

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Колесниковой Валерии Григорьевны
«Исследование магнитных взаимодействий в гибких композитных системах с
нано- и микроразмерными ферромагнетиками», представленную на соискание
ученой степени кандидата физика-математических наук по специальности
1.3.12 Физика магнитных явлений

Гибкие магнитные нано- и микрокомпозиты являются перспективными материалами для создания устройств гибкой электроники, биомедицинских сенсоров и энергоэффективных систем. Исследование магнитных взаимодействий в таких системах позволяет разрабатывать материалы с управляемыми свойствами, что является очень важным как для повышения эффективности работы, так и для миниатюризации устройств на основе этих материалов. В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям особенностей влияния структуры и состава композитов на их магнитные характеристики, при этом наибольший интерес вызывают так называемые магнитоактивные эластомеры. В связи с этим диссертационная работа В.Г. Колесниковой, посвященная комплексному исследованию магнитостатических взаимодействий, структурных и магнитных свойств гибких композитных систем с нано- и микроразмерными ферромагнитными включениями является актуальной.

Диссертационная работа В.Г. Колесниковой состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 221 наименования. Общий объем работы составляет 118 страниц, включая 56 рисунков и 4 таблицы.

Первая глава посвящена описанию и обсуждению имеющихся литературных данных о магнитных свойствах ферромагнитных микропроводов и их систем, гибких полимерных композитов с магнитными нано- и микрочастицами, распределенными внутри полимерной матрицы. Особое внимание уделено работам, описывающим исследование магнитных взаимодействий посредством анализа частных кривых перемангничивания.

Во **второй главе** приведен перечень изучаемых материалов, их основные характеристики (состав, размеры), а также приведено описание

экспериментальных методик, которые были использованы для проведения исследований в диссертационной работе. Достаточно подробно описан метод FORC (First-Order Reversal Curve)-анализа, который является в работе одним из ключевых.

В третьей главе описаны экспериментальные исследования композита, состоящего из магнитостатически взаимодействующих микропроводов состава $\text{Fe}_{74}\text{B}_{13}\text{Si}_{11}\text{C}_2$. Показано, что помимо магнитостатического поля рассеяния со стороны соседнего намагниченного микропровода, значительный вклад в процесс перемагничивания системы вносит поле рассеяния концевых доменов, что приводит к смещению поля переключения на десятки А/м.

Четвертая глава посвящена исследованиям структурных и магнитных особенностей двухфазных микропроводов химического состава $\text{Fe}_{77.5}\text{B}_{15}\text{Si}_{7.5}$, в которых вторая магнитная фаза представлена в виде ассиметрично напыленной внешней магнитной оболочки нанометровой толщины, при этом в одном случае оболочка состоит из Co, а в другом из FeNi. Показано, что между магнитной жилой микропровода и внешней магнитной оболочкой взаимодействие отсутствует, но напыление дополнительного магнитного слоя на поверхность микропровода приводит к изменению его магнитных свойств за счет возникновения механических напряжений в такой системе. В данной главе также описан эксперимент, посвященный исследованию деформации двухфазного микропровода во внешнем магнитном поле.

Пятая глава посвящена исследованию магнитных взаимодействий в магнитоактивных эластомерах с железными микрочастицами и мультиферроидных полимерных композитах на основе пьезоактивного поливинилиденфторида (ПВДФ) с внедрёнными магнитными наночастицами. Основываясь на результатах FORC-анализа, были сделаны выводы о методах управления магнитными свойствами композитов через модификацию состава наночастиц (CoFe_2O_4 , $\text{Zn}_{0.25}\text{Co}_{0.75}\text{Fe}_2\text{O}_4$), введение сегнетоэлектрических добавок (BaTiO_3) и использование поверхностной функционализации наночастиц

полиэтиленгликолем. Полученные результаты демонстрируют возможность целенаправленного изменения диполь-дипольных взаимодействий, что подтверждается экспериментальными данными по сдвигу полей взаимодействия на величины ± 100 Э на FORC-диаграммах.

