

УДК 629.067; 537.622.4; 538.955; 538.951

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДЕМПФИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ УПРАВЛЯЕМОГО БАМПЕРА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В.В. Богданов, к.т.н. / Р.В. Боков, МГМУ «МАМИ»  
К.В. Нефедев, к.ф.-м.н. / П.Д. Андрущенко, ДВФУ  
Д.Ю. Борин, к.т.н., Dresden University of Technology

Решение проблемы безопасности на автомобильном транспорте в России, в частности минимизация негативных последствий ДТП при столкновении автомобилей с пешеходами, представляет собой очень актуальную, интересную и довольно непростую задачу [1]. Один из действенных путей решения указанной проблемы – применение новых смарт-материалов (в том числе с эффектом памяти формы, таких как магнитоупругие или магнитореологические эластомеры, например, на основе низкомолекулярного винила) в конструкциях энергопоглощающих травмобезопасных бамперов в качестве первых элементов конструкции, соприкасающихся с препятствиями во время удара [2, 3]. При этом возникают вполне естественные вопросы: какими магнитными и упругими свойствами должны обладать магнитоактивные эластомеры (МАЭ), чтобы наилучшим образом соответствовать задачам обеспечения энергопоглощения и травмобезопасности на автомобильном транспорте? Можно ли ещё на стадии проектирования конструкции и подбора таких смарт-материалов, зная нагрузки, действующие на транспортное средство (ТС) при столкновении (с препятствием или пешеходом), спрогнозировать поведение системы микро- и наночастиц в МАЭ, помещённых во внешнее управляющее магнитное поле? Чтобы получить ответы на эти и другие вопросы, необходимо исследовать, каким образом связаны искомые магнитоупругие свойства магнитоактивного материала с его структурой, видом распределения частиц по форме, размерам, магнитным моментам и состояниям, возможным наличием двух и более фаз магнитных частиц, распределением частиц по координатам в полимеризованной матрице, а также с вязкоупругими свойствами самой матрицы. Изменение изначально изотропно упругой среды, содержащей систему взаимодействующих частиц, при наличии внешних воздействий тоже представляет фундаментальный и практический интерес.

Один из наиболее перспективных подходов для получения ответов на поставленные вопросы заключается

в комплексном экспериментальном и теоретическом исследовании поведения системы магнитных микро- и наночастиц с привлечением методов численного моделирования. Для этих целей авторами было разработано программное обеспечение для суперкомпьютерных кластеров на основе сверхмасштабируемого параллельного алгоритма расчёта свойств МАЭ. Компьютерные модели полезны для существенного сокращения временных затрат на исследования. А использование высокопроизводительного вычислительного оборудования для моделирования поведения указанных двухкомпонентных композитных материалов при внешних воздействиях обусловлено их ультрадисперсным строением: на достаточно большое количество суперпарамагнитных и ферромагнитных частиц, объединённых в систему посредством дальнедействующего диполь-дипольного взаимодействия, накладывается взаимодействие с наведённым внешним полем. Кроме того, действующие силы упругости и внешние механические воздействия изменяют координаты частиц в матрице с последующими изменениями распределения внутренних полей взаимодействия и, следовательно, изменениями свойств материала. Пересчёт взаимодействия «всех со всеми» при различных внешних воздействиях, расчёт новой структуры и последующее определение для неё интегральных характеристик, присущих моделируемому образцу, представляет собой хотя и простую, но весьма громоздкую по количеству математических операций задачу, неразрешимую в настоящее время на базе вычислительных мощностей, предоставляемых обычными персональными компьютерами, поэтому исследователи обычно ограничиваются упрощёнными, в частности двумерными, моделями с небольшим числом частиц [4, 5]. Достигнутый сегодня прогресс в развитии суперкомпьютерных методов позволяет решать подобные задачи.

Конечно, нужно отметить, что выбранный комплексный подход предполагает обязательную верификацию разработанной модели и сравнение результатов

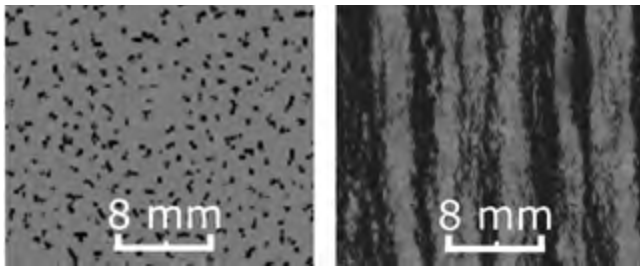


Рисунок 1. Микроструктура магнитоактивного эластомера: изотропная (слева) и анизотропная (справа)

