение подвижности доменной границы можно получить экспериментально. Геометрический смысл подвижности доменной границы состоит в том, что она является тангенсом угла наклона графика зависимости $v = v(H)$, т.е. $S = \tan \vartheta = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta H}$ (рис. 2.3.-2).

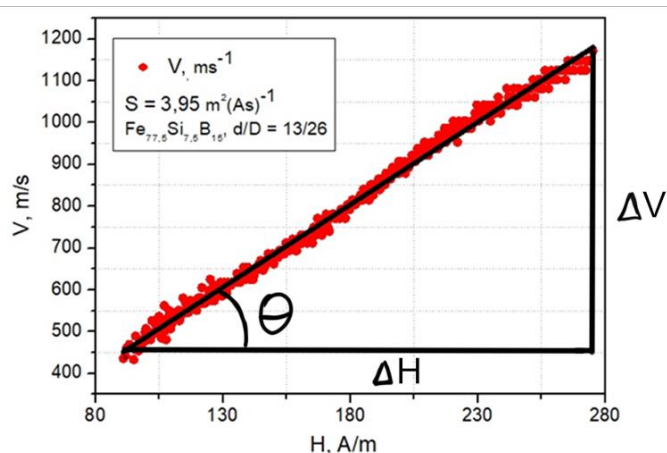


рис. 2.3.-2. Зависимость скорости движения доменной границы от внешнего магнитного поля и способ определения значения подвижности на линейном участке движения.

Теория, которая рассматривала бы движение доменной границы с ускорением, в настоящий момент ещё не разработана. Чаще всего в научных работах берут среднюю скорость движения доменной границы только между двумя парами катушек [5, 15]. С помощью такого подхода обнаружить ускорение невозможно, т.к. измерение скорости движения между одной парой

катушек не с чем сравнить. Однако, если рассматривать движение доменной границы между разными парами катушек [22], то можно обнаружить ускоренное движение доменной границы в процессе перемагничивания микропровода.

В ходе выполнения исследований в рамках дипломной работы рассматривались зависимости скорости движения доменной стенки от величины приложенного поля между несколькими парами приемных катушек, расположенных по длине провода. В результате было обнаружено движение доменной стенки как с положительным, так и с отрицательным ускорением, а, кроме того, ее равномерное движение.

2.4. Модернизация и сборка измерительных модулей

Измерительный модуль установки для измерения скорости движения доменной границы состоит из капилляра диаметром 150 мкм, приёмных катушек, которые намотаны на этот капилляр, а также намагничивающего соленоида. В свою очередь, капилляр с намотанными на него катушками составляют так называемый приёмный модуль. Первый приёмный модуль, собранный Сикстусом и Тонксом в конце 20-ых годов прошлого столетия имел всего две приёмные катушки [9]. Очевидно, что с помощью такого приёмного модуля невозможно определить наличие ускоренного движения доменной стенки (если оно имеется), потому что для установления наличия ускорения необходимо сравнить скорость доменной границы хотя бы на двух разных участках провода. Можно провести измерение на одном участке микропровода, а потом переместить приёмный модуль на другой участок или же передвинуть сам микропровод относительно приёмного модуля в намагничивающем соленоиде. Однако, такой способ измерения не будет показательным, т.к. микропровод является очень чувствительным к внешним воздействиям объектом исследования, и процесс движения микропровода или приёмного модуля может внести вклад в результаты измерения.

Большинство измерений, представленных в этой выпускной квалификационной работе, были проведены на измерительном модуле, собранном Михаилом Ипатовым в лаборатории магнитных материалов профессора А.П. Жукова в университете Страны Басков (Сан-Себастьян, Испания) [23]. Схематичное изображение измерительного модуля представлено на рис 2.4.-1.

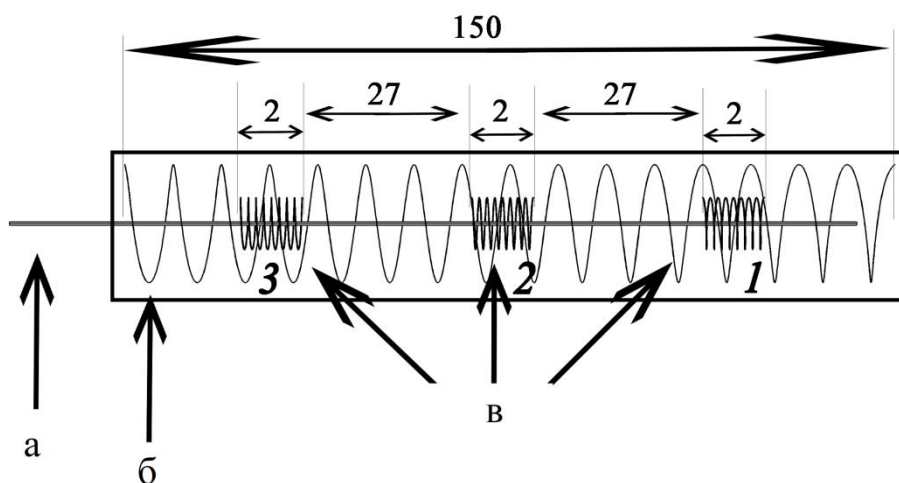


рис. 2.4.-1. Схематичное изображение измерительного модуля: а) исследуемый образец; б) намагничивающий соленоид; в) приёмные катушки.

Числами на рисунке указано расстояние в миллиметрах.

В ходе выполнения измерений на данном модуле, автором дипломной работы был предложен ряд его модификаций, которые позволили детектировать ускоренное движение (если оно присутствует), а также детектировать явление мультидоменности. Так, лично автором был намотан новый намагничивающий соленоид большего диаметра, который обеспечивает большую мобильность и свободу перемещения приёмного модуля с помещённым внутри него исследуемым образцом (образец при этом неподвижен), а также собраны три приёмных модуля с целью увеличить область микропровода, на которой происходит измерение, а также повысить чувствительность приемного узла установки к переходу микропровода в мультидоменное состояние.

Технические характеристики намагничивающего соленоида:

- длина соленоида: 150 мм;
- диаметр соленоида: 15 мм;
- диаметр входного отверстия соленоида: 13 мм;
- диаметр медного провода намотки: 0,85 мм;
- число витков: 180.

Первый приёмный модуль был собран с целью увеличить область микропровода, на которой происходит измерение скорости. Так, область измерения (т.е. расстояние между первой и последней приёмной катушкой) была увеличена с 87 мм до 99,5 мм, число приёмных катушек было увеличено с трёх до пяти (рис. 2.4.-2).

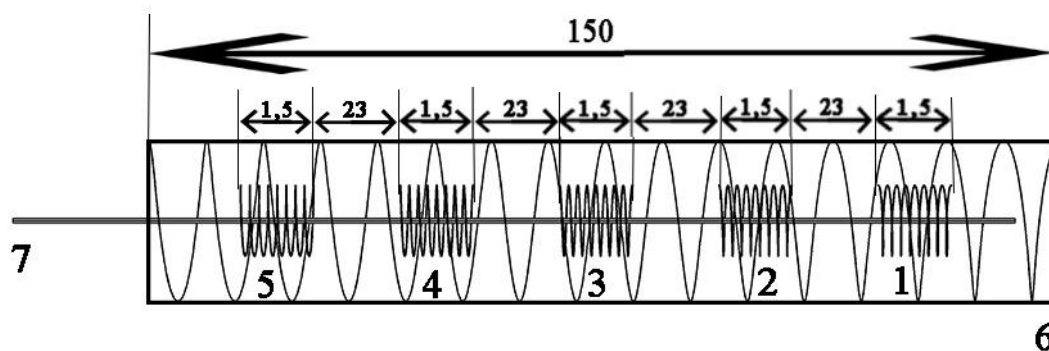


рис. 2.4.-2. Схематичное изображение измерительного модуля, включающего в себя первый приёмный модуль, состоящий из пяти катушек, собранный автором: 1, 2, 3, 4, 5 – приёмные катушки, 6 – намагничивающий соленоид, 7 – исследуемый образец.

Числами на рисунки указано расстояние в миллиметрах.

Технические характеристики первого приёмного модуля:

- число приёмных катушек: 5;
- расстояние между приёмными катушками: 23 мм;
- длина приёмной катушки: 1,5 мм;
- диаметр приёмной катушки: 1,2 мм;
- число витков приёмной катушки: 100;

- диаметр медного провода намотки: 0,1 мм;
- длина капилляра: 105 мм;
- диаметр капилляра: 1 мм.

Осциллограф имеет всего четыре аналоговых входа, и один из них снимает показания с низкоомного резистора, который подключен последовательно к намагничивающему соленоиду (для того, чтобы пересчитывать выходное напряжение с генератора в напряжённость магнитного поля соленоида), поэтому за одно измерение можно подключить к осциллографу только три приёмные катушки. Таким образом, сначала измерение проводилось с подключенными приёмными катушками под номерами 1, 2, 3, т.е. снимались значения скорости между 1 и 2, а также между 2 и 3 приёмными катушками. Затем, к осциллографу подключались приёмные катушки под номерами 3, 4, 5, т.е. снимались значения скорости между 3 и 4, а также между 4 и 5 приёмными катушками. Но такой протокол не позволил точно установить, движется ли доменная граница с ускорением или нет, т.к. нельзя проверить влияние процесса переподключения катушек на измерение. В процессе переподключения существует вероятность задеть контактами приёмных катушек исследуемый образец, т.к. конфигурация установки предполагает, что монтажные провода приёмных катушек и исследуемый образец располагаются достаточно близко друг к другу, и их возможный контакт в процессе переподключения исказит измерение. Поэтому было решено собрать второй приёмный модуль, который состоит из четырёх приёмных катушек (рис 2.4.-3).

