

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Биллер Анастасии Михайловны "Мезоскопические модели для механики магнитореологических полимеров", представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности:

01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность темы диссертационной работы

Магнитоуправляемые композиты представляют собой новый класс интеллектуальных гетерогенных материалов, способных целенаправленно изменять свои свойства и поведение под действием внешних управляющих магнитных полей; такие материалы широко применяются в электротехнике, радиотехнике, автоматике, медицине.

В диссертационной работе Биллер А.М. объектом исследования являются магнитоуправляемые композитные магнитореологические полимеры, которые состоят из полимерных матриц с внедренными в них магнитными частицами нано и/или микро размера; магнитные силы между частицами наполнителя соизмеримы с возникающими в полимере упругими силами, что приводит к магнитодеформационному эффекту - уникальной способности композита к быстрым и контролируемым деформациям в магнитных полях. Уточненное теоретическое исследование закономерностей и особенностей магнитодеформационного эффекта композитных магнитореологических эластомеров во внешнем магнитном поле, обусловленным межчастичным взаимодействием на структурном уровне, с комплексным учетом многих специфических эффектов взаимодействия элементов структуры: существенной неоднородности магнитных и деформационных полей в элементах структуры композита, обусловленной межчастичным взаимодействием, геометрической и

физической нелинейностями элементов структуры (нелинейным намагничиванием частиц, нелинейной упругости и больших деформаций эластомерной матрицы композита), появлению связанности магнитных и упругих полей на макроуровне композита в результате межчастичных взаимодействий на структурном мезоуровне, представляет собой актуальную задачу механики деформируемого твёрдого тела.

Структура и содержание диссертационной работы

Введение к диссертационной работе Биллер А.М. начинается с обзора современного состояния исследований магнитореологических эластомеров и, далее, обосновывается актуальность выбранной темы исследования, отмечаются основные проблемы построения теоретических моделей магнитореологических эластомеров и формулируются цель и задачи работы, основные полученные результаты, их новизна, значимость и достоверность; приведены положения, выносимые на защиту, и описание структуры диссертации.

Первая глава диссертации посвящена магнитному бинарному взаимодействию частиц в магнитореологическом эластомере во внешнем однородном магнитном поле, когда, намагничиваясь по закону Фрёлиха-Кеннелли, каждая частица становится источником неоднородного магнитного поля, действующим на намагнченность другой частицы, и степень неоднородности взаимонамагничивания частиц увеличивается при их сближении с учетом возможного достижения частицами режима магнитного насыщения. Численно рассчитаны энергия и силы магнитного взаимодействия частиц на основе решения задачи магнитостатики с учетом пространственной неоднородности намагничивания и нелинейности закона намагничивания частиц. Для случая малых магнитных полей получено

решение задачи магнитостатики в виде разложения магнитного скалярного потенциала в ряд по степеням пространственных переменных и по кратным угловым гармоникам, коэффициенты разложения найдены численно; для сферических частиц принят линейный изотропный закон намагничивания с постоянной восприимчивостью. Необходимо отметить важность построенной Биллер А.М. диаграммы применимости с погрешностью менее 5% различных дипольных моделей: «линейно намагничающихся диполей», «нелинейно намагничающихся диполей», «линейно взаимодействующих диполей», «нелинейно взаимодействующих диполей» для описания взаимодействия сферических частиц во внешнем магнитном поле с указанием случаев, в которых эти модели неприемлемы и необходимы уточненные решения задач «о линейно намагничающихся частицах» или «о нелинейно намагничающихся частицах».

Вторая глава посвящена численному исследованию упругого взаимодействия двух абсолютно твёрдых сферических частиц в гиперупругой среде; во внешнем магнитном поле частицы намагничиваются, между ними возникают силы магнитного взаимодействия, под действием которых полимерная матрица деформируется и в ней возникают упругие напряжения, уравновешивающие действующие на частицы магнитные силы. Приведены дифференциальная и вариационная постановки задачи нелинейной теории упругости с определяющими соотношениями в виде закона Муни-Ривлина для описания конечных деформаций эластомеров. Разработаны алгоритм и вычислительная программа на основе метода конечных элементов для численного решения поставленных задач для цилиндрической и кубической областей с двумя жесткими сферическими частицами. Проведено сравнение некоторых полученных результатов с известными экспериментальными данными; показано хорошее соответствие полученных решений до 250% деформаций. Дан численный анализ упругой энергии в области,

деформированной силами магнитного межчастичного взаимодействия пары частиц во внешнем магнитном поле, при различных значениях расстояния между частицами.

