

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный
исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И.
Лобачевского», д.ф. м.н.



В.Б. Казанцев

2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
о диссертации Биллер Анастасии Михайловны
«Мезоскопические модели для механики магнитореологических полимеров»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Физико-механические свойства современных композитных материалов могут существенно изменяться за счёт присутствия в них частиц, активно реагирующих на внешние немеханические воздействия. В частности, к таким материалам относятся магнитореологические (MR) эластомеры – новые полимерные композиты, в качестве наполнителя которых выступают высокодисперсные магнитные частицы. MR эластомеры обладают рядом новых свойств, чрезвычайно привлекательных с точки зрения их практического применения. К примеру, имеется возможность бесконтактного изменения механической упругости MR систем, воздействуя на них постоянными и/или переменными магнитными полями. Отмеченные свойства MR эластомеров определяются многими факторами: характеристиками несущей среды (эластомерной матрицы) и магнитной (твёрдой) фазы, объёмными долями последних, типом пространственного распределения частиц наполнителя в матрице и др. Очевидно, что проблему определения макроскопических свойств MR эластомеров следует решать на мезоскопическом уровне: там, где во всей полноте проявляются взаимодействия намагничивающихся во внешнем магнитном поле частиц с эластомерной матрицей и друг с другом. Особенностью рассматриваемой системы

является то, что частицы, входящие в её состав, являются магнитомягкими. Это означает, что в отсутствие внешнего поля они не отличаются от любого другого твёрдого наполнителя той же дисперсности. Ситуация коренным образом меняется, когда материал подвергается действию внешнего магнитного поля. Ферромагнитная природа частиц (микродисперсное железо) обеспечивает им высокую степень магнитной поляризации и, тем самым, придаёт им значительные по величине магнитные моменты. В результате, в системе «включается» дополнительное межчастичное взаимодействие – дальнодействующие пондеромоторные силы, которые связывают друг с другом все магнитные моменты. Поскольку носителями магнитных моментов являются частицы наполнителя, то эти силы оказываются приложенными к деформируемой матрице: каждая частица «давит» на своё упругое окружение, стремясь занять положение, выгодное с точки зрения минимума магнитной потенциальной энергии. Силовая активность частиц встречает упругое противодействие матрицы, в системе возникает внутреннее напряжённое состояние, а изменение структуры МР композита определяется достигаемым магнитомеханическим балансом. Соблюдение этого баланса на мезоскопическом уровне (частица и её ближайшее окружение, расстояния порядка десятка микронов) определяет, в конечном счёте, и макроскопические деформации МР образца, и изменение его упругих модулей. Исследованию этой **актуальной** проблемы и посвящена диссертационная работа А. М. Биллер.

Рецензуемая диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Обзор литературы, относящейся к теме диссертации, представлен во введении, где затем обосновывается актуальность исследуемой проблемы и формулируется цель работы. В конце введения описаны структура диссертации, кратко изложено содержание всех глав, а также приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

Первая глава посвящена детальному изучению магнитных сил, возникающих между двумя намагничающимися частицами. Численными методами найдены силы взаимодействия пары ферромагнитных частиц, характеризующихся высокой магнитной проницаемостью и нелинейным законом намагничивания. Рассмотрен также случай парамагнитных частиц (намагничающихся по линейному закону), применимый для описания частиц наполнителя МР эластомеров во внешних полях с невысокой напряжённостью. Выполнено сравнение полученных сил между собой (приближения линейного и нелинейного намагничивания) и с силами, предсказываемыми стандартно используемыми дипольными моделями. Показано, что учёт неоднородного распределения намагниченности в частицах очень существенным образом изменяет результаты по сравнению с любой из дипольных моделей, поскольку в них частицы всегда заменяются точками.

Во второй главе работы исследуется напряжённо-деформированное состояние образца гиперупругого эластомера, внутри которого навстречу друг другу перемещаются две сферические частицы, значительно более твёрдые, чем эластомер. Существующие классические решения задач о твёрдых включениях в упругой среде в этом случае неприменимы, поскольку необходим учет как больших деформаций, которым подвергается

полимерная матрица, так и нелинейности её упругих свойств. Численный подход, в частности метод конечных элементов, использованный во второй главе диссертации, является единственным приемлемым способом решения подобных задач. Полученный в результате расчётов дискретный массив данных об упругой энергии эластомера положен в основу интерполяционной процедуры, основанной на эвристических стержневых моделях. Тем самым, была получена необходимая для решения главной задачи весьма точная непрерывная аппроксимация зависимости взаимной упругой энергии частиц от расстояния между их центрами.

В третьей главе произведено объединение решений магнитной и упругой задач и проанализировано поведение модельного объекта, представляющего собой пару намагничивающихся частиц, помещённых в образец эластомера. Был обнаружен и детально изучен гистерезисный механизм перемещения частиц внутри эластомера во внешнем магнитном поле, ведущий к изменению конфигурации и механических свойств рассматриваемой структурной «ячейки» МР полимера.