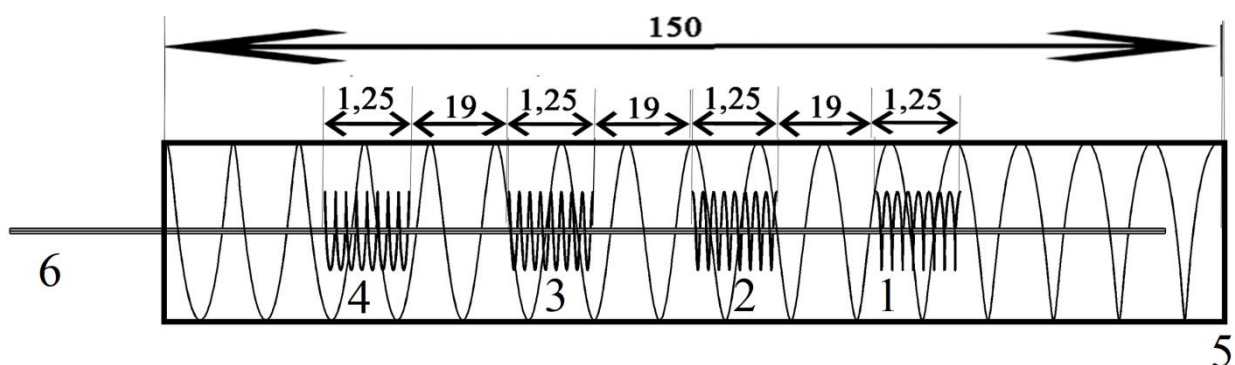


рис 2.4.-3. Схематическое изображение измерительного модуля, включающего в себя второй приёмный модуль, состоящий из четырёх катушек, собранный автором: 1, 2, 3, 4 – приёмные катушки, 5 – намагничивающий соленоид, 6 – исследуемый образец. Числами на рисунки указано расстояние в миллиметрах.

Технические характеристики второго приёмного модуля:

- число приёмных катушек: 4;
- расстояние между приёмными катушками: 19 мм;
- длина приёмной катушки: 1,25 мм;
- диаметр приёмной катушки: 1,2 мм;
- число витков приёмной катушки: 70;
- диаметр медного провода намотки: 0,1 мм;
- длина капилляра: 105 мм;
- диаметр капилляра: 1 мм.

Таким образом, при уменьшении числа катушек изменился и сам способ измерения: сначала подключались приёмные катушки под номерами 1, 2, 3, т.е. измерялись значения скорости между 1 и 2, а также между 2 и 3 приёмными катушками. Затем, к осциллографу подключались приёмные катушки под номерами 2, 3, 4, т.е. снимались значения скорости между 2 и 3, а также между 3 и 4 приёмными катушками. Получается, что измерение средней скорости движения доменной границы между 2 и 3 катушками снимались дважды: до переподключения катушек и после. Совпадение результатов измерения

является подтверждением того факта, что процесс перепоключения приёмных катушек не повлиял на процесс измерения. Пример совпадения линий при повторном подключении приемных катушек 2-3 представлен на рисунке 2.4.-4.

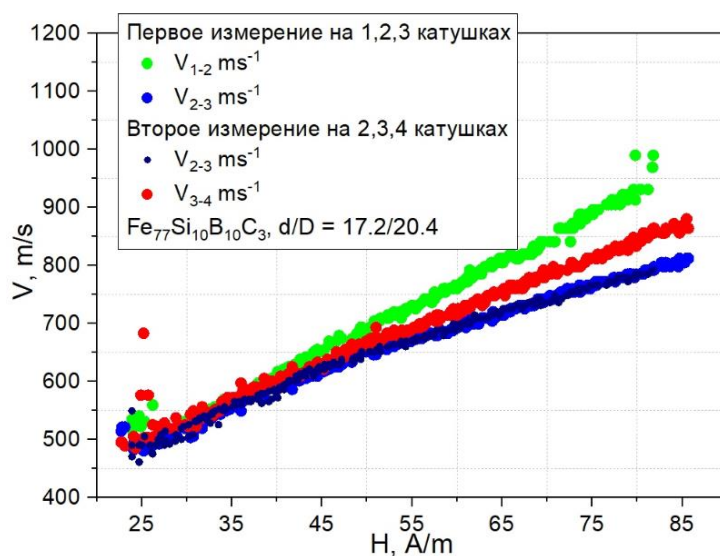


рис 2.4.-4. График зависимости скорости доменной границы от приложенного внешнего магнитного поля, полученный на втором приёмном модуле.

При разработке третьего приёмного модуля, перед автором стояла задача повышение чувствительности приемного узла установки к переходу микропровода в мультидоменное состояние. Мультидоменность – явление зарождения и начала движения любых доменных стенок внутри микропровода, не считая доменных стенок, граничащих с замыкающими концевыми доменами. Дополнительные доменные границы возникают в процессе перемагничивания при определенных внешних магнитных полях, противоположно направленных по отношению к намагниченности провода, т.к. на дефектах микропровода образуются магнитные домены обратной фазы. Такие доменные границы не участвуют в процессе перемагничивания бистабильного микропровода до тех пор, пока внешнее магнитное поле не становится достаточно большим, чтобы сформировать на дефекте зародыш обратной фазы такой величины, что доменные стенки с двух сторон домена срываются с него и начинают необратимо двигаться вдоль оси микропровода. Такое поле называется полем мультидоменности. На осциллографе Agilent

Technologies DSO5034A, который использовался в данной работе, каждый аналоговый канал имеет собственный цвет (рис 2.4.-5).

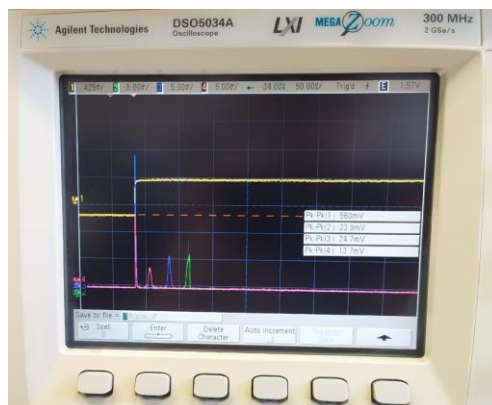


рис. 2.4.-5. Фотография экрана осциллографа Agilent Technologies DSO5034A.

Красный, синий и зелёный сигналы – сигналы с третьей, второй и первой приёмных катушек, соответственно, жёлтый сигнал – сигнал с генератора, поступающий на намагничивающий соленоид.

Если провод находится в мультидоменном состоянии, вдоль его оси движется сразу несколько доменных границ, поэтому достоверно оценить скорость доменной границы, распространяющейся с конца микропровода, - невозможно. Если побочные доменные границы возникнут на дефекте, предположим, вблизи третьей катушки, то на осциллограф сигнал с этой катушки придёт раньше, чем с первой катушки. В такой ситуации детектировать наступление мультидоменности достаточно просто. Однако, если дефект находится между первой и второй приёмной катушкой, то ситуация может сложиться таким образом, что в первую приёмную катушку придёт исследуемая нами доменная граница с конца микропровода, а во вторую и третью приёмные катушки – доменная граница с дефекта. Такое измерение будет не некорректным. Однако, с точки зрения наблюдателя, на экране осциллографа порядок пиков не поменяется, т.е. детектировать наличие состояния мультидоменности – невозможно. Чтобы избежать подобных ситуаций, автором был собран третий приёмный модуль, который состоит из восьми приёмных катушек (рис 2.4.-6).

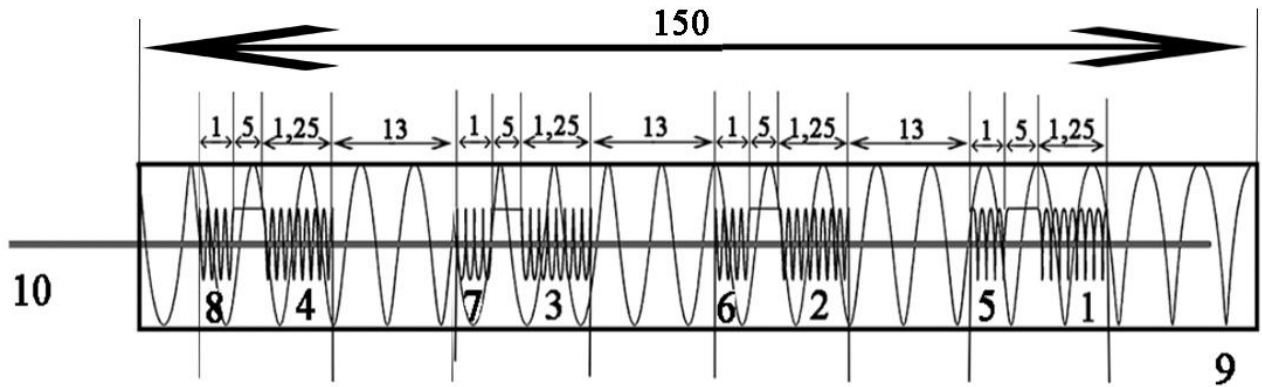


рис. 2.4.-6. Схематичное изображение измерительного модуля, включающего в себя третий приёмный модуль, состоящий из восьми катушек, собранный автором: 1, 2, 3, 4 – основные приёмные катушки; 5, 6, 7, 8 – дополнительные приёмные катушки, соединенные последовательно с основными; 9 – намагничивающий соленоид; 10 – исследуемый образец.

Технические характеристики третьего приёмного модуля:

- число основных приёмных катушек: 4;
- число дополнительных приёмных катушек: 4;
- расстояние между приёмными катушками: 19 мм;
- расстояние между основной и дополнительной приёмными катушками: 5 мм;
- длина основной приёмной катушки: 1,25 мм;
- диаметр приёмной катушки: 1,2 мм;
- длина дополнительной приёмной катушки: 1 мм;
- диаметр приёмной катушки: 1,2 мм;
- число витков основной приёмной катушки: 70;
- число витков основной приёмной катушки: 20;
- диаметр медного провода намотки: 0,1 мм;
- длина капилляра: 210 мм;
- диаметр капилляра: 1 мм.