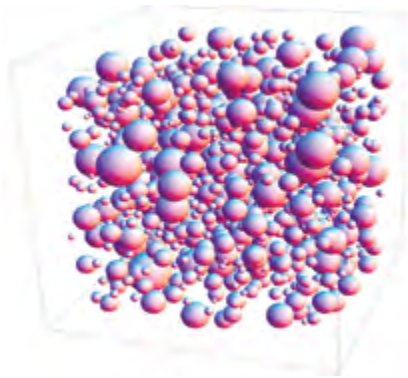


Рисунок 2. Модель изотропного МАЭ (число частиц – 104, объемная концентрация магнитного материала – 25%)

численных экспериментов с результатами физических опытов. Для этого проводятся экспериментальные исследования внутренней структуры и свойств магнитоактивных эластомеров с различной концентрацией и дисперсностью магнитного наполнителя [6], в частности, в Университете машиностроения (МАМИ) и Техническом университете Дрездена. Такие исследования, в первую очередь, позволили выбрать два наиболее подходящих для обеспечения травмобезопасности на автомобильном транспорте вида образцов вышеупомянутых материалов, микроструктура которых приведена на рис. 1. Это образцы двух противоположных по своим свойствам структур – изотропной и анизотропной. В качестве магнитного наполнителя в МАЭ используется порошок карбонильного железа. Магнитные частицы имеют форму, как правило, близкую к сферической. Средний диаметр частиц при этом варьируется от долей до нескольких десятков микрометров. Так, например, средний размер частиц коммерческого наполнителя фирмы BASF – 3,2 мкм, а частиц порошка ASC200 фирмы Höganös AB – 35 мкм. Величина диаметра частиц наполнителя описывается логнормальной функцией распределения.

Таким образом, для поиска МАЭ с желаемыми признаками приходится решать взаимодополняющие задачи: рассчитывать свойства материала с заданными характеристиками структуры, а затем проверять

найденные с помощью численного моделирования и удовлетворяющие экспериментаторов по определенным критериям решения. Это позволит сократить число произведённых экспериментальных образцов: можно экспериментировать только с образцами, которые наиболее перспективны с точки зрения моделирования; как следствие, сокращается время, затрачиваемое на физические эксперименты, то есть экономическая эффективность предлагаемого комплексного подхода к разработке и внедрению новых материалов с управляемыми свойствами очевидна. Для решения задач моделирования авторами была разработана компьютерная программа [7] на основе сверхмасштабируемого параллельного алгоритма. Вычисления осуществлялись на суперкомпьютерном кластере Sun производительностью до 10 Тфлопс с 480 вычислительными ядрами в Дальневосточном федеральном университете. В данной статье представлены результаты исследований эффектов деформации образцов МАЭ во внешнем магнитном поле в зависимости от упругости материала и объёмной концентрации ультрадисперсного ферромагнитного наполнителя.

#### ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ

Феноменологическая модель строится на реальных данных о морфологии реальных МАЭ, которые были получены авторами статьи: это изображения структуры образцов (рис. 1) и выполненный на их основе анализ распределения частиц по размерам, формам и расположению в пространстве (рис. 2 и рис. 3).

Такая предварительная симуляция реального образца служит отправной точкой для генерации набора модельных реализаций образцов с различными структурными и магнитными характеристиками и, что очень важно, является калибровочным инструментом

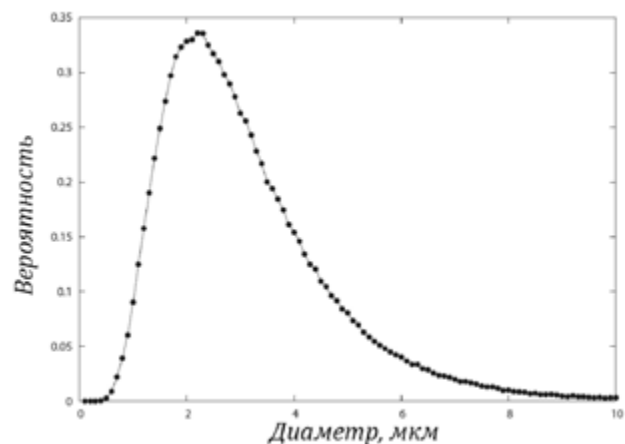


Рисунок 3. Распределение частиц по диаметрам

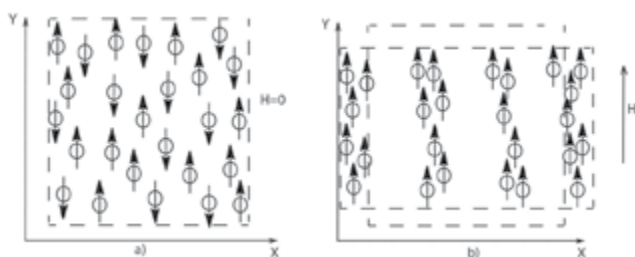


Рисунок 4. Схематичное изображение поведения системы взаимодействующих одинаковых магнитных частиц в упругой матрице а) без внешнего магнитного поля, б) во внешнем магнитном поле