Научная новизна работы заключается в установлении механизмов магнитных взаимодействий в гибких композитных системах с иерархической структурой (микропровода, микро- и наночастицы) через исследование частных кривых перемагничивания. Практическая востребованность работы заключается в создании базиса для разработки новых функциональных материалов для гибкой электроники и спинтроники. Исследование сочетает фундаментальный анализ с конкретными прикладными решениями, открывая перспективы для создания материалов с программируемыми магнитными характеристиками.

Достоверность и обоснованность полученных диссертантом результатов подтверждается применением современных технологий и использованием современного высокоточного научного оборудования для характеристики структурных и магнитных свойств. Основные результаты работы были опубликованы в пяти международных научных журналах, представлены лично автором работы на всероссийских и международных конференциях в качестве устных и стендовых докладов. Текст автореферата и диссертационной работы написан корректно, и полностью отражает основные результаты исследований и их анализ.

Необходимо отметить, что диссертационная работа не лишена недостатков. В частности, по работе можно сделать следующие замечания:

- 1) При описании результатов магнитных измерений системы, состоящей из двух микропроводов (рис. 32), утверждается, что «Во втором проводе больший концевой домен сформирован с правой стороны, на что указывает прерывистое изменение намагниченности в промежуточной области поля при значениях $76 \text{ А/м} < H < 46 \text{ А/м}$ ». Во-первых, скорее всего имеется в виду интервал магнитных полей от 46 до 76 А/м, т.е. $46 \text{ А/м} < H < 76 \text{ А/м}$.

Во-вторых, не понятно, почему формирование концевой домена на левой стороне приводит к округлению левой части петли гистерезиса (насколько я могу судить по рис. 32, это петля, приведенная на левой части рисунка), а формирование концевой домена на правой стороне приводит не к округлению соответствующей петли гистерезиса, а к прерывистому изменению намагниченности (насколько я могу судить по рис. 32, имеется в виду прерывистое изменение намагниченности в окрестности $M/M_s \sim 0$ на петле, приведенной на правой части рисунка).

- 2) На стр. 62 утверждается, что для сплава $\text{Ni}_{84}\text{Fe}_{16}$ значение магнитострикции равно $\lambda_s \approx -3 \times 10^{-6}$ и дается ссылка на работу [83]. Эта ссылка не является корректной, т.к. данные по магнитострикции $\text{Ni}_{84}\text{Fe}_{16}$ в ней отсутствуют. Эль-Каммоуни и др. [83] приводят данные для магнитострикции бинарных сплавов NiFe других химических составов, а именно $\text{Fe}_{8.2}\text{Ni}_{91.8}$ и $\text{Fe}_{24.4}\text{Ni}_{75.6}$ ($\lambda_s \approx -16 \times 10^{-6}$ и $\lambda_s \approx 8 \times 10^{-6}$, соответственно), при этом они дают ссылку на книгу Р. Бозорта «Ферромагнетизм». Судя по рис. 660 (стр. 528) в книге Р. Бозорт «Ферромагнетизм» (Издательство Иностранной литературы, г. Москва, 1956 г.), магнитострикция $\text{Ni}_{84}\text{Fe}_{16}$ отличается от значения $\lambda_s \approx -3 \times 10^{-6}$, которое постулируется в диссертационной работе.
- 3) Напряженность магнитного поля дана в разных единицах: А/м (рис. 28) и Эрстедах (Э) (рис. 36 и последующие рисунки).
- 4) В тексте встречаются стилистически неудачные словосочетания (например, «...микропровода из сплавов на основе Fe микронных размеров...»). Кроме этого, текст диссертационной работы содержит опечатки.

Указанные замечания не носят критического характера и полученные диссертантом результаты имеют положительную оценку. Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным

пп. 2.1 — 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Считаю, что Колесникова Валерия Григорьевна заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС

д.ф.-м.н. Ховайло Владимир Васильевич

11.09.2025

Контактные данные:

Телефон: +7(926)374-32-60

Адрес электронной почты: khovaylo@misis.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.11 Физика магнитных явлений