Число основных приёмных катушек не изменилось. Однако, к каждой приёмной катушке была намотана последовательно ещё одна дополнительная катушка, которая имела меньшее число витков. Т.к. значение электродвижущей силы зависит от числа витков контура, через который меняется магнитный поток:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{Nd\Phi_1}{dt}, \quad (4.1)$$

где Φ_1 – магнитный поток, проходящий через один виток, то пик ЭДС, индуцируемый в основной приёмной катушке, будет больше, чем пик ЭДС, индуцируемый в дополнительной приёмной катушке. Теперь доменная граница, проходя через приёмный модуль, за одно измерение будет оставлять на экране осциллографа не три пика ЭДС, а шесть (рис 2.4.-7):

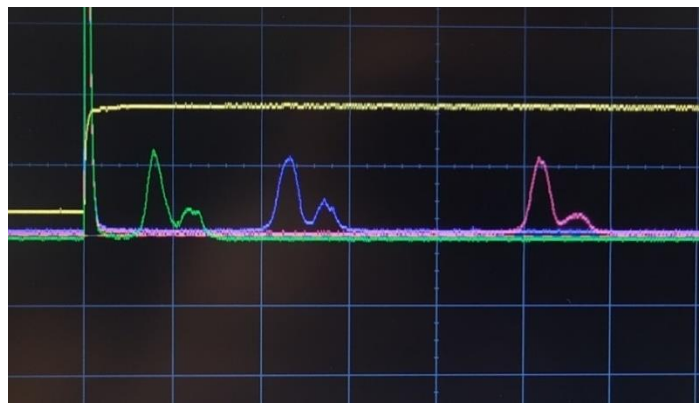


рис. 2.4.-7. Пики ЭДС, индуцируемые движением доменной границы в третьем приёмном модуле в процессе перемагничивания микропровода.

Таким образом, если провод переходит в состояние мультидоменности и доменная граница приходит с другой стороны, то порядок пиков «большой» и «маленький» меняется на «маленький» и «большой», т.е. явление возникновения мультидоменности в микропроводе может быть зафиксировано разработанным приёмным модулем раньше, чем предшествующей модификацией.

Глава 3. Особенности динамики движения доменной стенки типа head-to-head в микропроводах из сплава на основе Fe

3.1. Полевые зависимости скорости движения доменной границы, полученные на различных измерительных модулях

Первая задача, поставленная в данной работе перед автором, заключалась в разработке методики определения типа движения (ускоренное, равномерное) доменной стенки в ферромагнитных бистабильных аморфных микропроводах на основе железа, посредством распространения которой вдоль оси микропровода происходит перемагничивание.

Все измерения, результаты которых представлены в этой главе, были проведены на двух модулях. Остальные приёмные модули будут использоваться в дальнейших исследованиях автором в период обучения в магистратуре.

Первым этапом было исследовано влияние передвижения микропровода относительно неподвижного намагничивающего соленоида и приёмного модуля на результаты измерения полевой зависимости скорости движения доменной границы (рис 3.1.-1).

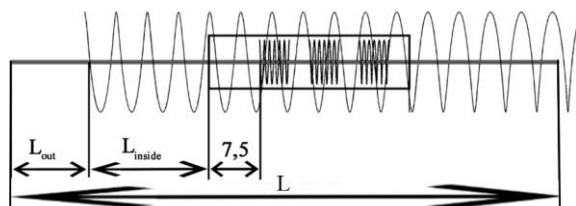


рис. 3.1.-1. Схематическое изображение взаимного расположения приёмного модуля, намагничивающего соленоида и исследуемого образца. L — длина исследуемого образца; L_{inside} — расстояние от начала приёмного модуля до начала намагничивающего соленоида; L_{out} — расстояние от конца микропровода, находящегося вне намагничивающего соленоида, до начала намагничивающего соленоида; 7,5 — расстояние от начала приёмного модуля до начала приёмной катушки, дано в миллиметрах.

В процессе измерений менялось положение микропровода относительно намагничивающего соленоида и приёмного модуля посредством изменения значения L_{out} , то есть микропровод постепенно и аккуратно вытягивался из капилляра приёмного модуля на максимальную величину 62 мм. График полученных значений скорости в зависимости от значения внешнего магнитного поля для различных значений L_{out} представлен на рис. 3.1.-2, 3.1.-3 для одного из образцов микроровода. При уменьшении величины L_{out} от 62 мм до 30 мм значение скорости движения доменной границы на участке между первой и второй приёмными катушками меняется незначительно.

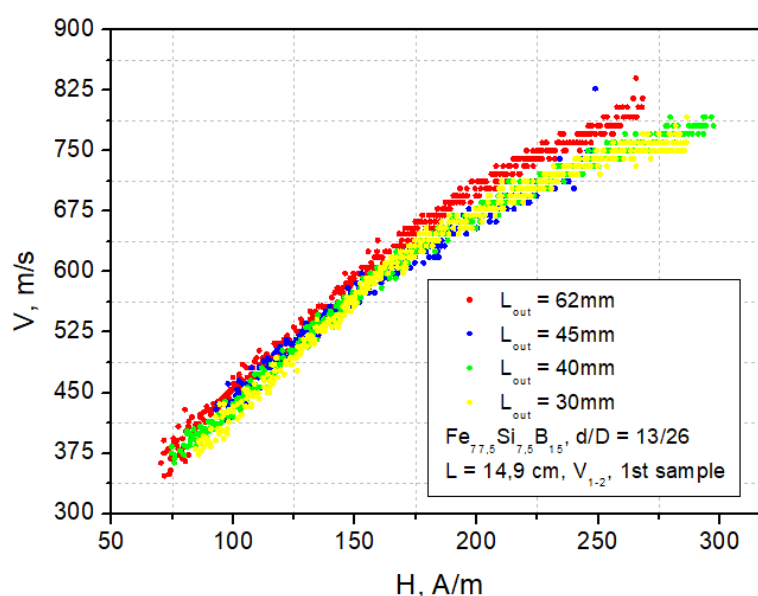


рис. 3.1.-2. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй приёмными катушками, в зависимости от значения внешнего магнитного поля для различных значений L_{out} .

В отличие от скорости доменной стенки, измеренной на участке между первой и второй приёмными катушками, значение скорости движения доменной границы, измеренной на участке между второй и третьей приёмными катушками, увеличивается с уменьшением L_{out} (рис 3.1.-2), то есть угол наклона полевой зависимости скорости – увеличивается.

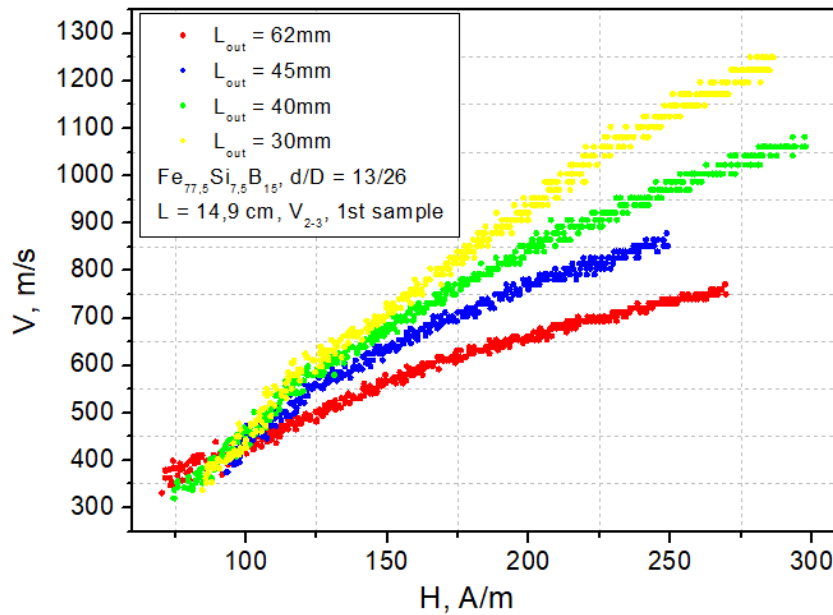


рис. 3.1.-3. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между второй и третьей приёмными катушками, в зависимости от значения внешнего магнитного поля при различных значениях L_{out} .

Данным способом был измерен один микропровод. Наличие ускорения в данном случае (увеличение наклона полевой зависимости, измеренной между катушками 2 и 3) связывается с наличием дефектов в металлической жиле микропровода на том его участке, который попадает в область измерения при перемещении микропровода [22]. Однако, это может быть связано также с появлением напряжения в проводе при его смещении, например, при изгибе. Для формирования окончательных выводов необходимы повторные измерения, а также измерение распределения полей зарождения доменов вдоль оси микропровода. Далее протокол измерения был изменен, т.к. данный процесс измерений сложен в исполнении: в процессе измерения легко деформировать и/или порвать образец.

Рассмотрим несколько образцов провода и сравним изменение полевой зависимости скорости движения доменной стенки, измеренной между разными парами приемных катушек в приёмном модуле. В данном блоке было измерено 26 образцов состава $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ с диаметрами $d/D = 13/26$. Ниже представлены результаты измерения скорости движения доменной границы в зависимости от

внешнего поля, измеренной между первой и второй, и второй и третьей приёмными катушками. Типичные зависимости для различных типов движения доменной границы в процессе перемещения микропровода представлены на рис. 3.1.-3, рис. 3.1.-4, рис. 3.1.-5. На образце №1 обнаружено ускоренное движение доменной границы, посредством быстрого распространения которой происходит перемещение микропровода. Об этом свидетельствует увеличение угла наклона полевой зависимости скорости движения доменной стенки, измеренной между приёмными катушками 2 и 3, по сравнению со скоростью, измеренной между приёмными катушками 1 и 2.