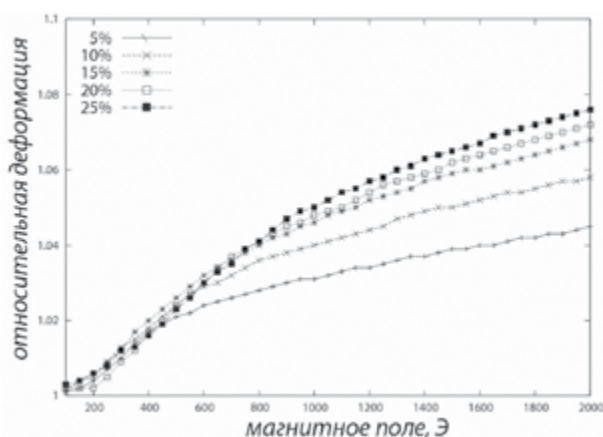


Рисунок 5. Зависимость относительной деформации от объёмной концентрации магнитного наполнителя

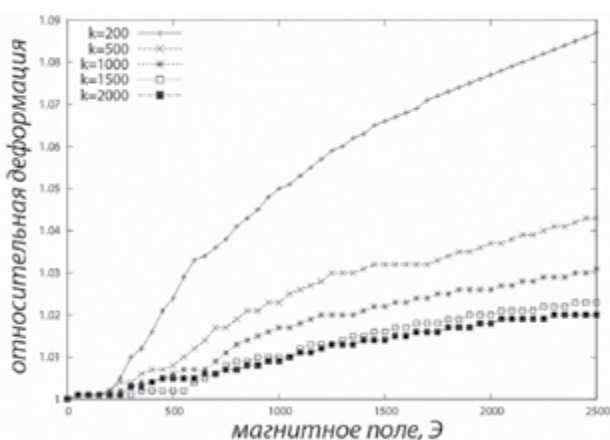


Рисунок 6. Зависимость относительной деформации от коэффициента упругости эластичной матрицы

для проверки точности и адекватности построенной математической модели и правильности расчётов с использованием разработанного программного продукта, поскольку физические свойства объекта исследований могут быть сопоставлены с расчётными.

Для моделирования МАЭ используется метод Монте-Карло, который позволяет задать нужное распределение частиц по размерам и формам, а также по координатам. Уровень кластеризации (слипания) частиц в изотропном и анизотропном случаях задаётся на основе экспериментальных данных.

В отсутствие внешнего поля суммарная намагниченность образца компенсирована случайным направлением магнитных моментов частиц. Пунктирной линией указаны границы образца. Приложение внешнего магнитного поля  $H$  приводит к тому, что магнитные моменты выстраиваются по направлению вектора  $H$ . Диполь-дипольное взаимодействие способствует отталкиванию частиц по оси  $X$  и притяжению по оси  $Y$ , что является причиной деформаций. Именно это обстоятельство делает необходимым исследование образцов с различным, в том числе анизотропным, распределением магнитных частиц. Магнитоупругие свойства гетерогенного МАЭ и его реакция на внешние воздействия будут сильно зависеть от свойств системы магнитных частиц.

Высокопроизводительный параллельный алгоритм расчёта деформации образца – системы одинаковых сферических однодоменных частиц во внешнем поле – предполагает конфигурации соответствующей равновесию энергии магнитоэластического взаимодействия  $E_{int}$  энергии частиц во внешнем магнитном поле  $E_{ext}$  и энергии упругих сил матрицы  $E_{el}$ . Естественно, что учёт распределения частиц по размерам и форме, а также учёт многодоменности и возможности подворотов по направлению внешнего поля приведёт к увеличению количества арифметико-логических операций, необходимых для получения результата, и, как следствие, к повышению требований к мощности вычислительной аппаратуры. Используемый авторами параллельный алгоритм моделирования является масштабируемым как по числу частиц, так и по числу процессов, позволяющих получить реакцию моделируемого МАЭ на внешнее магнитное поле, и предоставляет возможность работать с частицами реальных размеров.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несколько магнитоактивных эластомерных образцов с различной концентрацией ферромагнитных частиц (5–25%), изотропно распределённых в объёме образца, были исследованы методами численного моделирования. Микроструктура этих образцов, распределение частиц по размерам и распределение критических полей перемагничивания частиц были определены в указанной модели. При моделировании предполагалось, что удельная намагниченность частиц магнитного наполнителя была равна  $I_s = 500$  Эрг/(Гс·см<sup>3</sup>), критическое поле для частиц так же, как и объёмы, распределялось

по логнормальному закону и принимало максимальное значение 200 эрстед. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 5 и 6.

