

Отзыв официального оппонента на диссертацию  
Биллер Анастасии Михайловны  
«Мезоскопические модели для механики магнитореологических полимеров»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

Механика магнитореологических полимеров – новая область, изучающая поведение высокоэластичных композитов, наполнителями которых служат микро- или наночастицы ферромагнетиков либо ферритов в магнитном поле. Наиболее интересным классом изучаемых материалов являются *магнитореологические эластомеры* (МРЭ) – дисперсии микрочастиц высокомагнитных материалов (пример, железо) в каучукоподобных матрицах (пример, слабосшитая силиконовая резина). МРЭ проявляют в магнитных полях умеренной величины (~100 кА/м) чрезвычайно сильные магнитомеханические эффекты. В частности, в них наблюдаются: деформация в однородном магнитном поле, заметное изменение эффективного модуля Юнга в магнитном поле, «магнитная пластичность», исчезающая при выключении поля и т.п. Этими уникальными свойствами МРЭ обусловлен нарастающий интерес к ним в мировой инженерной науке, где с их применением связываются реальные перспективы создания новых типов адаптивных демпферов, магнитоуправляемых манипуляторов, искусственных мускулов и т.д. В свою очередь, интенсивная работа над приложениями МРЭ сформировала потребность в фундаментальных знаниях об этих средах. Тем самым, тема диссертации, безусловно, актуальна и современна.

Экспериментальные исследования собрали к настоящему времени значительный объём данных. При этом, однако, большое число наблюдаемых эффектов остаётся необъяснённым. Например, появление «магнитной пластичности», которая заключается в сохранении деформаций при снятии нагрузки в магнитном поле, которые исчезают при выключении поля. Существуют несколько причин этих явлений: искажение магнитного поля телом из МРЭ, неоднородность магнитного поля, а также изменение взаимного расположения частиц в упругой матрице под действием нагрузки и магнитного поля. Именно последняя причина и обсуждается в диссертации. Понятно, что в магнитном поле при изменении расстояния между частицами в упругой матрице меняются и магнитные, и упругие силы, действующие на частицы. Под действием магнитных сил частицы либо сближаются, либо удаляются друг от друга, а при наложении нагрузки и изменении взаимного положения частиц, меняются и магнитные силы. Это приводит к деформации МРЭ в магнитном поле и к «магнитной пластичности», если положений равновесия частиц в фиксированном магнитном поле несколько.

Цель работы – рассчитать положения равновесия двух частиц из магнитомягкого материала в упругой матрице в присутствии приложенного однородного магнитного поля и исследовать возможность существования бистабильности такой системы.

Рассмотрены случаи, когда намагниченность ферромагнитного материала частиц зависит от величины магнитного поля линейно или не линейно. Для упругой матрицы использована модель Муни-Ривлина для несжимаемого материала, хорошо известная в физике полимеров.

**Во введении** диссертации даётся обзор литературы, посвящённой исследованию намагничивающихся композитных материалов. Из знакомства с

обзором видно, что экспериментальный материал весьма обширен, но не систематичен: установлены лишь некоторые качественные закономерности. Что касается теории, то очевидно, что она только начинает развиваться. Это подчёркивает новизну рецензируемой диссертации, где последовательно разобрана одна из причин магнитомеханического отклика на приложенное однородное магнитное поле: взаимодействие пары частиц, заключенных в эластомер.

**В главе 1** поставлена магнитостатическая задача. Рассмотрены два случая – линейной и нелинейной зависимости намагниченности от величины магнитного поля. Расчёт линейного случая (раздел 1.3) опирается на известное аналитическое решение (в рядах). Здесь в заслугу автору следует поставить доведение решения «до числа», выполненный переход от ряда из семи членов (известное решение Джеффри) до численно-аналитического мультипольного ряда с произвольным количеством слагаемых (для сходимости расчётов их потребовалось около сотни). Автором создана программа автоматизированного расчёта, в которой необходимое число слагаемых определялось в ходе вычислений. Расчёт в случае нелинейно намагничивающегося материала частиц (раздел 1.5) оригинален, он проделан диссертантом численно методом конечных элементов. В обоих случаях вычислялась магнитная энергия системы.

Необходимость решения перечисленных задач очевидна: градиенты магнитной энергии определяют те силы, которые заставляют частицы перемещаться и тем самым деформировать упругую матрицу. Обеспечение точности численного дифференцирования магнитной энергии (также найденной численно) требует специального внимания. А.М. Биллер смогла предложить для этого достаточно удобную и вполне эффективную процедуру.

**В главе 2** проведен расчёт упругих сил, возникающих в ответ на смещения частиц под действием магнитных сил. Для определения упругой энергии, которую создает в нелинейно упругом эластомере пара твёрдых сферических включений при изменении их взаимного расположения, был выполнен большой объём численной работы. В постановке задачи учитывались как физическая, так и геометрическая нелинейности. Последняя очень важна, поскольку при тесном сближении частиц относительные деформации в зазоре между ними чрезвычайно велики. Для того, чтобы справиться с трудностями работы в условиях ограниченности вычислительных ресурсов, диссертант использовал эвристические стрессовые схемы, «привязываемые» к численному расчёту. Это обеспечило удобство и приемлемую точность нахождения упругих сил.

