

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

Физический факультет

Кафедра магнетизма

Бакалаврская работа

**Влияние магнитного поля на механические свойства
магнитореологических эластомеров**

Работу выполнила:
студентка 419 группы
Алехина Юлия Александровна

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., Ассистент
Семисалова Анна Сергеевна

Зав. кафедрой магнетизма

Д. ф.-м. н., профессор Перов Н.С.

Москва

2016

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Обзор литературы	5
Глава 2. Методика измерений.....	19
2.1. Измерения силы взаимодействия эластомеров с системой магнитов.....	19
2.2. Измерения магнитной проницаемости эластомеров	20
2.3 Измерения реологических характеристик эластомеров	22
Глава 3. Исследуемые образцы.....	23
3.1 Изготовление и описание образцов.....	23
3.2. Реологические измерения.....	25
Глава 4. Результаты	29
4.1. Взаимодействие с полем постоянных магнитов	29
4.2. Взаимодействие с переменным магнитным полем.....	33
Основные результаты	38
Список использованной литературы	39
Благодарности	41

Введение

Магнитореологические эластомеры относятся к классу «умных» материалов, изменяющих собственные свойства при изменении внешних условий. Своей принадлежностью к этому классу они обязаны ряду интересных особенностей поведения в магнитном поле. Эластомеры способны проявлять магнитную память формы, магнитодеформационный и магнитореологический эффекты и т.д., что делает их крайне интересными материалами для фундаментального исследования и практических применений.

В настоящее время изучение магнитореологических эластомеров преимущественно сфокусировано на подборе оптимального состава материала для конкретного практического приложения. Существуют разработки амортизаторов, некоторые из которых уже нашли применение в автомобильной индустрии. Удаленное управление свойствами эластомеров с помощью магнитного поля позволяет внедрять их в область биомедицины. Актуаторы на основе магнитореологических эластомеров могли бы найти применение в различных областях от робототехники до микрофлюидики. Применение эластомеров не требует больших энергетических затрат, но позволяет быстро и обратимо управлять элементом устройства, что обуславливает широкую перспективность их использования.

Кроме того, магнитореологические эластомеры представляют огромный интерес и для фундаментальных исследований. Они являются композитными материалами, состоящими из множества взаимодействующих элементов. Аналитический расчет их поведения потребовал бы совместного решения огромного количества уравнений для каждого момента времени. Численное моделирование системы возможно только в определенных приближениях, что подтверждает необходимость комплексного экспериментального изучения поведения эластомеров и его зависимости от параметров этих материалов.

Особенности магнитореологических эластомеров, проявляющиеся при приложении магнитного поля, обусловлены взаимодействием эластомера с этим магнитным полем.

Изучение этого взаимодействия может дать базовые представления о поведении эластомеров в различных условиях.

Цель данной работы – исследование механических свойств магнитореологических эластомеров и влияния постоянного и переменного магнитного поля на их характеристики, определение особенностей взаимодействия эластомеров с магнитным полем.

Глава 1. Обзор литературы

Магнитоэологические эластомеры – материалы, представляющие огромный интерес для фундаментальных и практических исследований. Они принадлежат к классу так называемых «умных» материалов, изменяющих собственные свойства при изменении условий среды или приложении внешних воздействий (магнитное и электрическое поле, давление, пр.). Магнитоэологические эластомеры часто рассматриваются как твердый аналог феррожидкостей: они представляют собой неферромагнитную упругую матрицу, наполненную ферромагнитными частицами. Главным преимуществом эластомеров перед жидкостями является то, что для своего использования они не требуют емкостей, которые бы значительно усложняли конструкции устройств.

При приложении поля магнитные моменты частиц наполнителя упорядочиваются за счет взаимодействия с полем, что изменяет их взаимодействие между собой и может привести к обратимому смещению частиц внутри упругой матрицы (Рис. 1). Такое упорядочение оказывает влияние на магнитные, электрические и механические свойства эластомера в целом. Таким образом, изменять свойства материала можно дистанционно, обратимо и непрерывно во времени, так как время реакции эластомера на изменение поля мало.

