

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук Колесниковой Валерии Григорьевны
на тему «Исследование магнитных взаимодействий в гибких
композитных системах с нано- и микроразмерными ферромагнетиками»
по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Изучение магнитных взаимодействий в гибких композитных системах открывает новые перспективы для создания современных функциональных материалов с управляемыми свойствами. Исследование нано- и микроразмерных ферромагнетиков в таких системах особенно востребовано в контексте развития гибкой электроники, биомедицинских приложений и мягкой робототехники, где требуются материалы, сочетающие механическую эластичность и магнитную отзывчивость. Исследования в данной области являются актуальными и способствуют разработке инновационных решений для датчиков, элементов памяти и медицинских имплантов, что соответствует современным трендам в материаловедении и нанотехнологиях.

В диссертационной работе Колесниковой В.Г. проведено комплексное исследование магнитных взаимодействий в гибких композитных системах с нано- и микроразмерными ферромагнитными компонентами, что позволило выявить ключевые закономерности их поведения. Научная новизна исследования заключается в установлении закономерностей магнитных взаимодействий между нано- и микроразмерными ферромагнитными частицами в гибких композитных матрицах, а также между ферромагнитными микропроводами в стекле, что ранее не изучалось систематически. Полученные результаты имеют важное значение для разработки новых функциональных материалов с управляемыми магнитными свойствами,

перспективных для применения в гибкой электронике, сенсорике и энергетике.

Структура диссертации имеет классическую форму и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 221 наименования. Общий объем работы составляет 118 страниц, включая 56 рисунков и 4 таблицы.

В **первой главе** проводится обобщение литературных данных о магнитных свойствах гибких магнитных композитов. Рассмотрены работы, связанные с изучением структурных, механических и магнитных свойств единичных микропроводов и композитов на основе микропроводов. Рассмотрены работы, связанные с изучением магнитных свойств магнитоэлектрических композитных систем. Особое внимание уделяется исследованиям, посвященным изготовлению и характеристике композитов с нано- и микроразмерными магнитными частицами, распределёнными в полимерной матрице, особое внимание уделено работам с исследованием сегнетоэлектрической матрицы поливинилиденфторида (ПВДФ). Обсуждаются публикации по защищаемой тематике.

Во **второй главе** приводятся описания исследованных в диссертационной работе материалов, а также использованных методик измерений и теоретических подходов к анализу экспериментальных данных. Особое внимание уделяется описанию метода исследования магнитных взаимодействий путем получения частных кривых намагничивания (FORC, IRM-DCD).

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям магнитостатического взаимодействия бистабильных аморфных микропроводов из сплава на основе Fe, путём проведения FORC-анализа. Установлено, что процесс перемагничивания бистабильных микропроводов определяется не только магнитостатическим взаимодействием между двумя

проводами, но и значительным вкладом полей рассеяния концевых доменов таких проводов.

Четвертая глава посвящена исследованиям магнитных особенностей двухфазных композитных микропроводов из сплава на основе Fe с ассиметричной внешней магнитной нано-оболочкой. Анализ полученных данных показал, что прямого магнитостатического воздействия между магнитной жилой и внешней оболочкой нет, однако, дополнительные магнитоупругие напряжения со стороны оболочки влияют на изменение доменной структуры металлической жилы микропровода.

В пятой главе описано исследование магнитных свойств и магнитных взаимодействий в полимерных композитах на основе матриц из силикона и ПВДФ с микро- и наноразмерными магнитными частицами. Анализ взаимодействий проводился преимущественно с помощью FORC-анализа с построением FORC-диаграмм. Для магнитоактивных композитов, состоящих из силиконовой матрицы и микрочастиц Fe показано, что добавление сегнетоэлектрических частиц в матрицу существенно влияет на усиление диполь-дипольных взаимодействий между частицами Fe, что отражено на измерении распределения полей взаимодействия на FORC-диаграмме. В полимерных композитах на основе ПВДФ, с магнитными наночастицами продемонстрирована ведущая роль диполь-дипольных внутриагрегатных взаимодействий, интенсивность которых зависит от химического состава частиц и может регулироваться введением сегнетоэлектрических добавок или поверхностной модификацией, что также отражается на изменении распределения полей взаимодействия на FORC-диаграмме.

Достоверность результатов, представленных в работе, подтверждается использованием современного измерительного оборудования и программного обеспечения для обработки данных. Основные результаты работы были опубликованы в достойных международных научных журналах, а также

представлены лично автором работы на всероссийских и международных конференциях, сомнений в должной апробации работы не возникает. Текст диссертационной работы достаточно полно отражает результаты исследований и интерпретацию факторов, влияющих на магнитное взаимодействие в композитных нано- и микросистемах.

Следует отметить, что к работе имеется ряд вопросов и замечаний:

1. В главе 2 диссертации содержится развернутое описание методик синтеза образцов и проведения экспериментальных исследований. Вместе с тем, не всегда ясно, какие именно из представленных методик были применены лично автором в рамках диссертационного исследования, а какие носят справочный характер.

2. На с. 42-43 при переходе от формулы (4) к формуле (5) потерян знак минус.

3. В разделе 5.2, посвященном изучению композитов с наночастицами, отсутствует ряд критически важных параметров синтезированных образцов, таких как размеры наночастиц, константа магнитокристаллической анизотропии наночастиц, форма образцов (тонкая пленка или объемный образец), напряженность магнитного поля, применявшегося во время синтеза образцов. Между тем, перечисленные характеристики оказывают существенное влияние на магнитные свойства исследуемых материалов. В диссертации утверждается, что синтезированные в магнитном поле образцы имеют структурную анизотропию, однако на представленных графиках намагниченности (рис. 49) она очень слабо влияет на магнитные свойства. Следует отметить, что в литературе, например, в работе Radushnov et. al. (Materials Chemistry and Physics, 334, 2025, DOI 10.1016/j.matchemphys.2025.130469) для аналогичных композитов, синтезированных в магнитном поле, наблюдалась выраженная магнитная анизотропия даже при низких концентрациях магнитного наполнителя.

Поэтому возникают следующие вопросы. Каковы основные характеристики наночастиц магнитного наполнителя и напряженность магнитного поля, создающего структурную анизотропию в процессе синтеза образцов? Проявляется ли созданная в процессе синтеза образцов структурная анизотропия в каких-либо других физических свойствах композита (механических, упругих)?

4. В тексте встречаются лексические кальки с английского языка, такие как «симулируют» (с. 29) или «дивайсы» (с. 52). Подобные заимствования иногда не совпадают по значению с их английскими аналогами. Например, слово «симулировать» в русском языке имеет негативную коннотацию и традиционно означает — создавать ложное представление о наличии какого-либо состояния, явления (Большой толковый словарь русского языка), в то время как в контексте диссертации это слово имеет значение «моделировать». Во избежание неточностей лучше использовать устоявшиеся русскоязычные термины.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает 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.

Таким образом, соискатель Колесникова Валерия Григорьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой теоретической

и математической физики

доктор физико-математических наук, доцент

Екатерина Александровна Елфимова



Подпись

«02» сентября 2025 г.

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Кафедра теоретической и математической физики,

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19,

тел.: +7-(343)-389-94-77, e-mail: Ekaterina.Elifimova@urfu.ru

Подпись Ел

