

**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**

Диссертационная работа Алехиной Ю.А. посвящена исследованию распределения магнитной проницаемости по сечению аморфных микропроводов и процессов трансформации их магнитной структуры под действием переменного магнитного поля.

Магнитномягкие аморфные микропровода в стеклянной оболочке вызывают большой интерес в связи с их необычными магнитными свойствами. В частности, в них наблюдаются такие эффекты, как магнитная бистабильность и гигантский магнитоимпеданс (ГМИ). Эффект ГМИ в аморфных микропроводах привлекает большое внимание в связи с возможностью его использования для разработки сенсоров магнитного поля с высокой чувствительностью и низким уровнем шумов. Особенности магнитной структуры аморфных микропроводов определяются распределением упругих напряжений, возникающих при изготовлении, и знаком константы магнитострикции сплава. Магнитная структура аморфных микропроводов описывается моделью керн–оболочка с различными направлениями осей магнитной анизотропии в двух областях. Величина эффекта ГМИ определяется преобладающим типом анизотропии и значением магнитной проницаемости в оболочке. При этом различные методы обработки могут значительно изменять магнитные свойства аморфных микропроводов. Оптимизация свойств аморфных микропроводов представляет несомненный интерес с точки зрения их практических применений. Кроме того, магнитные аморфные микропровода являются модельным объектом физики

микромагнитных структур и представляют фундаментальный научный интерес. При этом прямое наблюдение магнитной структуры и ее динамики существующими методами исследований в настоящее время не представляется возможным. В связи с вышеизложенным тема диссертационной работы Алехиной Ю.А., посвященной проблеме восстановления распределения намагниченности в аморфных микропроводах, несомненно, является весьма актуальной.

Диссертация Алехиной Ю.А. написана хорошим литературным языком, текст изложен на высоком научном уровне. Работа хорошо структурирована, материал представлен последовательно и логично. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов, заключения, списка литературы, включающего 191 ссылку, и трех приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 116 страниц, включая 52 рисунка и 5 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая ценность. Во введении также обоснована достоверность полученных результатов, содержатся сведения об апробации результатов и личном вкладе автора.

В первой главе диссертационной работы представлен обзор и анализ литературных данных, посвященных магнитной структуре аморфных микропроводов в стеклянной оболочке. Подробно описаны основные модели распределения намагниченности в микропроводах с различным знаком константы магнитострикции, представлены результаты исследований магнитоэлектрических свойств микропроводов и эффекта ГМИ. Также приведен анализ литературных данных о влиянии механических нагрузок, отжига и удаления стеклянной оболочки на изменение магнитных свойств аморфных микропроводов. Большое внимание уделено методам наблюдения магнитной структуры микропроводов и отмечено, что в настоящее время выводы о

магнитной структуре преимущественно основываются на данных об интегральных объемных свойствах материалов.

Вторая глава посвящена описанию использованных методик измерений магнитостатических свойств и ГМИ. Приведено подробное описание исследованных в работе образцов: аморфных микропроводов и спиралей на их основе. Во второй главе также подробно представлена предложенная автором методика восстановления распределения магнитной проницаемости по сечению микропровода из экспериментальных данных о частотной зависимости импеданса.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований магнитостатических свойств и ГМИ аморфных микропроводов состава  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  и спиралей на основе микропроводов. Анализ измеренных зависимостей ГМИ показал, что изменения магнитной структуры микропроводов при удалении стеклянной оболочки и отжиге связаны с эволюцией анизотропии микропровода при температурных и механических воздействиях. Установлено, что для образцов в форме спирали наблюдаются асимметричные зависимости ГМИ от внешнего поля. Такой вид зависимости объяснен магнитостатическим взаимодействием витков спирали, приводящим к возникновению подмагничивающего поля.

В четвертой главе приведены результаты расчетов распределения магнитной проницаемости по сечению аморфных микропроводов двух составов с различными диаметрами металлической жилы. Установлено, что для микропроводов с радиальным направлением намагниченности в оболочке упрощенная модель имеет большие погрешности вследствие неоднородных процессов намагничивания. Показано, что для микропроводов с циркулярной магнитной анизотропией максимум магнитной проницаемости находится в области положения доменной границы между керном и оболочкой. Показано также, что релаксация механических напряжений при термической обработке

аморфных микропроводов приводит к изменению вида радиальной зависимости магнитной проницаемости.

Пятая глава посвящена микромагнитному моделированию процессов перемагничивания аморфных микропроводов с положительной и отрицательной магнитострикцией. Получены равновесные распределения намагниченности в объеме микропровода, а также исследована динамика изменения намагниченности при приложении магнитного поля переменного тока с учетом скин-эффекта. Установлено, что вблизи доменной границы между керном и оболочкой микропровода возникают большие значения локальной магнитной проницаемости.

В заключительных разделах представлены основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Все полученные автором результаты и положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной. Из новых результатов, полученных в диссертационной работе, особый интерес представляют следующие.