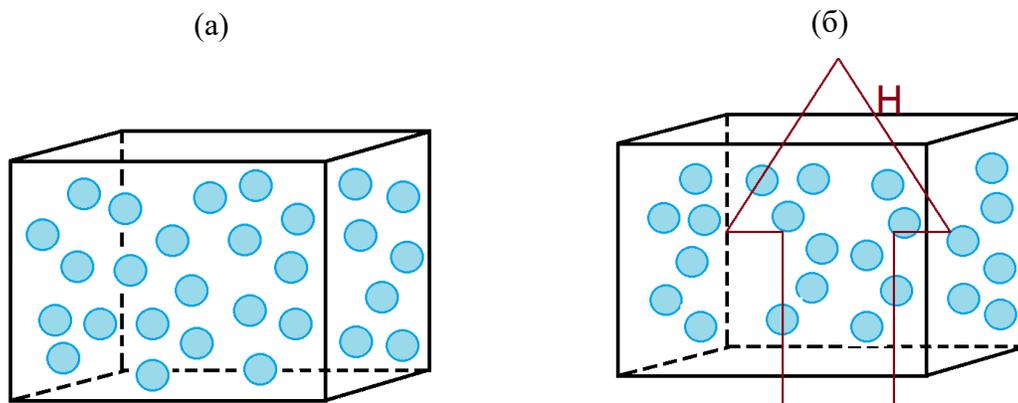


Рис. 1. Схематическое изображение эластомера в отсутствие внешнего поля (а) и во внешнем поле (б).

Исследования в области магнитоэологических эластомеров преимущественно сфокусированы на подборе параметров составляющих эластомера (размер и материал частиц, свойства матрицы-носителя), необходимых для получения определенных свойств

материала как целого. Наиболее часто ключевыми требованиями к частицам наполнителя являются магнитномягкие свойства - большая восприимчивость, малая остаточная намагниченность, большая намагниченность насыщения. Частицы с большой восприимчивостью обеспечивают отклик эластомера даже на малые магнитные поля. Малая остаточная намагниченность позволяет избежать слипания частиц из-за взаимодействия, что делает отклик полностью обратимым [1]. Наиболее часто для изготовления эластомеров используется железный порошок, который характеризуется большой намагниченностью насыщения, что позволяет получить значительную реакцию эластомера на изменение внешнего поля [2]. Для получения свойств, оптимальных для тех или иных условий (частоты и амплитуды деформации, в частности), используются различные размеры частиц наполнителя и различные массовые концентрации частиц в эластомере [3,4]. Возможно также и использование смеси частиц разного рода в качестве наполнителя. В этом случае воздействие внешнего поля на частицы разных видов будет отличаться, что повлечет отличия в свойствах эластомеров с различными соотношениями между концентрациями частиц каждого типа [5].

В отсутствие внешнего поля магнитные моменты частиц магнитномягкого материала близки к нулю, поэтому эластомеры в статических экспериментах демонстрируют линейную упругую зависимость напряжения от деформации по закону Гука. Необычное поведение проявляется только при включении магнитного поля: жесткость материала увеличивается, а его поведение становится нелинейным даже при малых деформациях. Более того, зависимости напряжения от деформации имеют гистерезисный характер [6].

Эластомеры с частицами из магнитножесткого материала намагничены в отсутствие внешнего поля и характеризуются зависящим от деформации модулем упругости и эффектом памяти формы. В работе [6] при измерении магнитных свойств материалов с частицами неодим-железо-бор было получено, что коэрцитивная сила увеличивается с ростом жесткости матрицы. Так как коэрцитивная сила постоянных магнитов зависит от ориентации магнита, можно предположить, что в процессе перемангничивания частицы поворачиваются внутри полимерной матрицы. В экспериментах наблюдался так называемый эффект магнитной вязкости (изменения

магнитных свойств со временем), который может быть объяснен вкладом упругости матрицы в смещение частиц наполнителя.