В третьей главе представлены новые модели двухчастичного магнитного и упругого взаимодействий намагничивающихся частиц в гиперупругой матрице для описания сложного поведения магнитореологического эластомера с частицами приложении внешнего магнитного поля и механической нагрузки с учетом устойчивости и возможной бистабильности системы, гистерезиса межчастичного расстояния при варьировании величины внешнего магнитного поля. Найдены конфигурации, в которых возможен баланс упругих и магнитных сил, по зависимости энергии системы от расстояния между частицами; найдены условия при которых система проявляет бистабильность и энергия имеет два минимума, локализованных при различных значениях расстояния между частицами. Показано, что при циклическом изменении внешнего магнитного поля возникает гистерезис межчастичного расстояния пары. На основе разработанной модели даны объяснения физической природы возникновения и численный анализ уникальных эффектов, присущих магнитореологическим эластомерам: магнитоиндукционного упрочнения, деформации и псевдопластиичности. Впервые решена задача о магнитомеханическом гистерезисе для пары ферромагнитных, а не парамагнитных частиц, что является важным шагом на пути к построению мезоскопической теории реальных магнитореологических систем. Исследована уникальная особенность двухчастичной системы с насыщением намагниченности частиц, когда возникающая бистабильность не приводит к образованию кластера. Полученные численные результаты моделирования подтверждены для частных случаев сравнением с известными экспериментальными данными.

В **заключении** приведены основные результаты представленного теоретического исследования уникальных закономерностей и эффектов магнитоупругого двухчастичного взаимодействия намагничающихся частиц в эластомере во внешнем магнитном поле на основе разработанных Биллер А.М. мезоскопических моделей механики структурно-неоднородных магнитореологических сред. Даны рекомендации по практическому использованию результатов работы и обобщению разработанных моделей, методов и алгоритмов на моделирование магнитоупругого поведения многочастичных композитных систем.

Достоверность представленных результатов

Достоверность полученных Биллер А.М. результатов подтверждается использованием апробированных моделей и корректных математических постановок задач механического и магнитного поведения гетерогенных материалов в рамках структурно-феноменологического подхода при разработке алгоритмов аналитического и численного решений поставленных задач; тщательным анализом и объяснением обнаруженных эффектов поведения композитных магнитных систем; исследованием сходимости конечно-элементного алгоритма; сопоставлением результатов расчетов с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными других авторов.

Научная новизна

Научная новизна результатов, полученных Биллер А.М. в диссертационной работе, несомненна. Впервые в полной постановке получено решение задачи о магнитных силах, связывающих две

сферические частицы, намагничивающиеся нелинейно. Для случая линейно намагничивающихся частиц решение задачи получено с точностью, необходимой для описания частиц с высокой восприимчивостью, что характерно для наполнителя магнитореологических эластомеров. Определены рамки применения приближённых дипольных моделей. Предложены интерполяционные формулы, которые описывают энергию гиперупругой среды, деформируемой двумя твёрдыми включениями. Исследовано магнитоупругое поведение модельного образца эластомера с двумя намагничивающимися частицами. Предложено теоретическое объяснение механизма образования магнитных плотных кластеров частиц при действии внешнего магнитного поля.

Практическая значимость

Результаты диссертационной работы Биллер А.М. представляют несомненный научный интерес и имеют очевидное практическое значение. Практическая значимость работы заключается в построении мезоскопических композитных моделей для описания магнитомеханического поведения магнитореологического эластомера во внешних магнитных полях, позволяющих учесть влияние распределения частиц в эластомере на макроскопические свойства. Практическую значимость имеют построенные диаграммы применимости различных дипольных моделей для описания взаимодействия намагничивающихся сферических частиц во внешнем магнитном поле и указаны случаи, в которых эти модели неприемлемы и необходимы уточненные решения задач. Полученные решения магнитостатической и упругой задач вместе с предложенными интерполяционными формулами дают возможность корректного выбора упрощений при описании магнитоупругого взаимодействия магнитомягких частиц в гиперупругой матрице.

Публикации и апробирование результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы Биллер А.М. достаточно полно **апробированы и поэтапно опубликованы** в ведущих научных журналах. По теме диссертации автором опубликовано 14 работ, из которых **4 статьи** опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 статья в сборнике материалов конференции, 8 тезисов конференций и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Результаты проведенных исследований представлены на 7-и различных конференциях, в том числе на 3-х международных. Диссертационная работа Биллер А.М. выполнена на высоком методологическом уровне, отличается полнотой изложения и является **завершенным научным исследованием**. Диссертационная работа, в целом, написана **хорошим техническим языком**, графически **качественно** проиллюстрированы полученные результаты. Автореферат и публикации Биллер А.М. **в полной мере** и правильно отражают содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе:

- 1) В диссертации отсутствует список принятых обозначений и аббревиатур моделей, который мог бы облегчить ее прочтение.
- 2) На стр.8 диссертации в верхнем абзаце делается неверное утверждение о том, что если распределение частиц статистически однородно, тогда композит на макроуровне изотропен (известно, например, что есть статистически однородные анизотропные структуры); в этом же абзаце делается неверное утверждение, что «эластомеры, имеющие внутренние структуры называют анизотропными» (известно, что анизотропия или

изотропия случайной структуры определяется по признаку наличия или отсутствия зависимости, например, для многоточечных моментных функций структуры от угловых координат, в частности наличию или отсутствию преобладающих ориентаций кластеров частиц в объеме композита).