1. Впервые экспериментально исследован эффект ГМИ в спиральных образцах на основе аморфных микропроводов. Показано, что спирали могут демонстрировать асимметричный ГМИ, который обычно наблюдается в микропроводах с геликоидальной анизотропией при приложении поля или тока смещения.

2. Предложена новая методика определения распределения магнитной проницаемости по сечению микропровода, основанная на анализе экспериментальных данных о частотной зависимости ГМИ. При помощи этой методики рассчитаны распределения магнитной проницаемости для микропроводов с близкой к нулю константой магнитострикции. Показано, что для микропроводов с преобладающей циркулярной магнитной анизотропией максимум магнитной проницаемости находится в области положения

доменной границы между керном с аксиальной анизотропией и оболочкой с циркулярной анизотропией.

3. Установлено, что релаксация механических напряжений при обработке аморфных микропроводов приводит к изменению вида радиальной зависимости магнитной проницаемости, в том числе за счет изменения основного механизма перемагничивания.

4. Предложена микромагнитная модель изменения распределения намагниченности в аморфных микропроводах с положительной и отрицательной магнитострикцией при перемагничивании полем переменного тока. Показано, что распределение магнитной проницаемости имеет максимум в области границы между керном и оболочкой. Установлено, что неоднородные процессы намагничивания могут приводить к возникновению вихревого поведения эффективного магнитного поля, что приводит к осцилляциям радиального распределения магнитной проницаемости.

Практическая значимость результатов работы обусловлена тем, что разработанная методика анализа магнитной структуры микропроводов может быть использована в системах неразрушающего контроля материалов, в том числе и самих аморфных микропроводов. Полученные данным методом данные о магнитной структуре микропроводов различных типов также могут быть использованы при подборе материалов для создания сенсоров магнитного поля.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, основывается на использовании современного научного оборудования и применении проверенных экспериментальных методов. Обоснованность предлагаемых моделей подтверждается использованием адекватно выбранных теоретических приближений, а также совпадением полученных при моделировании результатов с известными экспериментальными данными.

Основные результаты работы полностью отражены в публикациях в авторитетных российских и международных журналах. Полученные результаты были представлены на одиннадцати российских и международных конференциях, и должная апробация результатов диссертации не вызывает сомнений. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

К диссертационной работе Алехиной Ю.А. имеются небольшие замечания.

1. В разработанной методике восстановления распределения магнитной проницаемости по сечению микропровода предполагалось, что усреднение магнитной проницаемости происходит по поверхностному слою, в котором протекает 70 % полного тока. Однако в работе не приведено обоснование выбора именно такой толщины поверхностного слоя, а также не приведены оценки погрешностей результатов расчетов в случае, если толщина слоя для усреднения магнитной проницаемости будет выбрана другой.
2. Экспериментальные зависимости ГМИ от поля для аморфных микропроводов в разделе 3.1 представлены в виде зависимости  $\Delta Z/Z(H)$ , рассчитанной по формуле (3) в диссертационной работе, где  $H_{\max}$  – максимальное внешнее магнитное поле. Относительное изменение импеданса  $\Delta Z/Z$  для спиралей в разделе 3.2 имеет другой вид, хотелось бы узнать мнение диссертанта о причинах различия. Кроме того, для спиралей из микропровода диаметром 100 мкм помимо асимметрии возникает смена знака  $\Delta Z/Z$ , и причина смены знака также не обсуждается.
3. Микромагнитное моделирование процессов перемагничивания было проведено для аморфных микропроводов диаметром 1 мкм, что связано

с техническими возможностями проведения численных расчетов. Кроме того, отношение длины образца к диаметру существенно отличается от значений для реальных микропроводов. К сожалению, в тексте работы отсутствует обсуждение, как изменятся результаты для микропроводов большей длины и диаметра.

4. В тексте работы не указано, при какой частоте переменного тока проводилось численное исследование перемангничивания микропроводов (Рис. 49 и Рис. 52).
5. Вследствие малого диаметра микропровода с отрицательной магнитоотрицательностью, использованном при микромагнитном моделировании, скин-эффект в образце не возникает, как следует из Рис. 49. Представляется целесообразным провести качественный анализ влияния скин-эффекта на изменения распределения намагниченности при перемангничивании микропровода полем переменного тока.

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основного содержания работы и не изменяют общей положительной оценки диссертации Алехиной Ю.А.

Диссертационная работа 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» и критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель 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,  
главный научный сотрудник  
лаборатории внутрипромыслового газа  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Н.А. Бузников

20 ноября 2022 г.

Подпись Н.А. Бузникова удостоверяю

Контактные данные:

тел.: +7 (498) 657-4026 доб. 2127, e-mail: N\_Buznikov@vniigaz.gazprom.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.12 – Физика магнитных явлений

Адрес места работы:

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский  
институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИНАЗ» (ООО  
«Газпром ВНИИНАЗ»),

142717, Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, пр-д Проектируемый  
№ 5537, здание 15, строение 1.

Тел.: +7 (498) 657-4206

Электронная почта: vniigaz@vniigaz.gazprom.ru