При исследовании механических свойств было обнаружено, что ориентация поля значительно влияет на механические характеристики. Приложение даже слабого магнитного поля может как увеличивать, так и уменьшать модуль упругости образца в зависимости от его ориентации относительно намагниченности образца. При приложении магнитного поля в направлении противоположном намагниченности был обнаружен резкий скачок тангенса потерь, связанный с вращением частиц и потерей энергии.

При изготовлении эластомеров в их состав часто добавляются дополнительные компоненты, улучшающие свойства материала. Так, в качестве добавок часто используются специальные покрытия и поверхностно-активные вещества, катализаторы, неферромагнитные частицы, улучшающие механические свойства и способствующие равномерному распределению наполнителя в матрице [3]. Добавки для увеличения пластичности позволяют равномерно распределить напряжения в эластомере и, следовательно, повысить стабильность его свойств при эксплуатации. Использование поверхностно-активных веществ увеличивает адгезию между частицами и полимерной матрицей и позволяет избежать проскальзывания частиц и разрывов [7]. Кроме того, покрытие частиц может обеспечить электрическую изоляцию материала с проводящими частицами. С этой же целью могут использоваться непроводящие частицы. Меньшей проводимости эластомера можно добиться, используя частицы с меньшей проводимостью. Включение проводящих частиц графита в эластомер также позволяет добиться большего электрического сопротивления эластомера, так как его проводимость на два порядка меньше проводимости железных частиц. Эластомер с такими частицами изменяет сопротивление под действием сжимающей силы или приложенного магнитного поля [8]. Частицы графита также влияют на движение железных частиц в эластомере, тем самым препятствуя образованию агломератов частиц при изготовлении эластомера.

Распределение частиц в эластомере оказывает значительное влияние на его свойства. По этому критерию эластомеры делятся на анизотропные и изотропные (Рис. 2). Изотропные образцы изготавливаются в отсутствие внешнего магнитного поля, частицы в них распределены равномерно по всему объему образцов.

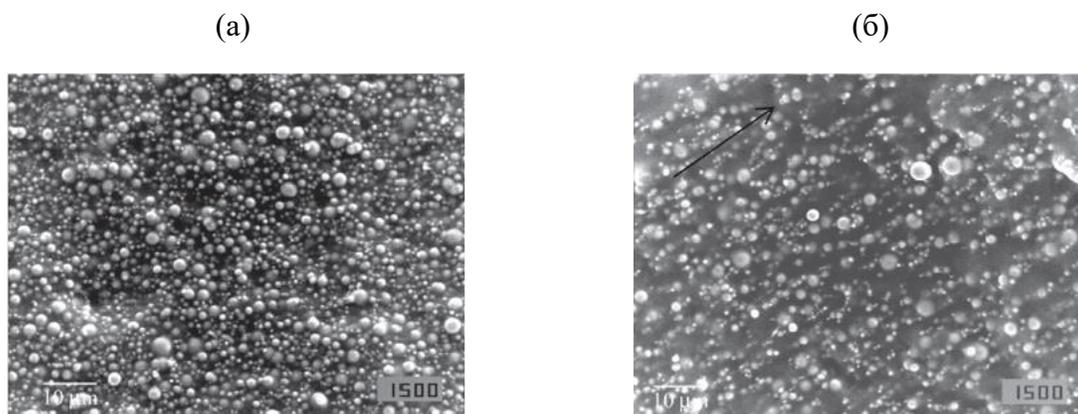


Рис. 2. Изотропное (а) и анизотропное (б) распределение частиц в эластомере [1].

При изготовлении анизотропных эластомеров к смеси полимера и наполнителя в процессе полимеризации прикладывается магнитное поле (Рис. 3). Процесс упорядочения определяется тремя факторами: напряженностью магнитного поля, временем нахождения в поле и температурой (при повышении температуры уменьшается сопротивление среды перемещению частиц). При приложении поля магнитные моменты частиц упорядочиваются. Вследствие диполь-дипольного взаимодействия частицы занимают состояние минимума энергии и выстраиваются в цепочкоподобные структуры, которые фиксируются полимерной матрицей при полимеризации. В этом случае для деформации образца требуется дополнительная энергия, связанная с выводом частиц из этого состояния. Упорядочение частиц определяет механические свойства образца: отклик эластомера будет зависеть от направления воздействия.

