

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

МУСИХИНА АТОНА ЮРЬЕВИЧА «**Реологические свойства жидких и мягких магнитных полимеров**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»

Диссертационная работа А.Ю.Мусихина посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию влияния магнитного поля на реологические свойства мягких магнитных композитов. Эти материалы, состоящие из дисперсных магнитных частиц, внедренных в полимерную матрицу, по праву могут называться «умными», поскольку их макроскопические характеристики очень сильно меняются под действием магнитного поля. Такие уникальные свойства открывают широкие перспективы их использования в технических и био-медицинских устройствах. В настоящее время активно исследуется связь индуцируемых магнитным полем структурных превращений в магнитной подсистеме с изменением реологических характеристик мягких магнитных композитов. Существенный прогресс в этом направлении был достигнут в диссертационном исследовании А.Ю. Мусихина, поэтому актуальность и значимость работы не вызывает сомнения.

Диссертация состоит из введения, шести глав основного материала, заключения и списка цитируемой литературы из 150 названий. Основные научные результаты по теме диссертации представлены в 9 публикациях, из них 5 опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, и индексируются ведущими мировыми реферативными базами Scopus и/или WoS. Также получены 4

свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Анализ опубликованных автором работ по теме диссертации позволяет заключить, что все основные результаты работы достаточно полно представлены в научной литературе.

В первой главе диссертации приводится краткая история исследований магнитных жидкостей и мягких магнитных композитов, раскрывается их «интеллектуальный» характер и обозначены области применения этих систем в промышленности и медицине. На основе достаточно полного и содержательного обзора и анализа современного состояния исследования магнитореологического эффекта в таких материалах, формулируется основная задача диссертации – «теоретическое исследование структурных превращений в магнитных гелях и эластомерах, их влияния на макроскопические механические свойства и магнитострикционные явления в этих системах».

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому изучению упругих свойств пространственно однородных феррогелей. На мой взгляд, эта глава является самой фундаментальной частью всего исследования. Это обусловлено классической простотой поставленной задачи и минимальным числом сделанных при ее решении упрощений. В основу модели положен учет парных межчастичных взаимодействий (магнитных и упругих) магнитомягких сферических микрочастиц. В силу диполь-дипольного взаимодействия каждая частица пары приобретает в магнитном поле дипольный момент, ориентированный не только вдоль направления поля, но и имеющий нормальную к полю компоненту. Именно эта компонента дает вклад в магнитную составляющую модуля сдвига, когда деформация сдвига перпендикулярна полю. Важно отметить, что при расчете дипольного момента частицы корректно учтен эффект насыщения, играющий заметную роль в достаточно сильных полях. В работе произведен учет влияния деформации сдвига матрицы и магнитного взаимодействия частиц

на парную корреляционную функцию. Это позволило выполнить необходимое статистическое усреднение и получить искомый результат для магнитной составляющей модуля сдвига в виде квадратурных формул. Результаты расчетов, представленные на рис. 2.4-2.6, показывают, что в практически доступных полях магнитный вклад в модуль сдвига может в десятки раз превышать модуль матрицы.

В третьей главе диссертации изучается влияние цепочек магнитомягких микрочастиц, перколирующих образец, на сдвиг и одноосное растяжение.

В разработанной диссертантом модели взаимодействие между цепочками не учитывается и рассматривается самая симметричная ситуация, когда поле и растяжение направлены вдоль текстуры образца, а направление сдвига перпендикулярно ей. В пренебрежении концевыми эффектами магнитные моменты всех частиц цепи одинаковы, что позволяет достаточно просто и корректно найти магнитную составляющую сил, действующих между частицами. С использованием уравнений баланса между этими силами и силами упругой реакции среды находится равновесная конфигурация цепи при заданном уровне макроскопической деформации. Это позволяет найти отклик системы на макроскопическую деформацию. Расчеты показали, что при определенном уровне деформации (сдвига или растяжения) в центре цепочки образуется небольшой разрыв, который при дальнейшем деформировании залечивается – интервалы между частицами выравниваются. Этот разрыв приводит к небольшому провалу на деформационной кривой. Предложенная модель описывает существенное усиление упругих свойств материала в практически достижимых магнитных полях и хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

В следующей четвертой главе диссертации развита теория магнитореологических эффектов в феррогелях с частицами пермаллоя. В