- 3) На стр.11 в нижнем абзаце написано: «анизотропные образцы демонстрируют больший рост упругого модуля по сравнению с изотропным», не уточняя ориентации направления (для модуля Юнга) или плоскости (для модуля сдвига) с учетом, что упругие свойства материала анизотропны.
- 4) На стр.17 в верхнем абзаце написано о связи «гипотезы бинарного взаимодействия» с «подходом Фойгта» (без библиографической ссылки), прошу пояснить это утверждение (или как это соотносится с известной гпотезой Фойгта об однородности поля деформирования для композитной среды).
- 5) На стр.17 в верхнем абзаце записано: «Две частицы в некотором образце полимера – это *наименьший представительный элемент* МР эластомера, являющийся *носителем* свойств композита как целого.» (можно с этим согласиться только в смысле «первого или нулевого приближения» представительной области композита или в смысле «ячейки периодичности с двумя частицами» с соответствующими условиями симметрии на внешних границах),
- 6) На стр.18 в разделе «научная новизна» написано, что «на мезоскопическом уровне оценено влияние взаимодействия частиц на эффективные характеристики композиционного материала», в тексте диссертации (см. (3.11), рис.3.12 на стр. 128) есть лишь «изменение жесткости образца с двумя

частицами (известно, например, что жесткость **стержня** и модуль Юнга **материала** - это разные понятия).

- 7) На стр.67, стр.68 неясен смысл записанных условий вида: $q \ll l/a$, $0 \leq q \leq \infty$, если по определению $q = l/a \geq 2$ (см. стр.63, стр.66).
- 8) На стр.113 в разделе 3.2 «Нелинейно намагничивающиеся частицы в **конечном гиперупругом массиве**» отсутствуют математическая постановка и граничные условия для деформационных и магнитных полей на внешних границах, в частности, боковой поверхности рассматриваемой цилиндрической области.

В диссертационной работе замечены **некорректные формулировки** (выделены курсивом), например:

- 1) Непонятен термин «*направление усилия сдвига*» в первом абзаце на стр.11 (известно, что сдвиг характеризуется плоскостью действия, а не направлением).
- 2) Используются термины «*мезомеханика*» и «*микромеханика*» без пояснения общности и различий входящих в них моделей и подходов, например: «*микроскопический подход*» (первый абзац на стр.14), «*микроструктура*», «*микроструктурный подход*» (первый абзац на стр.9),
- 3) Некорректность использования термина «*сторона*» в предложении «*Имеет форму куба со *стороной* d=...*» первый абзац на стр.64 (известно, что у куба «*ребра*»),
- 4) На стр.64 в пояснении к формуле (2.7) написано «...усилие *p*» (известно, что это вектор напряжения),

- 5) На стр.85 некорректная формулировка в предложении «На границах расчетной области никаких условий не задается, то есть внешняя поверхность остается свободной.» (это известные граничные условия второго рода для напряжений).
- 6) На стр.13 в нижнем абзаце некорректная формулировка: «Есть работы, в которых закон намагничивания записывается честно с использованием...».

В диссертационной работе замечены **опечатки**, например:

- 1) на стр.12 в первом абзаце в слове «статистический»,
- 2) на стр.73 в верхнем абзаце в формуле $f_r(\gamma)^\infty \sin 2\gamma$.
- 3) На стр.31 (в первом абзаце разд.1.2.2) и на стр.54 (в нижнем абзаце) критерий применимости моделей записан в виде $l \ll a$ (прошу пояснить, возможно, это опечатка).
- 4) На стр.30 приведено «известное соотношение» (1.19) без ссылки на источник.

Заключение

Отмеченные недостатки не снижают научной и практической значимости полученных Биллер А.М. результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации в целом. Работа выполнена на высоком методологическом уровне, отличается полнотой изложения и является завершенным научным исследованием. Представленные результаты вносят существенный вклад в развитие методов расчета и анализа особенностей распределения существенно неоднородных деформационных и магнитных полей на структурном уровне гетерогенных магнитореологических материалов во внешнем магнитном поле.

Считаю, что диссертация Биллер Анастасии Михайловны «Мезоскопические модели для механики магнитореологических полимеров» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Биллер Анастасия Михайловна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Профессор кафедры механики
композиционных материалов
и конструкций Пермского
национального исследовательского
политехнического университета,
доктор физико-математических наук

Паньков Андрей Анатольевич

Адрес: 614990, г. Пермь,
Комсомольский пр., 29.
Телефон: 8-902-803-6085
E-mail: a_a_pankov@mail.ru

Отзыв составлен 19 сентября 2016 г.

Подпись профессора А.А.Панькова заверяю:
Ученый секретарь Пермского
национального исследовательского
политехнического университета



Макаревич Владимир Иванович

19.09.16.