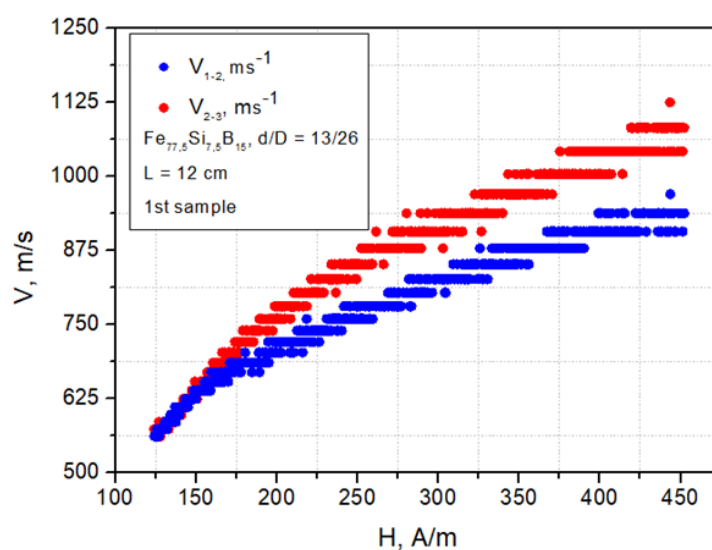


рис. 3.1.-3. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, в зависимости от значения внешнего магнитного поля, образец №1.

На образце №5 ускоренного движения доменной границы обнаружено не было. Движение было равномерным. Об этом говорит совпадение скоростей, измеренных между разными парами приёмных катушек, при каждом значении внешнего магнитного поля в диапазоне от 95 до 264 А/м.

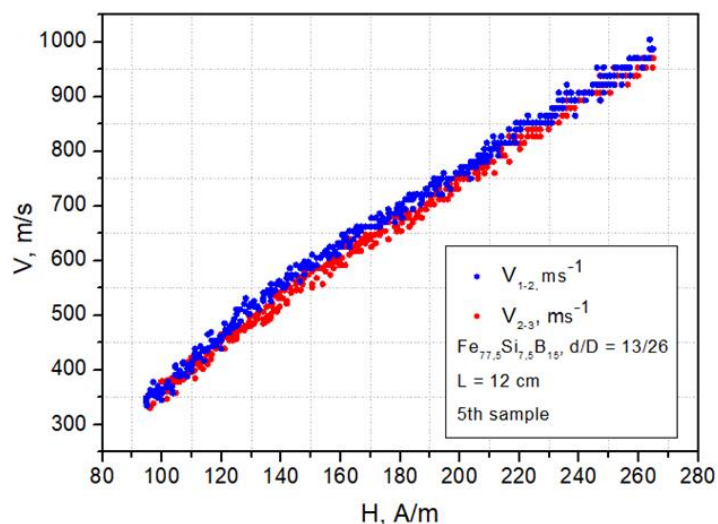


рис. 3.1.-4. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, в зависимости от значения внешнего магнитного поля, образец №5.

На образце №8 обнаружено замедленное движение доменной границы в процессе перемагничивания микропровода. Об этом свидетельствует уменьшение угла наклона полевой зависимости скорости движения доменной стенки, измеренной между приёмными катушками 2 и 3.

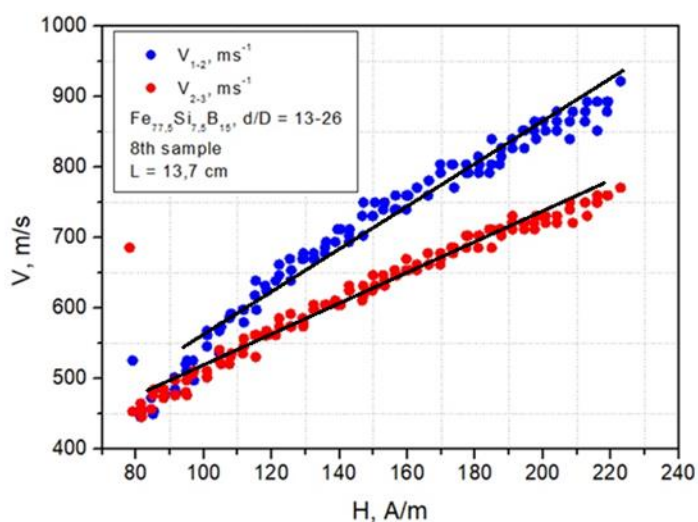


рис. 3.1.-5. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, в зависимости от значения внешнего магнитного поля, образец №8.

Все образцы можно разделить на три группы: в первой группе на образцах обнаружено ускоренное движение, во второй - равномерное и в третьей - замедленное движение. Выше представлены типичные зависимости скорости для каждой из групп (образец №1, №5 и №8, соответственно). Различный характер движения доменной границы на разных образцах можно объяснить наличием или отсутствием локальных дефектов по длине микропровода [22]. Локальные дефекты в микропроводах могут быть различной природы: локальное изменение состава, изменение диаметра микропровода, наличие дефекта на интерфейсе металл-стекло и другие [2].

На образцах состава $\text{Fe}_{77}\text{Si}_{10}\text{B}_{10}\text{C}_3$ с диаметрами $d/D = 20/22$ ускорения обнаружено не было. На рис. 3.1.-6, 3.1.-7 представлены типичные зависимости скорости движения доменной границы от внешнего поля для данных образцов. Видно, что скорость движения доменной границы, измеренная между первой и второй приёмными катушками, и скорость движения, измеренная между второй и третьей катушками, одинаковы.

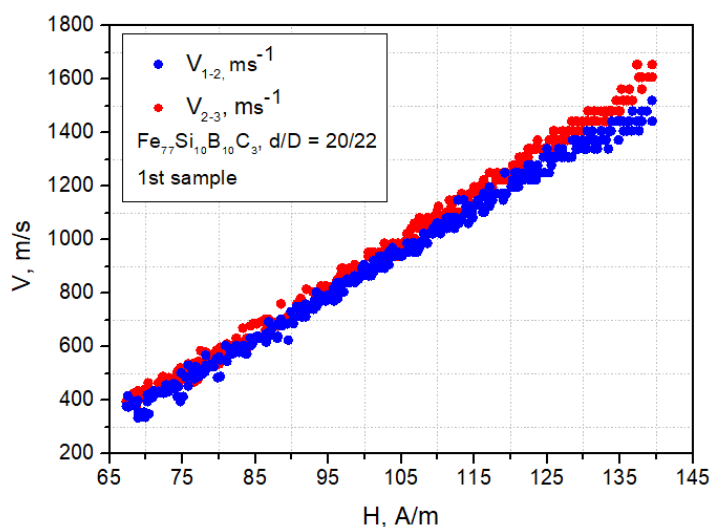


рис. 3.1.-6. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, в зависимости от значения внешнего магнитного поля, образец №1.

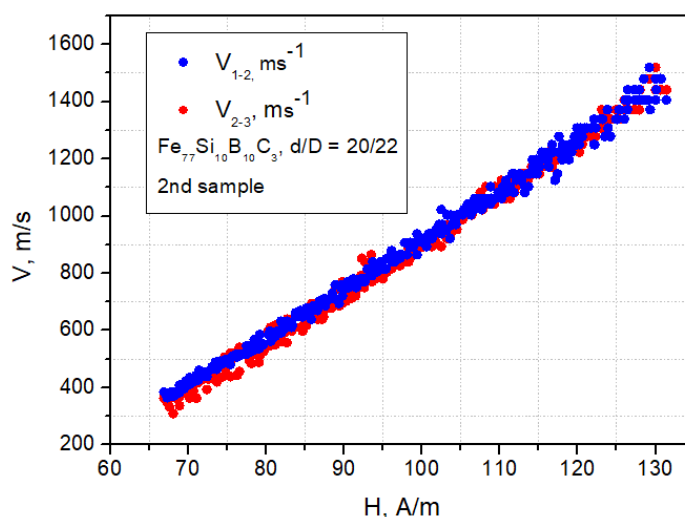


рис. 3.1.-7. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, в зависимости от значения внешнего магнитного поля, образец №2.

Всего образцов данного состава было измерено пять: во всех из них доменная граница движется равномерно по длине микропровода. Равномерное движение доменной границы на образцах данного состава (рис 3.1.-6, 3.1.-7) можно объяснить малыми размерами локальных дефектов микропровода. Если дефекты слишком малы, то их влияние на процесс движения доменной стенки незначительно.

Вторым этапом было исследование изменения полевой зависимости скорости движения доменной границы при перемещении приёмного модуля относительно неподвижного намагничивающего соленоида и исследуемого образца, то есть, согласно рис. 3.1.-1, изменялась величина L_{inside} . На рис 3.1.-8 схематично изображено положение приёмного модуля относительно соленоида и исследуемого образца. Размеры приемного модуля, отображенного для удобства линиями разных цветов в зависимости от значений L_{inside} , а также размеры приемных катушек на нем (черные сплошные овалы), - приведены в масштабе по горизонтальной оси.

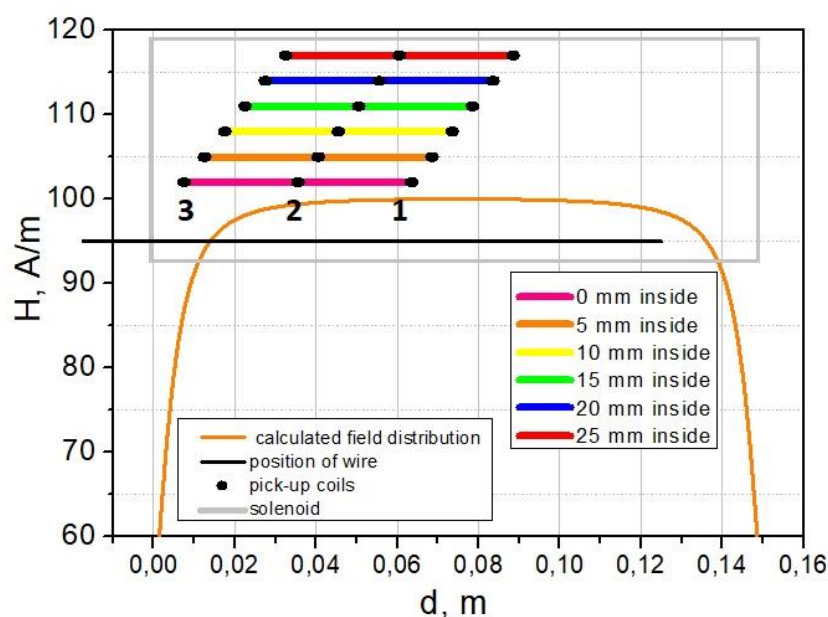


рис. 3.1.-8. Схематичное изображение взаимного расположения приёмного модуля (цветные линии), намагничивающего соленоида (серый прямоугольник) и исследуемого образца (черная линия), здесь 1, 2, 3 – приёмные катушки. Оранжевая линия – распределение значения модуля магнитной индукции на центральной оси соленоида, полученное численным методом с использованием программы, написанной на языке программирования C++.