качестве исходного пункта этой теории принято, что в процессе полимеризации матрицы микрочастицы пермаллоя образуют сферические агломераты одинакового размера. Включение магнитного поля приводит к структурной перестройке – агломераты стремятся выстроиться в цепочки, направленные вдоль поля. Для описания этого процесса разработана красивая решеточная модель, которая сводит изучаемый процесс к последовательности удвоений числа агломератов в линейных кластерах. Задача решается в одноцепочечном приближении. В исходном изотропном состоянии агломераты будущей цепи представляют собой квазирегулярную линейную структуру. По мере роста поля, направленного вдоль этой затравочной последовательности, в ней сначала формируется квазирегулярная последовательность пар, потом последовательность четверок за счет слияния пар и так далее. Причиной слияния являются силы диполь-дипольного взаимодействия, а матрица в силу своей упругости препятствует этому. Индуцируемый полем магнитный момент каждого агломерата рассчитывается с учетом эффекта насыщения, также как и в предыдущих главах диссертации. Разработана процедура, позволяющая найти среднее число агломератов в цепочке при заданном значении амплитуды поля и других параметров модели, характеризующих магнитную подсистему композита. В этой главе рассчитана магнитная составляющая модуля сдвига и проведено сравнение с экспериментальными данными. Показано, что теория хорошо качественно и количественно описывает эксперимент. В таких системах (мягкие альгинатные феррогели) магнитореологический эффект очень сильно выражен – в практически достижимых магнитных полях упругость образцов возрастает в сотни раз.

В пятой главе диссертант убедительно продемонстрировал свое умение в обращении с современной экспериментальной техникой исследования мягких магнитных полимеров. В этом разделе диссертации хорошо описан

весь цикл от создания исходных материалов, изготовления образцов до магнитных и механических измерений и обработки результатов. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими расчетами, основанными на результатах главы 3.

В заключительной, **шестой главе** диссертации представлен расчет магнитоиндуцированного циркуляционного течения в плоском канале с водой, внутри которого находится капля магнитной жидкости (МЖ). Соискатель, умело используя малые параметры (отношение толщины щели канала ко всем остальным размерам задачи и малую объемную плотность магнитных частиц в капле МЖ) существенно упростил исходные полные уравнения динамики магнитной жидкости. В результате получен относительно простой алгоритм расчета поставленной задачи. Проведенные вычисления показали, что вращающееся магнитное поле с амплитудой порядка 10 кА/м угловой частотой порядка 10 рад/с может с помощью капли МЖ индуцировать циркуляционный поток со скоростью порядка 0.5 мм/с.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, а также рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В целом, диссертационная работа выполнена на очень хорошем уровне, написана ясным и точным языком. В ней подробно описаны все используемые теоретические модели и методы расчета. Хочется отметить редкое и удачное сочетание большого объема теоретического исследования с добротным экспериментальным исследованием изучаемых материалов. Все это, безусловно, свидетельствует о высоком уровне квалификации соискателя. Большинство полученных в работе теоретических предсказаний сравнивается с экспериментальными данными. Результаты диссертации

являются новыми и достоверными. Автореферат дает полное представление о диссертационной работе.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания.

1. В главе 2 процедуру расчета перпендикулярной к внешнему полю компоненты намагниченности частицы, на мой взгляд, следовало бы описать подробнее.
2. В квадратурных формулах (2.26) и (2.28) интегрирование по относительному расстоянию, наверное, следовало начинать не с 0, а с 2
3. Красивый эффект «залечивания» разорванной цепочки частиц, обнаруженный в расчетах (см. рис.3.3 и рис.3.7), хотелось бы понять на качественном уровне.
4. Приведенное на рис.3.5 сравнение результатов теории с экспериментом хорошо бы дополнить комментарием, поясняющим связь параметров модели – размер частиц, число частиц в цепочке – с экспериментальными данными, если таковые имеются.
5. Можно ли из данных, приведенных в подписи к рис.4.7, получить оценку числа микрочастиц, входящих в сферический агрегат?
6. Почему при интерпретации результатов эксперимента (рис.5.5а) использовалась модель текстурированного феррогеля (глава 3), тогда как по описанной в диссертации процедуре приготовления образцов они должны быть изотропными?
7. В работе встречаются опечатки и неточности. В редактировании нуждаются формула (2.1), первая формула на стр.52, а в формуле (4.27) и в подписях к рис.4.6 и рис.4.7, судя по смыслу, следует заменить индексы $p \rightarrow a$.

Несмотря на сделанные замечания, которые носят рекомендательный характер, положительная оценка квалификации соискателя и научная ценность результатов не вызывает никаких сомнений.

Подводя итог, следует еще раз отметить, что:

- диссертационная работа А.Ю. Мусихина содержит новые научные результаты, совокупность которых можно считать научным достижением, имеющим существенное значение в физике магнитных явлений;
- диссертация удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней УрФУ» и соответствует специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»;
- автор - А.Ю. Мусихин достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений»;

Я, Русаков Виктор Владимирович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
старший научный сотрудник
лаборатории «Динамика дисперсных систем»
Института механики сплошных сред УрО РАН,
кандидат физ.-мат наук,
614013 Пермь, ул. Акад. Королева 1,
тел. (342) 237 83 23
E-mail: vvr@icmm.ru

Личную подпись _____
удостоверяю _____
Специалист по кадрам _____



В.И.
Русаков Виктор Владимирович

02.09.2021 г.