

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Алехиной Юлии Александровны

«Магнитная томография аморфных магнитных микропроводов»

по специальности 1.3.12– «Физика магнитных явлений»

Аморфные металлические магнитные сплавы (АММС) обладают уникальными физическими свойствами, такими как высокая коррозионная стойкость, значительное удельное сопротивление, высокая магнитная проницаемость и ряд других. Благодаря этому АММС получили широкое распространение в технических приложениях, в частности, в сенсорике и робототехнике. В настоящее время известны сотни различных аморфных сплавов на основе железа, кобальта, никеля; эти сплавы могут проявлять самые разные магнитные свойства. Несмотря на широкую распространённость аморфных сплавов, остаются вопросы, вызывающие значительный интерес у исследовательских групп в разных странах, в частности, вопрос о микромагнитной структуре АММС. В связи с этим тема диссертации является актуальной, поскольку в работе предлагаются новые подходы к анализу магнитных свойств «in situ» в объеме материала аморфного микропровода.

В настоящее время описание высокочастотных магнитных свойств композитных материалов, содержащих проводящие включения, такие как аморфные микропровода или порошки магнитных металлов и сплавов, повсеместно проводят в терминах собственной магнитной проницаемости включений, усредненной по их объему. Это часто не позволяет понять детали высокочастотного поведения материалов. В свете этого значимость предложенного в работе подхода к определению распределения магнитной проницаемости объектов микронных размеров еще более возрастает, а его новизна неоспорима. В работе применение подхода продемонстрировано на примере специального типа материалов, но полученные результаты, несомненно, могут быть распространены на другие типы магнитных включений в композитных материалах, внутренняя магнитная структура которых плохо поддается изучению, а высокочастотные магнитные свойства

не могут быть подробно проанализированы. Отмечу, что свойства таких материалов находят ряд технических применений, что определяет практическую важность полученных результатов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, перечня основных результатов, заключения, списка цитируемой литературы и трех приложений.

Во введении сформулированы цель работы и задачи, решенные при её достижении, основные положения, выносимые на защиту, сформулирована новизна работы и обоснована достоверность полученных результатов, определен личный вклад автора, перечислены публикации по теме диссертации.

В первой главе приведен краткий литературный обзор по микромагнитной структуре аморфных магнитных металлических сплавов и методах её наблюдения и моделирования.

Во второй главе дается описание методов экспериментальных исследований, обработки результатов измерений, а также дается краткая характеристика образцов, использованных автором. Следует отметить разработанную автором методику восстановления распределения магнитной проницаемости в сечении микропровода из экспериментальных данных о частотной зависимости импеданса.

В третьей главе приведены результаты исследований магнитоэлектрических и магнитоимпедансных свойств аморфных ферромагнитных микропроводов и изготовленных из них микроспиралей. Представляют интерес обнаруженные автором изотропия петель гистерезиса микроспиралей и асимметрия их магнитоимпедансных зависимостей.

В четвертой главе приведены результаты расчетов распределений магнитной проницаемости в аморфных микропроводах на основании экспериментальных магнитоимпедансных зависимостей по методике, описанной во второй главе. Определены условия применимости разработанного подхода. Показано, что максимальное значение циркулярной магнитной проницаемости соответствует границе между керном (центральной частью микропровода) и оболочкой.

В пятой главе представлены результаты моделирования динамической микромагнитной структуры аморфного микропровода.

Обоснованность защищаемых научных положений и основных результатов работы не вызывает сомнений. Полученные в диссертации результаты опубликованы в трех статьях, индексируемых в международных базах данных WoS и Scopus, а диссертант является первым автором в этих статьях. Работа прошла апробацию на ряде международных конференций по магнетизму и физике конденсированного состояния, и результаты представлены в двенадцати опубликованных тезисах конференций, перечисленных в автореферате.

Диссертация аккуратно оформлена и написана хорошим языком, а автореферат полностью соответствует тексту диссертации. Исследования по теме работы были поддержаны грантами РФФИ и РНФ.