Возможно и искусственное создание анизотропного распределения частиц. Для этого создается шаблон слоев распределения наполнителя, в которые помещаются частицы и заливается полимерная основа. Затем все слои соединяются в определенном порядке, создавая систему с заданным положением частиц. Таким образом можно создать подобие кристаллической решетки, шахматное распределение и т.д. [3].

Наполнение матрицы увеличивает модуль упругости. Особенно сильно этот эффект проявляется в эластомерах с мягкой матрицей. Более того, модуль упругости эластомеров с анизотропным распределением значительно превышает модуль упругости изотропных эластомеров. Цепочкоподобные структуры, образовавшиеся в процессе изготовления таких образцов, армируют образец, затрудняя его деформации [9].

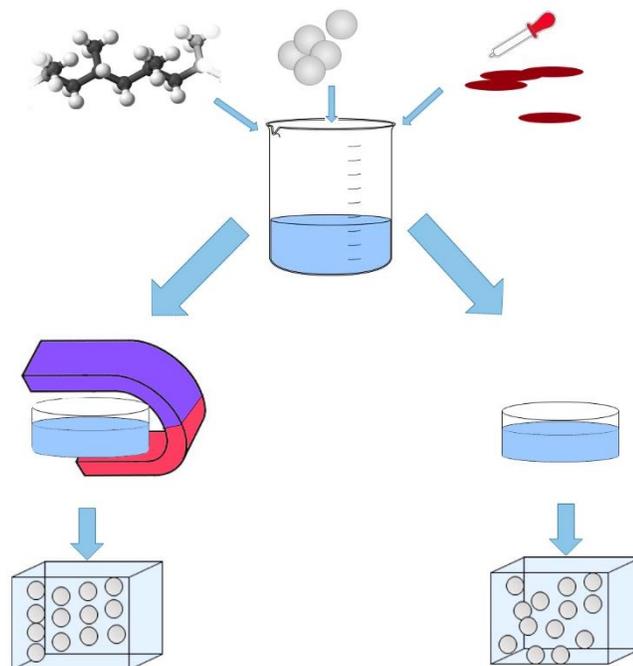


Рис. 3. Процесс изготовления эластомеров.

Матрица-носитель также оказывает значительное влияние на свойства магнитореологических эластомеров. Насыщенные эластомеры (не требующие процесса вулканизации), такие, как силиконовая резина, завоевали большой интерес изготовителей. Магнитореологические эластомеры на основе натуральной и синтетической резины, относящихся к ненасыщенным (требующим вулканизации) эластомерам, обладают лучшими механическими свойствами и термоустойчивостью (например, предел прочности эластомеров на основе натуральной резины примерно в 10 раз больше, чем у эластомера на основе силикона), однако, процесс их изготовления технически сложен и требует специального оборудования. Тем не менее, эластомеры на основе синтетической резины также широко используются благодаря стабильности свойств в широком диапазоне температур и устойчивости к старению [3].

Как композитный материал эластомеры имеют ряд особенных характерных механических свойств. Основной особенностью магнитореологических эластомеров является так называемый магнитореологический эффект, заключающийся в увеличении модуля упругости эластомера в магнитном поле. Магнитореологический эффект