**В главе 3** на основе результатов глав 1 и 2 вычислена полная энергия пары частиц как функция приложенного магнитного поля, начального и текущего расстояния между частицами и параметров материала частиц и эластомера. Исследование этой функции составляет самую интересную часть диссертации.

В случае линейной зависимости намагниченности материала частиц разработанная теория предсказывает, что когда поле направлено вдоль межцентрового вектора частиц, в определенном интервале значений магнитной напряжённости в системе возникает бистабильность: существуют два устойчивых равновесных состояния. В одном из них взаимное смещение частиц не велико, в другом – оно близко к максимальному, то есть соответствует очень тесному сближению частиц. Переходы между этими состояниями имеют место при напряжённостях поля, отвечающих границам интервала бистабильности. Скачкообразное изменение межчастичного расстояния (переход к более близкому

расстоянию между частицами) наступает на правой границе интервала бистабильности, а переход к более дальнему расстоянию между частицами – на левой границе.

В случае нелинейной зависимости намагниченности материала частиц от величины магнитного поля также обнаружена бистабильность при некоторых значениях приложенного магнитного поля. Однако при достаточно больших полях, когда намагниченность близка к насыщению, переход от более дальнего равновесного расстояния между частицами к более близкому не происходит при увеличении магнитного поля. Чтобы перейти к более близкому расстоянию необходимо приложить механическую нагрузку и затем её снять. Этот эффект очень интересен и очевидно имеет отношение к «магнитной пластичности».

Все предсказанные в диссертации теоретически явления бистабильности и гистерезиса расстояния между частицами в однородном магнитном поле имеют непосредственное отношение к наблюдаемой в эксперименте «магнитной пластичности», которая проявляется при наложении внешней механической нагрузки в присутствии магнитного поля. В самом деле, часть пар частиц могут переходить в новое устойчивое состояние равновесия в данном магнитном поле под действием нагрузки и сохранять эту новую деформацию и при снятии нагрузки. Конечно, эта новая деформация исчезнет при выключении поля. Следует отметить, что известные из литературы эксперименты, в которых наблюдалась «магнитная пластичность», проводились для конечных объёмов МРЭ или в неоднородных полях. Поэтому в этих экспериментах трудно выделить в чистом виде эффект связанный с изменением структуры МРЭ.

В целом, диссертация правильно структурирована, текст написан доступным, но достаточно строгим, научным языком. Выводы, содержащиеся в конце каждой главы и в заключении работы, сформулированы чётко и обоснованы всеми предшествующими изложенными результатами.

#### **Критические замечания:**

1. В диссертации отсутствует список обозначений, что затрудняет знакомство с ней.
2. В диссертации есть опечатки, например, граничное условие на бесконечности (после формулы (1.9)) записано не верно; имеется опечатка в формуле (1.28).
3. Во введении нет ни одного упоминания о «магнитной пластичности» или «памяти формы» в магнитном поле магнитоэологических эластомеров. Нет подробного описания известных из литературы экспериментальных исследований этих интересных явлений. Тогда как именно эти явления и являются основной мотивацией для проводимых в диссертации исследований.

Сделанные замечания не ставят под сомнение правильность основных результатов и выводов работы и не влияют на мое общее положительное мнение о ней. В диссертации проделана большая вычислительная работа, говорящая о высокой квалификации автора, получены новые и интересные результаты. Проведены сравнения с экспериментом и показано, что расчёты хорошо описывают эксперимент и что в этом эксперименте не может наблюдаться бистабильность.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечена использованием известных математических моделей, строгих аналитических методов исследования, использованием надежных численных методов, и главное –

сопоставлением с экспериментальными данными. Наличие в одной работе и теоретической и экспериментальной частей, а также хорошее согласие между расчётами и измерениями, несомненно, является очень большим достоинством и показывает, что автор достиг высокой степени профессионализма. Отмечу качественную апробацию результатов диссертации: они докладывались на основных международных и российских конференциях по магнитным жидкостям и опубликованы в статьях, в том числе, в журналах из списка ВАК.

Все основные результаты диссертации обладают научной новизной и являются полезным вкладом в фундаментальные исследования в области механики деформируемых материалов, взаимодействующих с магнитным полем. Разработанные методики могут быть использованы в практических целях при конструировании устройств, в которых используются магнитореологические эластомеры.

Автореферат содержит описание всех основных результатов диссертации и адекватно отражает её содержание.

Диссертационная работа А.М. Биллер представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему. Она удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, А.М. Биллер, вполне заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела.

Профессор кафедры гидромеханики  
механико-математического факультета  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова  
д.ф.-м.н., профессор

Налетова Вера Арсеньевна

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1  
Тел: 7 (495)939-39-58,  
E-mail: naletova@imec.msu.ru

Отзыв составлен 24 августа 2016 г.

Подпись профессора кафедры гидромеханики В.А. Налстовой заверяю:  
И.о. декана механико-математического факультета  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,  
профессор

Чубариков Владимир Николаевич