Найденные эффекты служат подтверждением прежде лишь качественно обоснованной гипотезы о том, что внешнее намагничивание приводит к образованию внутри МР эластомера «магнитных скрепок», которые создают и поддерживают напряжения внутри композита. Таким образом, обоснована роль магнитомеханического гистерезиса в возникновении макроскопических эффектов индуцированного упрочнения и деформации, а также псевдопластичности МР эластомеров. Критерии возникновения магнитомеханического гистерезиса были определены для построенной модели, что позволило дать оценки и для реальных МР эластомеров.

В заключении сформулированы основные результаты работы и перспективы дальнейших исследований.

Главным результатом работы является построение и детальная разработка модели мезоскопического элемента МР эластомера. Эта модель позволила автору исследовать магнитомеханику пары намагничивающихся частиц в эластомере, выяснить природу образования «магнитных скрепок» и продемонстрировать влияние взаимодействия частиц на механические свойства композиционного материала. Необходимо также отметить, что модель представляет собой базу для дальнейшего изучения МР эластомеров, в том числе на макроскопическом уровне. Кроме того, при работе над моделью были получены другие результаты, обладающие **научной новизной**:

- вычислены энергия и силы магнитного взаимодействия пары нелинейно намагничивающихся частиц при численном решении задачи магнитостатики в полной постановке;
- определены критерии применения приближенных моделей дипольного типа для описания магнитного взаимодействия пары частиц;
- предложены интерполяционные формулы для упругой энергии, накапливающейся в гиперупругой матрице при взаимном перемещении пары твёрдых внутри неё.

Достоверность результатов работы подтверждается сравнением её результатов с аналитическими решениями для предельных случаев, исследованиями сходимости конечно-

элементного расчёта с помощью численных экспериментов, а также сопоставлением с имеющимися экспериментальными данными.

Научная и практическая значимость работы заключается в раскрытии механизмов влияния микроструктуры композиционного материала на его макроскопические свойства дающих возможность построения многоуровневых моделей для предсказания этих свойств. Для изучения магниточувствительных композиционных материалов в целом, безусловно полезны полученные решения задач магнитостатики, поскольку они дают конкретные критерии для корректного выбора допустимых упрощений при описании магнитного взаимодействия магнитомягких частиц.

Рекомендации по использованию результатов и выводов приведенных в диссертации. Разработанные модели мезоскопического элемента магнитореологического эластомера могут быть использованы в Институте проблем машиностроения РАН, Институте проблем механики РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Институте механики МГУ, Южном федеральном университете и других организациях проводящих теоретические и экспериментальные исследования в области магнитомеханического поведения материалов.

По диссертации имеется несколько замечаний:

1. Указания на возможность использования построенной модели мезоскопического элемента для предсказания макроскопических свойств МР эластомеров требует предоставления оценок её применимости, к примеру, оценки по допустимым концентрациям наполнителя.
2. Развитие вычислительных технологий достигло уровня, при котором можно исследовать поведение системы, состоящей из десятков и сотен частиц. Не совсем ясно, почему автор ограничился рассмотрением простого случая пары частиц.
3. Если теоретические и численные исследования проведены в работе на очень высоком уровне, то сравнение с экспериментальными данными представлено существенно слабее. Да, есть подраздел 3.2.4, в котором предпринимается попытка оценить вклад в магнитодеформационный эффект, который вносят частицы, располагающиеся в образце вдоль вектора магнитного поля. Но даже в этом случае деформация образца эластомера, оцененная в рамках предложенной автором двухчастичной мезоскопической модели, лишь качественно совпадает с экспериментальными данными, а количественно более чем на 60% отличается от экспериментально измеренной магнитоиндукционной деформации. Эта величина принципиально не может претендовать на количественную точность из-за того, что в данной модели не учитывается вклад пар, расположенных поперёк поля.

Представленные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертация представляет собой законченное научное исследование в области теоретического изучения механики магнитореологических полимеров. Текст диссертации и автореферата написан правильным научным языком. Автореферат верно отражает содержание диссертации. Основные результаты работы опубликованы в журналах, которые входят в Перечень, утверждённый ВАК Минобрнауки России и докладывались на различных

конференциях как российского, так и международного уровня, получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертационная работа «Мезоскопические модели для механики магнитореологических полимеров» отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Биллер Анастасия Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация рассмотрена, отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского 16 сентября 2016 г., протокол № 3.

Директор Научно-исследовательского института механики
Национального исследовательского Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
доктор физико-математических наук,
профессор

Игумнов
Леонид
Александрович

603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
тел.: +7 (831)465-66-11;
e-mail: igumnov@mech.unn.ru