обусловлен структуризацией частиц при помещении эластомера в поле. Она происходит под влиянием двух факторов: эластичности матрицы и магнитных взаимодействий. При приложении магнитного поля происходит упорядочение магнитных моментов частиц наполнителя. При небольшой жесткости матрицы-носителя частицы могут выстраиваться в цепочкоподобные структуры вследствие диполь-дипольного взаимодействия, деформируя структуру полимера. В таких цепочкоподобных структурах взаимодействие частиц более сильное из-за меньшего расстояния между ними. Таким образом, образовавшиеся структуры увеличивают модуль упругости эластомера за счет более сильного взаимодействия частиц. При большом значении жесткости матрицы действие силы упругости значительно преобладает над действием сил диполь-дипольного взаимодействия, поэтому перестроения частиц не происходит, а наблюдается лишь упорядочение магнитных моментов. Сами частицы остаются на больших расстояниях друг от друга, и силы их взаимодействия имеют величину меньшую, чем в первом случае. Вследствие этого магнитореологический эффект в образцах с жесткой матрицей значительно меньше, чем в образцах с мягкой матрицей. В работе [9] авторы статьи отмечают увеличение модуля упругости в $10^4\%$ при жесткости в 10-20 кПа и $10^6\%$ при жесткости 100-2000 Па. В анизотропном образце уже существует некоторое упорядочение частиц, поэтому магнитное поле, укрепляющее образовавшиеся при изготовлении образца цепочки за счет усиления взаимодействия частиц, также вызывает увеличение модуля упругости. Магнитореологический эффект в эластомерах увеличивается с увеличением концентрации частиц. Помимо массовой доли влияние на эффект оказывает и размер частиц: эластомеры с большими частицами демонстрируют больший магнитореологический эффект [10]. Анизотропное распределение частиц также отражается в большем значении магнитореологического эффекта. Наибольшее значение можно получить при объемной доле частиц в 30%. Если частицы распределены изотропно, то больший эффект можно получить при небольших концентрациях наполнителя [3].

Также эластомеры обладают особенностями неупругих свойств и поглощения энергии. Поглощение определяется внутренними потерями эластомера. Эти потери связаны со слабой связью между частицами и матрицей и зависят от параметров

используемых материалов. При критическом напряжении нарушение этих связей является недостатком полимера, так как напряжение концентрируется в слабых местах связи [11].

Будучи композитными полимерными материалами, эластомеры демонстрируют эффект Пэйна – зависимость модуля упругости от амплитуды деформации. При амплитудах деформации выше некоторого критического значения модуль упругости быстро уменьшается, выходя на постоянное значение в области больших амплитуд. Модуль потерь же имеет максимум в области, где спадает модуль упругости (Рис. 4(a)). Эффект Пэйна зависит от концентрации и природы наполнителя и исчезает в пустом эластомере.

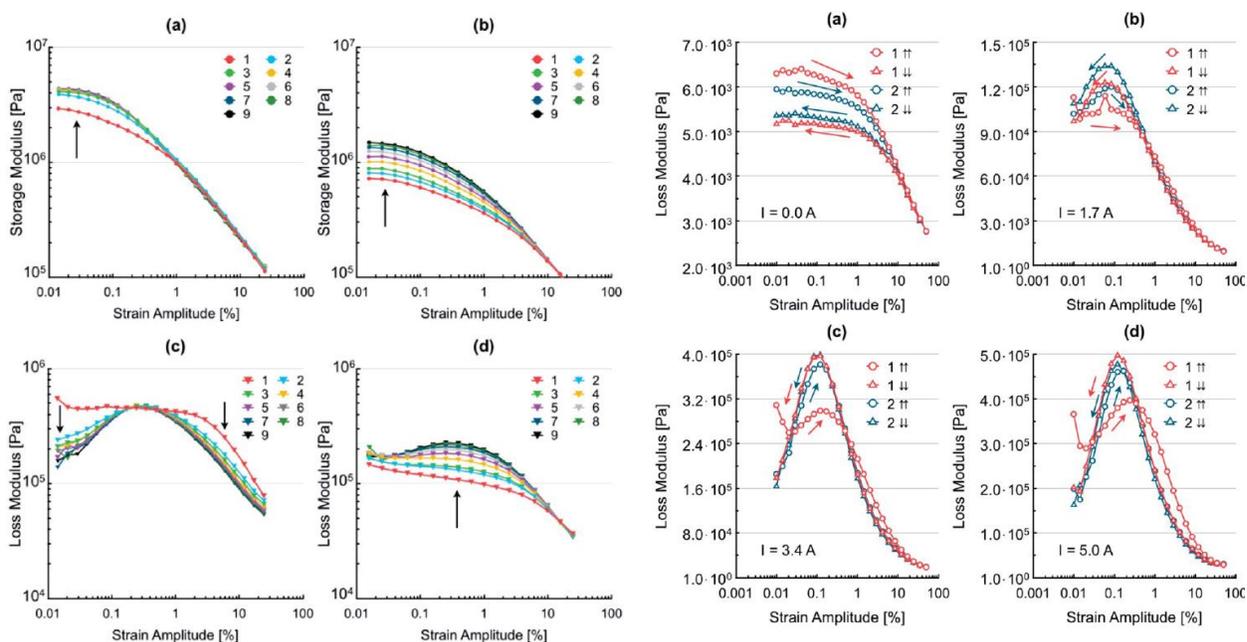


Рис. 4(a). Зависимость модулей упругости и потерь от амплитуды деформации. Проявление эффекта Пэйна [9].

