

Проект РФФ № 19-13-00340

«Создание магнитоактивных полимерных материалов нового поколения на основе полимерных матриц с регулируемой на молекулярном уровне структурой»

Общие исследования магнитоактивных, магнитоуправляемых полимеров. Получение зависимостей магнитореологических свойств от типа матрицы и магнитного наполнителя.

Магнитоактивные полимерные материалы (МПМ) нового поколения, способные изменять свои физические свойства под действием внешних магнитных полей, привлекают постоянно растущий в последнее время интерес благодаря широкому кругу новых физических явлений, наблюдаемых в этих материалах, и большому потенциалу их практического применения. МПМ – это композиты, основанные на ферромагнитных частицах, диспергированных в жидких (магнитные жидкости) или эластомерных (магнитные эластомеры) средах. Под действием внешнего магнитного поля магнитные частицы намагничиваются и начинают взаимодействовать друг с другом посредством магнитных сил. Результат этого взаимодействия зависит от типа дисперсионной среды. В магнитных жидкостях частицы свободно перемещаются и выстраиваются в так называемые цепочечные структуры вдоль линий магнитного поля, что приводит к появлению предела текучести и очень быстрому (доли миллисекунд) переходу от жидкого к практически твердому состоянию. В эластомерных средах движение частиц ограничено упругостью полимерной матрицы, и в этом случае результирующие мезоскопические структуры, которые образуют магнитные частицы, зависят от модуля упругости эластомера: чем меньше модуль, то есть, чем мягче матрица, тем большие смещения частиц из начального положения равновесия могут реализоваться под действием внешнего магнитного поля. Изменение внутренней структуры эластомерного материала в магнитном поле приводит к появлению целого ряда новых физических эффектов, в частности, магнитореологического (модуль упругости магнитоактивных эластомеров может возрастать на несколько порядков в относительно небольших магнитных полях до 300 мТл), магнитодеформационного (деформации материала в однородном и градиентном магнитных полях достигают 20% и 150%, соответственно) и ряда других. Благодаря своим уникальным свойствам магнитоактивные материалы перспективны для широкого круга практических приложений, при этом магнитные жидкости на основе низкомолекулярных растворителей уже получили широкое распространение в качестве элементов демпфирующих и уплотняющих устройств, смазочных материалов, полировальных средств и т.д., в то время как магнитоактивные эластомеры находятся в настоящее время в основном на стадии патентования различных устройств на их основе.

Несмотря на кажущуюся простоту основных принципов функционирования магнитоактивных материалов, создание этих материалов сталкивается с целым рядом трудностей, которые тормозят дальнейшее развитие этого направления. К ним относятся, в первую очередь, получение композиций с заданным распределением магнитных частиц, стабильным в процессе эксплуатации, регулирование уровня магнитного отклика и времен релаксации процессов перестройки магнитных структур в магнитном поле, отсутствием адекватных теоретических моделей для фундаментального осмысления всей совокупности сложных взаимодействий в этих системах с последующим прогнозированием их свойств. Исследование, планируемое в рамках проекта и направленное на решение данных проблем, является безусловно актуальным и важным для создания новых материалов.

Новизна проекта заключается (1) в разработке новых полимерных дисперсионных сред, регулирование свойств которых на молекулярном уровне позволит управлять уровнем перестройки микроструктуры наполнителя под действием внешнего магнитного поля, а, следовательно, и физическими свойствами композиционного материала, которые зависят от его микроструктуры и (2) разработке новых теоретических подходов для описания свойств магнитоактивных полимерных материалов, основанных на представлении о фрактальной природе как полимерной среды, так и агрегатов магнитных частиц, формирующих фрактальную сетку, параметры которой могут изменяться под действием магнитного поля.

В качестве новых дисперсионных сред предлагается использовать силиконовые полимеры со сложной архитектурой, контролируемой на молекулярном уровне: так называемые полимерные щетки – гребнеобразные полимеры с высокой линейной плотностью прививки боковых цепей – и многолучевые звезды. В то время как последние предполагается использовать для создания магнитных жидкостей, полимерные щетки представляются универсальной средой для получения как жидких, так и эластомерных композиций, модуль упругости которых может варьироваться в очень широких пределах за счет изменения параметров структуры таких макромолекул (длины и линейной плотности прививки боковых цепей) и их степени сшивки. Использование низкомолекулярных силиконовых полимерных щеток позволит получать магнитоактивные эластомерные композиции с высоким уровнем перестройки структуры магнитного наполнителя и, следовательно, высоким откликом на магнитные поля, что позволит (а) отказаться от необходимости вводить в состав композиций низкомолекулярные масла для снижения их модуля, как это делается в настоящее время; (б) позволит снизить содержание магнитного наполнителя в МПМ при сохранении или даже увеличении магнитного отклика материала, что очень важно для практических применения данного материала. Кроме того, создание «линейки» магнитоактивных полимерных композиций – от жидкостей до эластомеров с возрастающим модулем упругости – позволит на примере этих систем провести фундаментальное исследование влияния баланса упругих и магнитных взаимодействий на уровень перестройки наполнителя и, как следствие, на результирующие вязкоупругие, деформационные и магнитные свойства материала. С другой стороны, полученные обширные экспериментальные данные создадут основу для проверки новых теоретических моделей, разрабатываемых в рамках данного проекта для адекватного описания поведения МПМ в магнитных полях.

Успешное выполнение научной программы проекта, основанной на междисциплинарном подходе, включающем в себя работы по синтезу новых матриц, магнитных частиц и МПМ на их основе, физические исследования их свойств и построение теоретических моделей, может привести к существенному прогрессу не только в создании новых магнитных материалов как таковых, а также в повышении их надежности и дальнейшего расширения сфер их практического применения.

1. Наджарьян Т.А., Столбов О.В., Райхер Ю.Л., Крамаренко Е.Ю. Surface structure of a magnetoactive elastomer with anisotropic filler in the presence of magnetic field: a single-particle model 2019 Soft Matter <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2019/sm/c9sm02090j>

Рельеф поверхности магнитоактивных эластомеров (МАЭ) на основе мягких полимерных матриц, заполненных анизотрическими магнитно-твердыми наполнителями, исследован теоретически в магнитных полях, приложенных перпендикулярно поверхности МАЭ. Разработана одночастичная двумерная ячейка, описывающая вращение одной отдельной эллиптической частицы в приповерхностном слое МАЭ. Угол равновесного вращения частиц определяется балансом между зеемановскими, магнитными анизотропиями и упругими (генерируемыми в полимерной матрице) приращением энергии. Модель Стонера – Вольфарта используется для описания магнитных свойств частиц наполнителя, в то время как упругая энергия как функция угла поворота частиц оценивается численно с использованием FEM-моделирования. Репрезентативная поверхностная система МАЭ строится посредством суперпозиции одночастичных ячеек с магнитными частицами, управляемыми полем, и характеристики рельефа поверхности выводятся для различных наборов геометрических и статистических параметров. Ограничения предложенного подхода были обсуждены.