В данном простом приближении полученные результаты позволяют утверждать, что при прочих равных условиях образцы с относительно большим коэффициентом упругости и объёмной концентрацией частиц 25% и более должны обладать наибольшей способностью к деформации во внешнем магнитном поле и, соответственно, наибольшими способностями к демпфированию. Распределение частиц по внутренним полям играет роль фактора, сдерживающего реакцию магнитоактивного эластомера на внешнее магнитное поле. Первая точка перегиба на кривых деформации ассоциируется с преодолением критических полей, а вторая – с достижением намагниченности насыщения. Используемая модель представляет собой первое приближение, и вычисления ограничиваются диполь-дипольным взаимодействием сферических однодоменных частиц, распределённых изотропно в упруго деформируемой матрице. Однако даже эти расчёты позволяют ещё на стадии проектирования подобрать наиболее функциональный с позиции снижения энергетического уровня при столкновении магнитоактивный эластомер, не проводя тестовых испытаний.

Дальнейшее развитие модели может включать учёт мультидоменной структуры магнитных частиц магнитного наполнителя, учёт формы частиц, расчёт зависимости деформации при приложении внешних сил. Несмотря на простоту используемой модели, наблюдается качественное согласие между экспериментальными и теоретическими зависимостями деформации образцов магнитоактивных эластомеров во внешнем магнитном поле.

Как показали предварительные результаты сравнительного анализа, поведение микро- и наночастиц, предсказанное моделями, в достаточной степени точности соответствует тестовым экспериментам с МАЭ-образцами на динамическое нагружение, имитирующее столкновение ТС как с пешеходом на небольшой скорости, так и с неподвижным препятствием на скоростях, превышающих 60 км/ч. Таким образом, сделан ещё один шаг в направлении обеспечения безопасности на автомобильном транспорте: мотивированное решение об использовании наиболее перспективного энергопоглощающего смарт-материала (магнитоактивного эластомера) в демпфирующей конструкции пока находится на стадии подбора.

В качестве перспективных направлений продолжения данного исследования следует отметить использование разработанной методики и алгоритмов при создании не только травмобезопасных бамперов ТС [8], но и других демпфирующих конструкций на их основе, используемых в автомобильной промышленности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Балабин И.В., Богданов В.В., Симос Дж. Бампер легкового автомобиля как эффективный носитель функции защиты от травмирования участников движения // Журнал ААИ. – 2010. – № 5 (64).
2. Магнитореологический эластомер с эффектом памяти формы как компонент энергопоглощающего покрытия бампера АТС / И.В. Балабин, В.В. Богданов, Д.Ю. Борин и др. // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 10.
3. Применение магнитоактивных эластомеров в конструкциях энергопоглощающих бамперов транспортных средств / И.В. Балабин, В.В. Богданов, Д.Ю. Борин и др. // Журнал ААИ. – 2010. – № 6 (65).
4. Шульман З.П., Корлонский В.И. Магнитореологический эффект. – Минск: Наука и техника, 1982. – 183 с.
5. Райхер Ю.Л., Столбов О.В. Моделирование магнитоэластических деформаций в мягких магнитных эластомерах // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2. – № 2. – С. 85–95.
6. X-ray micro-tomographic characterization of field-structured magnetorheological elastomers / D. Günther, D. Yu. Borin, S. Günther, S. Odenbach // Smart Materials & Structures. – 2012. – Vol. 21, 015005.
7. Нефедев К.В., Андриященко П.Д. Масштабируемое программное обеспечение суперкомпьютерного кластера для моделирования реакций магнитоактивного эластомера на внешние воздействия // Свидетельство о государственной регистрации ПЭВМ № 2012619214; заяв. 27.08.2012; зарег. 12.10.2012.
8. Богданов В.В., Борин Д.Ю., Степанов Г.В., Семиренко Д.А., Франк А. Ударозащитное устройство транспортного средства с управляемой системой демпфирования на основе магнитоактивных эластомеров. Патент РФ на изобретение № 2424133.