Каждое схематическое изображение приёмного модуля при конкретном его положении относительно намагничивающего соленоида и образца окрашено в конкретный цвет. Для удобства анализа полученных данных, график зависимости скорости доменной границы от внешнего магнитного поля окрашен в тот же цвет, что и схематическое изображение приёмного модуля в конкретном положении. Ниже представлены графики зависимости скорости движения доменной границы от внешнего магнитного поля для образцов состава $Fe_{77,5}Si_{7,5}V_{15}$ с диаметрами $d/D = 13/26$ для различных величин L_{inside} . Всего было промерено 8 образцов.

На рис. 3.1.-9, 3.1.-10 представлены графики зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, для образца №2. Как видно из рисунков, при движении приёмного модуля с приёмными катушками вдоль образца от

значения $L_{\text{inside}} = 20$ мм до $L_{\text{inside}} = 0$ мм с шагом 5 мм, скорость движения доменной границы практически не меняется: доменная граница движется равномерно. График зависимости скорости движения доменной границы для значения $L_{\text{inside}} = 5$ мм для данного образца не представлен, т.к. при перемещении приёмных катушек от значения $L_{\text{inside}} = 10$ мм к значению $L_{\text{inside}} = 5$ мм образец порвался.

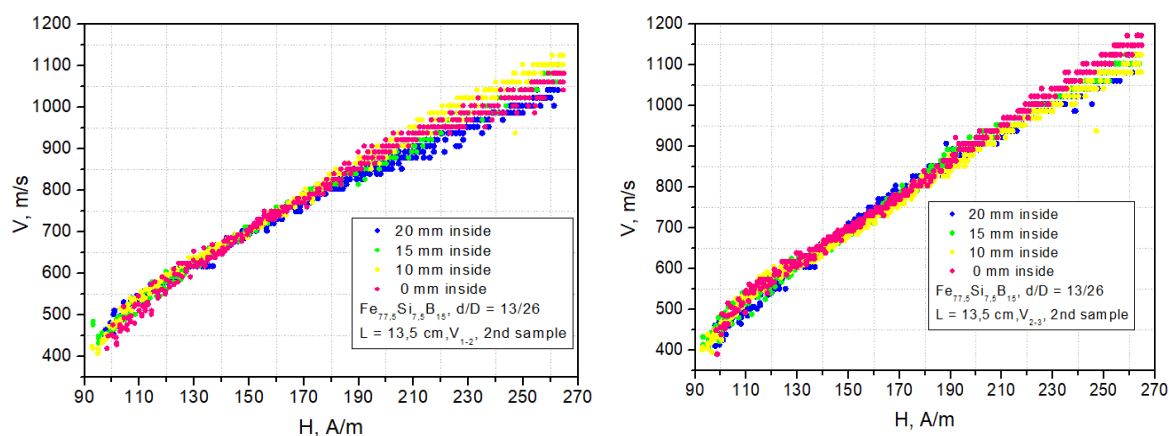


рис 3.1.-9., 3.1.-10. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, от внешнего поля для различных положений приёмного модуля, образец №2.

На рис 3.1.-11, 3.1.-12 представлены графики зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, для образца №5. При движении приёмного модуля с приёмными катушками вдоль образца от значения $L_{\text{inside}} = 20$ мм до $L_{\text{inside}} = 0$ мм с шагом 5 мм, скорость движения доменной границы на участке между первой и второй приёмными катушками уменьшается. Что касается участка между второй и третьей приёмными катушками, то при их движении вдоль образца скорость движения доменной границы сначала уменьшается (для значений L_{inside} 20 и 15 мм), а потом увеличивается. Скорее всего, такое изменение скорости связано с наличием дефекта [22]. Для подтверждения будут получены распределения поля зарождения доменной стенки по длине микропровода.

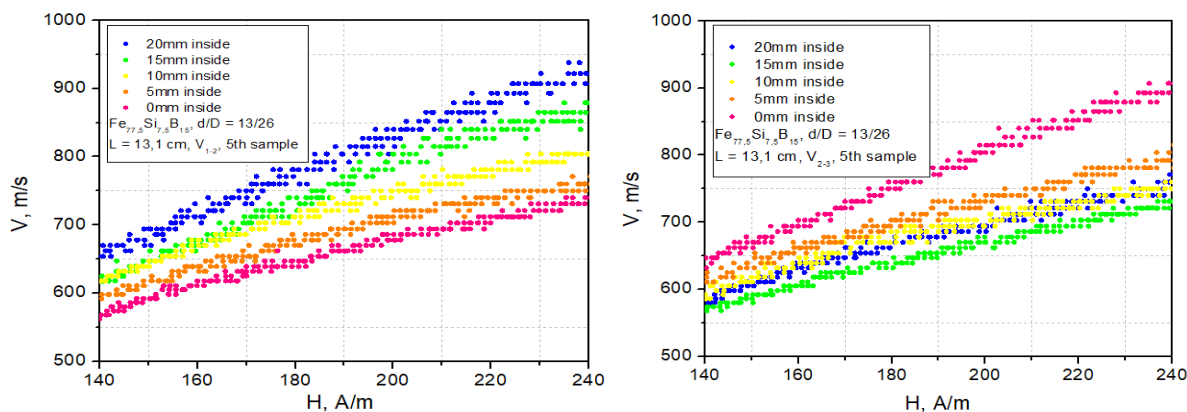


рис 3.1.-11., 3.1.-12. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, от внешнего поля для различных положений приёмного модуля, образец №5.

На рис 3.1.-13., 3.1.-14 представлены графики зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, для образца №6. Согласно данным зависимостям, при движении приёмного модуля с приёмными катушками вдоль образца от значения $L_{\text{inside}} = 20$ мм до $L_{\text{inside}} = 0$ мм с шагом 5 мм, скорость движения доменной границы на участке между первой и второй приёмными катушками уменьшается, а на участке между второй и третьей – увеличивается.

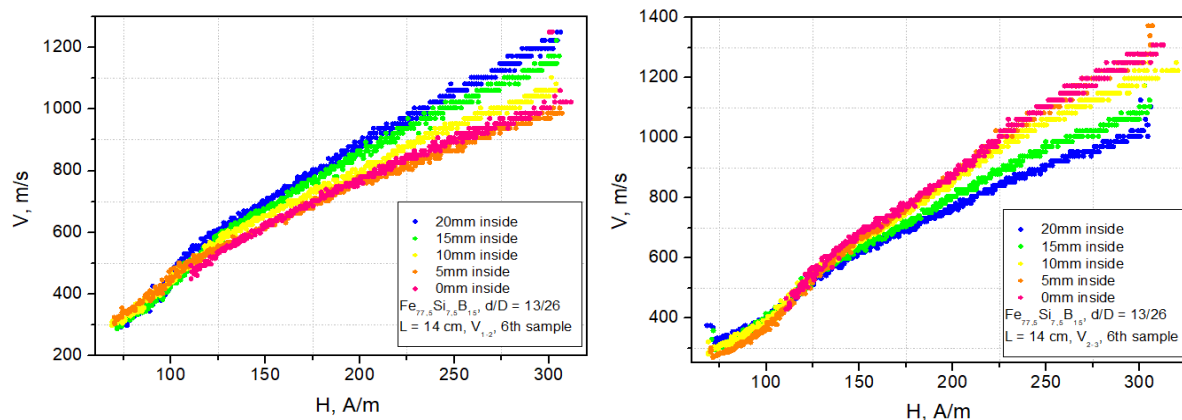


рис 3.1.-13., 3.1.-14. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, от внешнего поля для различных положений приёмного модуля, образец №6.

На рис 3.1.-15., 3.1.-16 представлены графики зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, для образца №7. Согласно данным зависимостям, при движении приёмного модуля с приёмными катушками вдоль образца от значения $L_{\text{inside}} = 25$ мм до $L_{\text{inside}} = 0$ мм с шагом 5 мм, скорость движения доменной границы на участке между первой и второй приёмными катушками меняется неодинаково: плавное уменьшение скорости наблюдается от значения $L_{\text{inside}} = 20$ мм до $L_{\text{inside}} = 5$ мм, в то время как при переходе от $L_{\text{inside}} = 25$ мм к $L_{\text{inside}} = 20$ мм, а также от $L_{\text{inside}} = 5$ мм к $L_{\text{inside}} = 0$ мм, наблюдаются резкое уменьшение скорости. На участке между второй и третьей приёмными катушками наблюдается плавный, едва заметный рост скорости движения доменной границы при движении приёмных катушек вдоль образца от значения $L_{\text{inside}} = 25$ мм до $L_{\text{inside}} = 0$ мм.