По тексту работы и автореферата можно сделать следующие замечания:

1. Приведенные графики распределения магнитной проницаемости показывают ее как действительную величину (на части графиков указано, что приводится модуль магнитной проницаемости, на остальных, видимо, показана действительная часть). Между тем, согласно описанию разработанной методики, она позволяет определять и действительную, и мнимую части проницаемости. Имело бы смысл представить в работе полученные зависимости (хотя бы для некоторых образцов) отдельно для действительной и мнимой частей. Малость рассчитанной мнимой части проницаемости по сравнению с действительной могла бы послужить сильным аргументом в пользу правомерности использованного подхода, убрав сомнения по поводу возможного влияния на результат как неоднородных процессов перемангничивания, так и частотной зависимости магнитной проницаемости.
2. Предложенный метод определения распределения магнитной проницаемости основан на выделении слоя, по которому проходит 70% тока. На первый взгляд, достаточно легко уточнить метод так, чтобы он использовал разбиение микропровода на несколько коаксиальных областей и оценку на каждой частоте вклада усредненной проницаемости в каждой области. Математически это приведет к системе линейных уравнений, которая имеет простое аналитическое решение. Избыточное количество

измеряемых частот по отношению к числу областей может быть использовано для оценки погрешности метода или для учета влияния частотной дисперсии магнитной проницаемости.

3. На рисунке 44 приведено полученное распределение магнитной проницаемости для микропровода, имеющего радиальное направление намагниченности в поверхностном слое. Как могут быть объяснены полученные здесь достаточно высокие значения магнитной проницаемости ( $\sim 10^3$ )? Обычно считают, что циркулярная магнитная проницаемость в этом случае обусловлена процессами поворота магнитного момента и имеет более низкие значения в силу существенного влияния размагничивания.

4. Чему соответствуют точки на рис. 46? Как получена приведенная там «линия тренда, ...сглаживающая мелкие осцилляции зависимости» (цитата со страницы 82 диссертационной работы)?

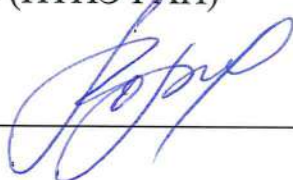
5. Допущен ряд неточностей в описании приборов, использованных при проведении эксперимента. На рис. 36 измерительный прибор обозначен как Fieldfox, но в тексте это название не встречается; при указании типа прибора N9923A в тексте работы использован русский символ «№»; вместо термина «векторный анализатор цепей», принятого в русскоязычной литературе, применяется термин «векторный сетевой анализатор».

Приведенные выше замечания не снижают общей высокой оценки проведенного исследования, выполненного на хорошем научном уровне. Характеризуя работу Ю.А. Алехиной в целом, можно утверждать, что она является законченным научным исследованием, свидетельствует о высокой квалификации автора, посвящена актуальной теме и соответствует паспорту специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений» (по физическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена в соответствии с Приложениями 5 и 6 к Положению о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Научные положения и выводы подтверждены экспериментальными исследованиями, являются новыми и имеют научную и практическую значимость.

Считаю, что диссертационная работа Алехиной Юлии Александровны «Магнитная томография аморфных магнитных микропроводов» отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода, а ее автор Алехина Юлия Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12– «Физика магнитных явлений».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института теоретической и прикладной электродинамики Российской  
академии наук (ИТПЭ РАН)



РОЗАНОВ Константин Николаевич

Дата подписания

28.11.2022

*Контактные данные:* тел.: +7- (495) 484-23-83, e-mail:  
k.rozanov@yandex.ru

*Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация:* 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»

*Адрес места работы:* Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики  
Российской академии наук (ИТПЭ РАН), 125412, г. Москва, вн. тер. г.  
муниципальный округ Дмитровский, ул Ижорская, д. 13, стр. 6, тел.: +7-  
(495) 484-23-83; e-mail: itae@itae.ru

Подпись К.Н. РОЗАНОВА заверяю:

Зам. директора ИТПЭ РАН  
доктор физико-математических наук



КИСЕЛЬ Владимир Николаевич