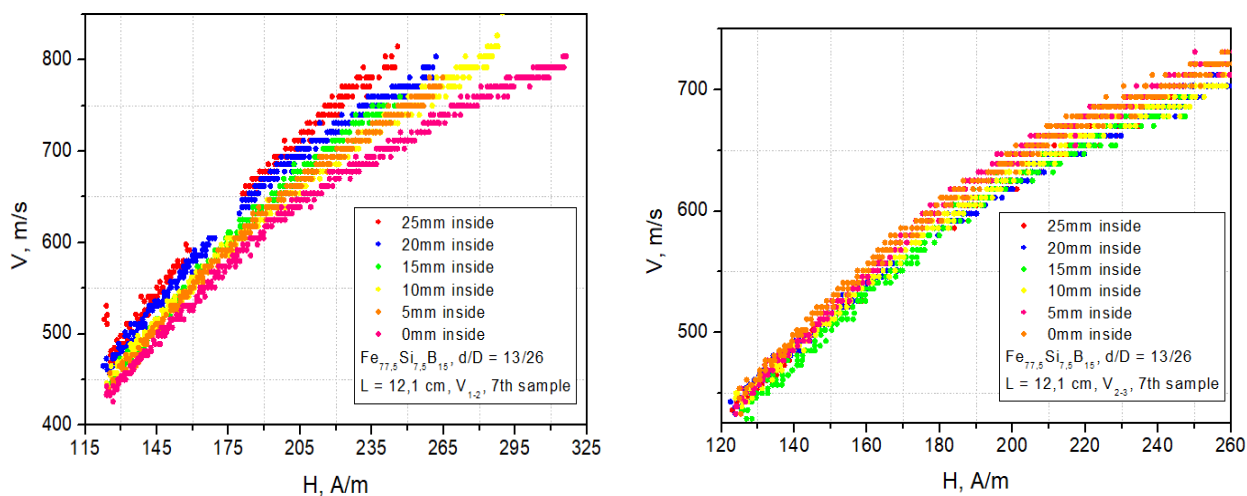


рис 3.1.-15., 3.1.-16. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками, от внешнего поля

для различных положений приёмного модуля, образец №7.

Анализируя результаты измерений, представленные в этом блоке, можно прийти к выводу, что даже в одном образце в процессе перемещения типа движения доменной границы может меняться при измерении скорости на

различных его участках за счет изменения распределения локальных дефектов по его длине (аналогичный результаты был получен при изменении величины L_{out}): в некоторых работах изменение скорости движения доменной границы связывают с влиянием локальных дефектов на процесс перемагничивания микропровода [22]. Однако, объяснение может быть связано с изменением внешнего магнитного поля соленоида (появление перпендикулярной оси провода компоненты) вблизи его концов (оранжевая линия на рисунке 3.1-8). Для окончательного заключения необходимо провести дополнительные измерения, а именно, получить распределение полей зарождения доменов вдоль оси микропровода, а также исследовать влияние магнитного поля, направленного перпендикулярно оси провода, на тип движения доменной границы.

Третий блок измерений проводился на втором приёмном модуле, собранном автором. Приёмный модуль состоит из четырёх приёмных катушек, следовательно, каждый график содержит результаты трех измерений: скорость между первой и второй приёмными катушками (зелёный цвет), скорость между второй и третьей приёмными катушками (синий цвет) и скорость между третьей и четвертой приёмными катушками (красный цвет).

На рис. 3.1.-17 представлены графики зависимости скорости движения доменной границы для образцов №1 и №9. На графиках видно, что скорость движения доменной границы, измеренная между первой и второй катушками и катушками с номерами 3 и 4, больше, чем скорость движения, измеренная между второй и третьей катушками. Из этого следует, что доменная граница в процессе перемагничивания двигалась как замедленно, так и ускоренно, причём, судя по величине изменения наклона полевой зависимости скорости, эти ускорения равны по модулю.

На рис. 3.1.-18 представлен график полевой зависимости скорости движения доменной границы для образца №2. На графике видно, что максимальную скорость движения доменная граница имела между третьей и

четвёртой приёмной катушкой, а минимальную – между второй и третьей. Значения скорости доменной границы на этих участках свидетельствуют о том, что сначала доменная граница двигалась замедленно, а, затем, ускоренно, причём, судя по величине изменения наклона полевой зависимости скорости, абсолютное значение положительного ускорения больше отрицательного.

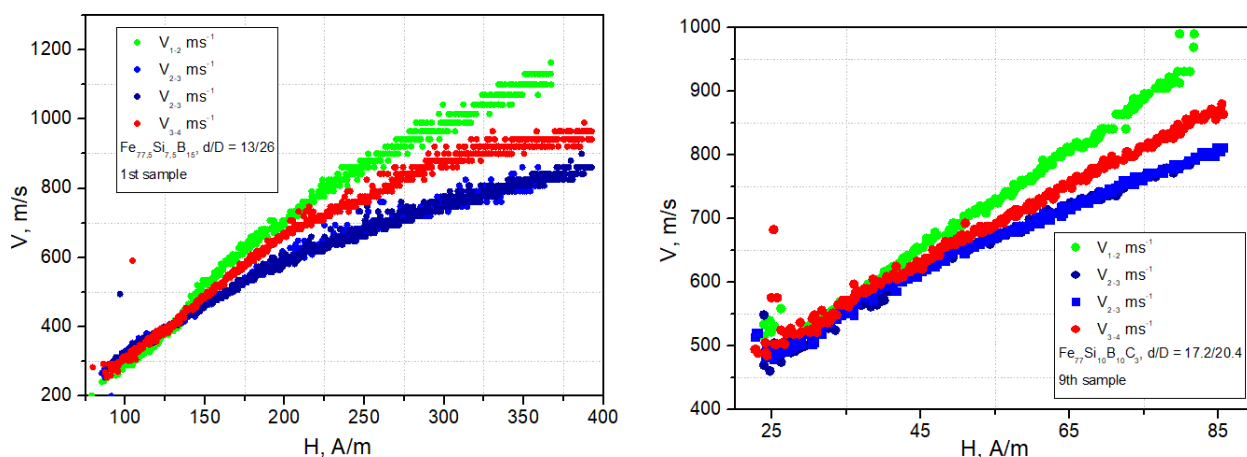


рис 3.1.-17. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей, третьей и четвёртой приёмными катушками, от внешнего магнитного поля, образцы №1 (слева) и №9 (справа).

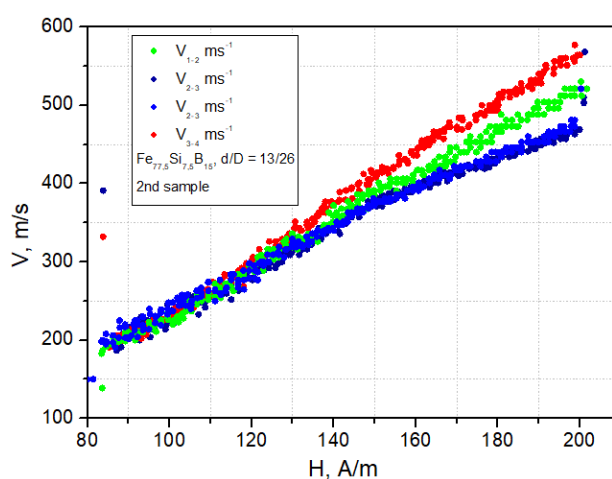


рис 3.1.-18. График зависимости скорости движения доменной границы, измеренной между первой и второй, второй и третьей, третьей и четвёртой приёмными катушками, от внешнего поля, образец №2.

Таким образом, анализируя результаты измерений, представленные в этом блоке, можно прийти к выводу о том, что доменная граница на одних участках микропровода движется ускоренно, а на других - замедленно. Ускоренное движение доменной границы предположительно связано с наличием локальных дефектов в микропроводе [22]. Для установления причин замедленного и равномерного движения доменной границы в каждой серии образцов планируется проводить дальнейшие исследования при работе в рамках подготовки магистерской диссертации.

Были разработаны, собраны и апробированы приёмные модули для установки по измерению скорости движения доменной границы в процессе его перемагничивания, которые позволяют исследовать не усреднённую скорость движения доменной границы, а рассматривать особенности движения доменной границы на различных участках микропровода.

3.2. Влияние поперечного магнитного поля на скорость движения доменной границы

Данный раздел дипломной работы посвящён исследованию влияния поперечного магнитного поля на движение доменной границы в процессе перемагничивания бистабильного микропровода. В роли источника магнитного поля, направленного перпендикулярно оси провода, использовался стальной магнитопровод с катушкой. Фотография установки представлена на рис. 3.2.-1.

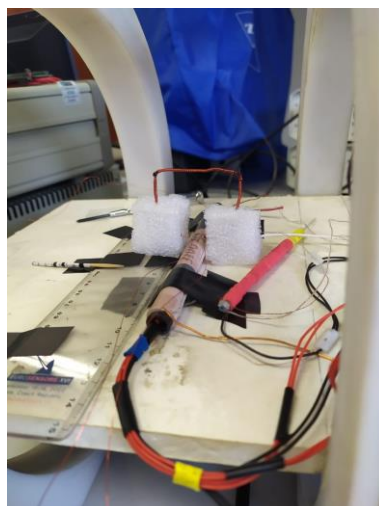


рис 3.2.-1. Фотография второго приёмного модуля, собранного автором, с источником поперечного магнитного поля.

Было обнаружено, что поперечное магнитное поле (5-50 А/м, эффективный радиус действия 2 мм) существенно влияет на скорость движения доменной границы в процессе перемагничивания. Схематичное изображение двух взаимных расположений измерительного модуля и источника поперечного магнитного поля представлено на рис. 3.2.-2 и рис. 3.2.-3.

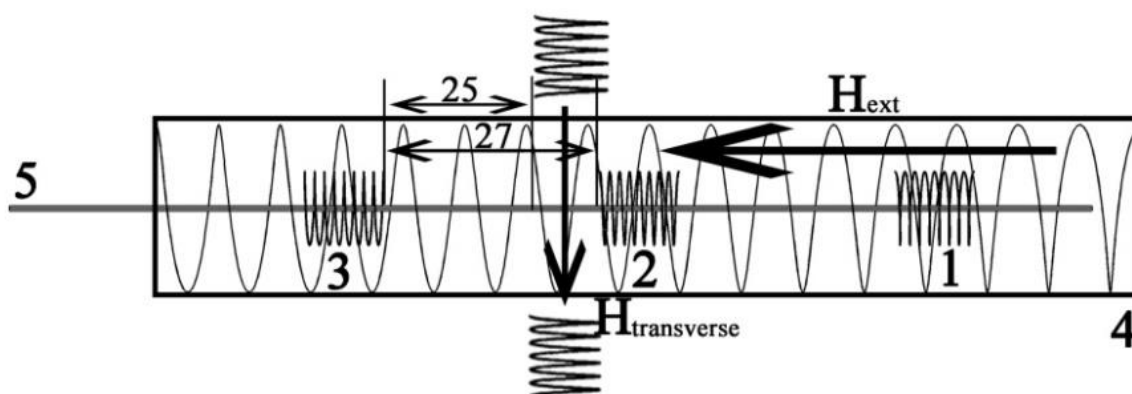


рис. 3.2.-2. Схематическое изображение первого взаимного расположения измерительного модуля и источника поперечного магнитного поля.

Числами на рисунке указано расстояние в миллиметрах.

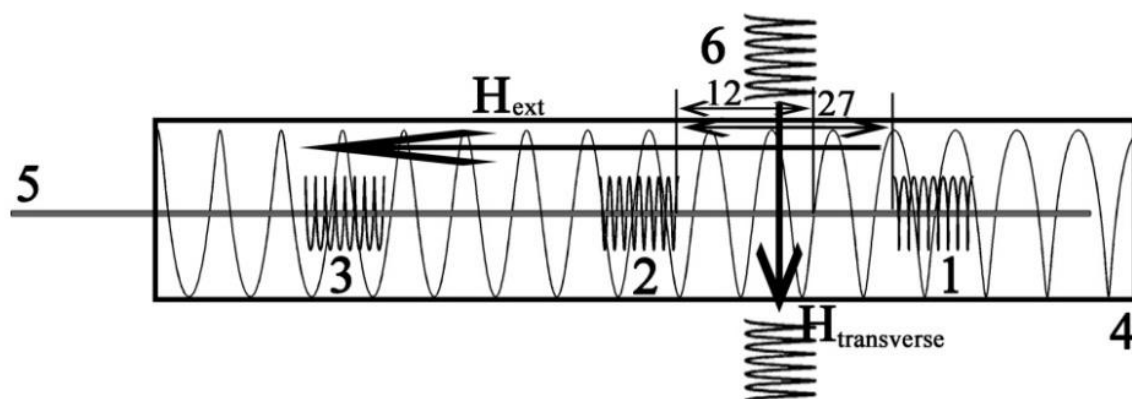


рис. 3.2.-3. Схематическое изображение второго взаимного расположения измерительного модуля и источника поперечного магнитного поля.

Числами на рисунке указано расстояние в миллиметрах.

Измерения, проведённые при положении модуля согласно рис. 3.2.-2, представлены на рис. 3.2.-4, рис. 3.2.-5, рис 3.2.-6. На рис. 3.2.-4 представлен график полевой зависимости скорости движения доменной границы для образца состава $\text{Fe}_{77}\text{B}_{10}\text{Si}_{10}\text{C}_3$ с отношением диаметров $d/D = 17.2/20.4$, измеренной на участке между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками. Ярко-синий и ярко-красный цвета соответствуют скорости движения доменной границы на участке между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками с приложенным поперечным магнитным полем, а тёмно-синий и тёмно-красный – в отсутствии дополнительно магнитного поля. На основании представленных на графике данных, можно сделать вывод о том, что при приложении поперечного магнитного поля скорость движения доменной границы на участке между первой и второй приёмными катушками уменьшается, а между второй и третьей (т.е. в области, где приложено поперечное поле) – увеличивается. В отсутствие поперечного магнитного поля доменная граница движется замедленно в процессе перемагничивания, при наличии поперечного магнитного поля – ускоренно.

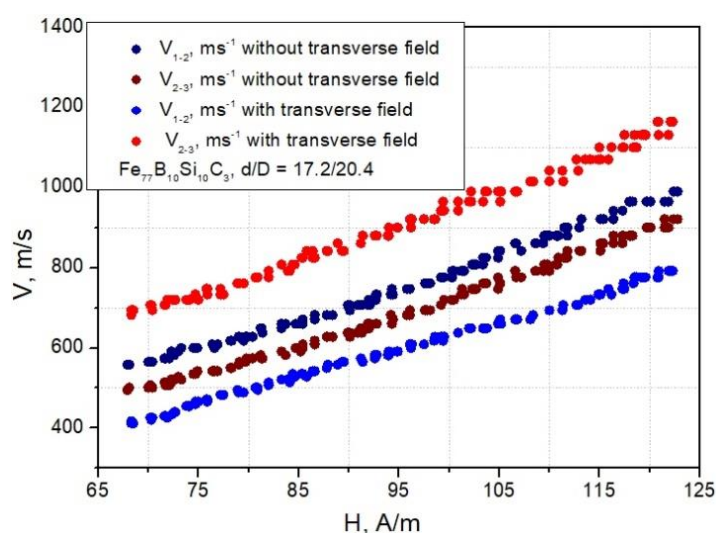


рис. 3.2.-4. График зависимости скорости движения доменной границы на участках между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками от внешнего поля для образца состава $\text{Fe}_{77}\text{B}_{10}\text{Si}_{10}\text{C}_3$, $d/D = 17.2/20.4$.

На рис. 3.2.-5 представлен график полевой зависимости скорости движения доменной границы для образца состава $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ с отношением

диаметров $d/D = 19/29$, измеренной на участке между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками. На графике видно, что при приложении поперечного магнитного поля скорость движения доменной границы на участке между первой и второй приёмными катушками уменьшается, а между второй и третьей - увеличивается. Стоит отметить, что поперечное магнитное поле не повлияло на тип движения: доменная стенка в обоих случаях двигалась ускоренно. Об этом свидетельствует увеличение скорости движения доменной стенки, измеренной между второй и третьей приёмными катушками по сравнению с результатами, полученными при измерении между первой и второй приёмными катушками, для каждого значения продольного внешнего магнитного поля.

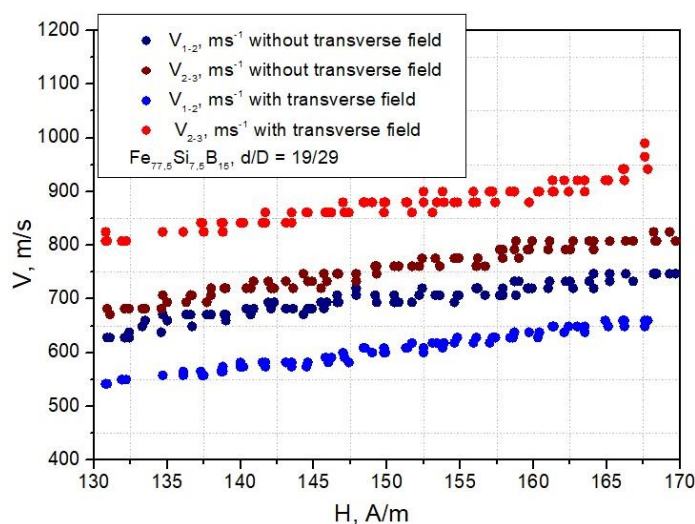


рис. 3.2.-5. График зависимости скорости движения доменной границы на участках между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками от внешнего поля для образца состава $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$, $d/D = 19/29$.

На рис. 3.2.-6 представлен график зависимости скорости движения доменной границы для образца состава $Fe_{47,42}Ni_{26,6}B_{12,99}Si_{11}C_{1,99}$ с отношением диаметров $d/D = 18.6/21.4$ на участке между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками. На графике видно, что при приложении поперечного магнитного поля скорость движения доменной границы на участке между первой и второй приёмными катушками уменьшается, а между второй и третьей - увеличивается. В отсутствие поперечного магнитного поля доменная

граница движется практически равномерно, а с приложенным поперечным полем – ускоренно.

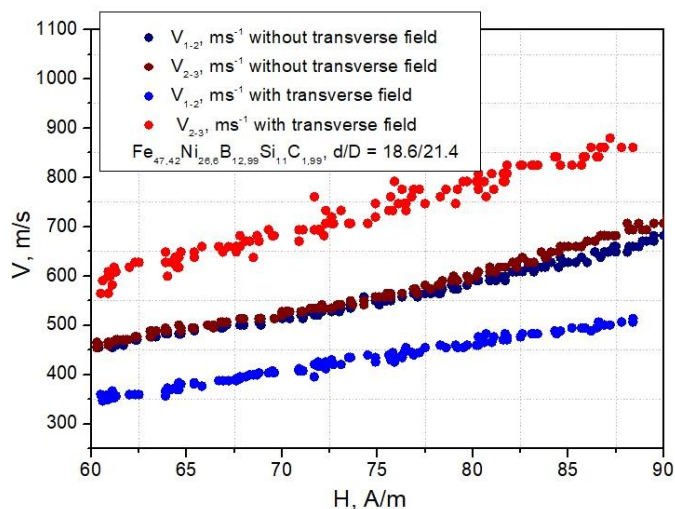


рис. 3.2.-6. График зависимости скорости движения доменной границы на участках между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками от внешнего поля для образца состава Fe_{47,42}Ni_{26,6}B_{12,99}Si₁₁C_{1,99}, d/D = 18.6/21.4.

Для всех измеренных образцов было установлено, что на интервале от начала своего движения до источника поперечного магнитного поля доменная граница сильно замедляется из-за наличия поперечного поля, а после прохождения градиентного по полю участка - ускоряется.

На рис. 3.2.-7 представлен график зависимости скорости движения доменной границы от внешнего магнитного поля при положении источника поперечного магнитного поля согласно рис. 3.2.-3 для образца состава Fe_{77,5}Si_{7,5}B₁₅ с отношением диаметров d/D = 13/26. На графике видно, что при приложении поперечного магнитного поля скорость движения доменной границы на участке между первой и второй приёмными катушками сильно уменьшается, а между второй и третьей – незначительно увеличивается. В отсутствии поперечного магнитного поля доменная граница движется замедленно. С приложенным поперечным магнитным полем доменная граница движется сначала ускоренно, но, при значении перемещающего поля соленоида 325 А/м, меняет свой тип движения и перемещается замедленно, т.е.,

при более высоких значениях перемещающего поля, поперечное магнитное поле уже не может влиять на движение доменной границы.

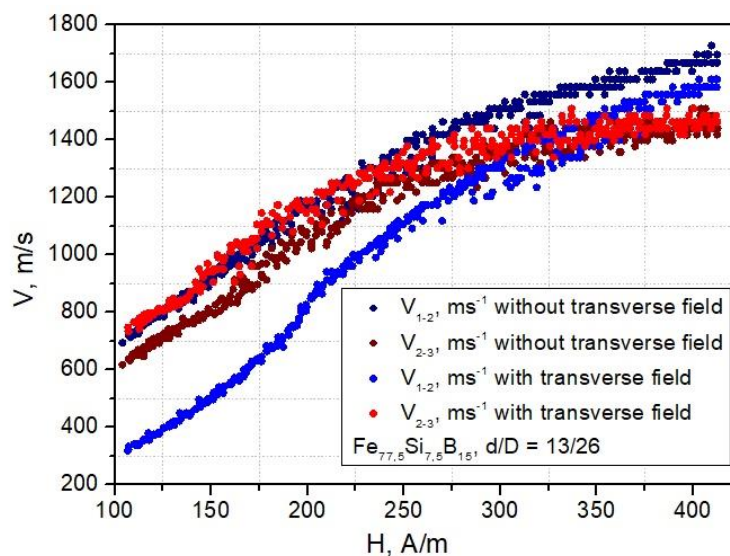


рис. 3.2.-7 График зависимости скорости движения доменной границы на участках между первой и второй, второй и третьей приёмными катушками от внешнего поля для образца состава $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$, $d/D = 13/26$.

Согласно рис. 3.2.-3, магнитное поле, приложенное перпендикулярно оси провода, находится между первой и второй приёмными катушками. Доменная граница на этом участке сильно замедляется, однако, на участке между второй и третьей приёмными катушками значительных изменений в значениях скорости движения доменной границы нет. По мере роста значения магнитного поля соленоида, влияние дополнительного магнитного поля на скорость движения доменной границы уменьшается. Это связано с тем, что, по мере роста значения перемещающего поля, увеличивается скорость доменной границы при вхождении ее в область микропровода, находящуюся под воздействием магнитного поля, приложенного перпендикулярно оси провода, так же, как и увеличивается энергия стенки, поэтому влияние поперечного магнитного поля, значение которого не меняется, уменьшается.

Основные результаты

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

1) Разработаны, модифицированы и собраны три приёмных модуля для установки, с помощью которой проводят измерения полевых зависимостей скорости движения доменной границы типа head-to-head, посредством быстрого распространения которой происходит перемагничивание бистабильного микропровода. Благодаря наличию дополнительных приемных катушек, распложенных определенным образом, модифицированные приемные модули позволяют установить как тип движения доменной границы (равномерное, ускоренное или замедленное), так и определить величину магнитного поля, при котором микропровод переходит в мультидоменное состояние.

2) Исследованы полевые зависимости скорости движения доменной границы и установлен тип движения: обнаружено ускоренное, равномерное и замедленное движение доменной границы в микропроводах с металлической жилой составов $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$, $\text{Fe}_{77}\text{Si}_{10}\text{B}_{10}\text{C}_3$, $\text{Fe}_{47,42}\text{Ni}_{26,6}\text{B}_{12,99}\text{Si}_{11}\text{C}_{1,99}$ с различными поперечными размерами. Предложено феноменологическое объяснение ускоренного движения, учитывающее влияние локальных дефектов на формирование магнитных свойств микропровода.

3) Исследовано влияние магнитного поля, приложенного перпендикулярно оси микропровода, на движение доменной границы, а именно – на полевые зависимости скорости ее распространения. Установлено, что дополнительное магнитное поле оказывает существенное влияние: на интервале от начала своего движения до источника магнитного поля доменная граница сильно замедляется, а после прохождения градиентного по полю участка – ускоряется.

Результаты данной работы послужат основой для дальнейших исследований, которые помогут глубже понять процесс перемагничивания бистабильных микропроводов, что, в свою очередь, несомненно, сыграет

большую роль при создании композитных материалов с заданными свойствами, которые будут лучше отвечать требованиям создания современной магнитной памяти, магнитных переключателей, а также магнитных логических элементов.

Список использованной литературы

- [1] Боровик Е.С., Еременко В.В., Мильнер А.С. Лекции по магнетизму. // Москва: ФИЗМАЛИТ, 2005. -512 с.
- [2] Zhukov A., Zhukova V. Magnetic properties and applications of ferromagnetic microwires with amorphous and nanocrystalline structure // NY: Nova Science Publishers, Inc., (2009).
- [3] Чеченин Н.Г. Магнитные наноструктуры и их применение. // Москва: Грант Виктория ТК, 2006. – 166 с.
- [4] Вонсовский С.В. Магнетизм. // Москва: Наука, 1971. -1032 с.
- [5] Panina L.V., Ipatov M., Zhukova V., Zhukov A. Domain wall propagation in Fe-rich amorphous microwires // Physica B 407 (2012) 1442-1445
- [6] Estevez V., Laurson L. Head-to-head domain wall structures in wide permalloy strips // Physical Review B 91, 054407 (2015)
- [7] Волков В.В.. Боков В.А. Динамика доменной стенки в ферромагнетиках (Обзор) // Физика твердого тела, 2008, том 50, вып. 2
- [8] Белов К.П. Эффекты парапроцесса в ферримагнетиках и антиферромагнетиках // Москва: ФИЗМАЛИТ, 2001. -80 с.
- [9] Sixtus K.J., Tonks L. Propagation of Large Barkhausen Discontinuities. II // Physical Review Volume 42 (1932)
- [10] Tibu M., Lostun M., Ovari T.-A., Chiriac H. Simultaneous magneto-optical Kerr effect and Sixtus-Tonks method for analyzing the shape of propagating domain walls in ultrathin magnetic wires // Review of scientific instruments 83, 064708 (2012)
- [11] Geoffreys D.B., Corneliu N., Knutson C., Tsoi M. and Erskine J.L. Dynamics of field-driven domain-wall propagation in ferromagnetic nanowires // Nature materials VOL 4 (2005)
- [12] Varga R., Zhukov A., Blanco J. M. and Ipatov M. Fast magnetic domain wall in magnetic microwires // Physical Review B 74, 212405 (2006)
- [13] Varga R., Zhukov A., Zhukova V., Blanco J. M. and Gonzalez J. Supersonic domain wall in magnetic microwires // Physical Review B 76, 132406 (2007)

- [14] Родионова В.В. Статические и динамические магнитные свойства аморфных микропроводов и их систем // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Москва. (2010).
- [15] Zhukov A. Design of the magnetic properties of Fe-rich, glass-coated microwires for technical applications // *Advanced Functional Materials*.–V.16.–N.5.–P.675-680 (2006)
- [16] Onufer J., Ziman J., Duranka P., Kladvivova M. The influence of annealing on domain wall propagation in bistable amorphous microwire with unidirectional effect // *Physica B*, 310827 (2018)
- [17] Corte-León P., Blanco J. M., Zhukova V., Ipatov M., Gonzalez J., Churyukanova M., Taskaev S., Zhukov A. Engineering of Magnetic Softness and Domain Wall Dynamics of fe-rich Amorphous Microwires by Stress- induced Magnetic Anisotropy // *Scientific Reports* 9:12427 (2019)
- [18] Zhukov A., Ekstrom P.A. Spatial structure of the head-to-head propagating domain wall in glass-covered FeSiB microwire // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43 205001 (6pp) (2010)
- [19] Corte-León P., Blanco J.M., Zhukova V., Ipatov M., Churyukanova M., Taskaev S., Zhukov A. Grading the magnetic anisotropy and engineering the domain wall dynamics in Fe-rich microwires by stress-annealing // *Acta Materialia* 155 279-285 (2018)
- [20] Zhukov A., Cobeno A.F., Gonzalez J., Blanco J.M., Aragonese P., Dominguez L. Magnetoelastic sensor of liquid level based on magnetoelastic properties of Co-rich microwires // *Sensors and Actuators* 81 129–133 (2000)
- [21] Vazquez M., Hernando A. A soft magnetic wire for sensor applications // *Journal of Physics D: Applied Physics*.–V.29.–N.4.–P.939-949 (1996)
- [22] Rodionova V., Zhukova V., Ilyn M., Ipatov M., Perov N., Zhukov A., The defects influence on domain wall propagation in bistable glass-coated microwires // *Physica B* 407 1446-1449 (2012)

- [23] Ipatov M. Studies of magnetic properties of amorphous microwires with high technological interest, Dissertation to opt for the degree of Doctor of Science. - San Sebastián, 2008.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Tremolet de Lacheisserie E. Magnetostriction. Theory and applications of magnetoelasticity.–Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1993.–430 p.
- [27] Himenez A., Rafael P. del Real, Vazquez M. Controlling depinning and propagation of single domain-walls in magnetic microwires // *Eur. Phys. J. B* 86: 113 (2013)
- [28] Gudoshnikov S.A., Grebenshchikov Yu.B., Ljubimov B.Ya., Palvanov P.S., Usov N.A., Ipatov M., Zhukov A., Gonzalez J. Ground state magnetization distribution and characteristic width of head to head domain wall in Fe-rich amorphous microwire // *Phys. Status Solidi A* 206, No. 4, 613–617 (2009)
- [29] 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.
- [30] 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 Magnetics*, 1990.