Рис. 4(б). Зависимость модулей упругости и потерь от амплитуды деформации при приложении внешнего поля. Усиление эффекта Пэйна [9].

Это явление может быть объяснено взаимодействием частиц между собой. С целью минимизировать энергию частицы смещаются из начального положения, стремясь образовать цепочкоподобные структуры, и укрепляют материал за счет взаимодействий. При малых деформациях образовавшиеся структуры наполнителя искривляются, тогда как большие деформации, ослабляя взаимодействия, разрушают их, чем смягчают материал.

Рост модуля потерь может быть объяснен затратами энергии на разрыв взаимодействий между частицами. Эффект Пэйна усиливается в магнитном поле (Рис. 4(б)). В самом деле, частицы наполнителя в присутствии магнитного поля взаимодействуют сильнее из-за упорядоченности магнитных моментов. Таким образом, взаимодействие между частицами приводит не только к увеличению модулей упругости и потерь, но и к их амплитудной зависимости. При этом, в образцах с анизотропным распределением частиц спад более выраженный, что доказывает, что механизм эффекта, наиболее вероятно, соотносится с разрушением и образованием цепочкоподобных структур[9].

В эластомерах с мягкой матрицей за счет их сильного взаимодействия с магнитным полем возникает так называемый магнитодеформационный эффект, заключающийся в увеличении длины образца с увеличением магнитного поля (Рис. 5) [7].

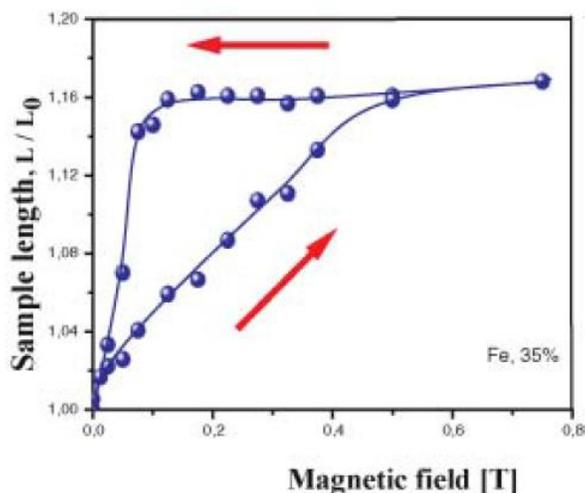


Рис. 5. Изменение длины образца во внешнем поле. Магнитодеформационный эффект [7].

В работе [3] было отмечено, что в эластомерах с мягкой матрицей и несферическими частицами наполнителя также может наблюдаться эффект изменения длины. Авторы работы объясняют этот эффект поворотом частиц в матрице (Рис. 6).

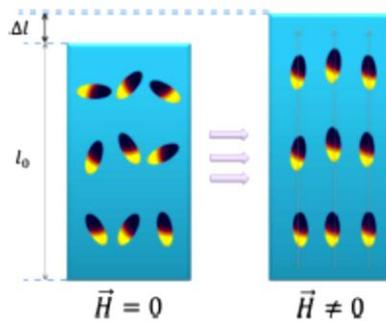


Рис. 6. Эффект изменения длины эластомера, вызванный поворотом несферических частиц[3].

Кроме того, эластомеры обладают так называемой магнитной памятью формы. Память формы – способность деформированного тела возвращать исходную форму после отключения внешнего воздействия (Рис. 7). В случае магнитной памяти формы эффект может быть объяснен следующим образом. При приложении магнитного поля частицы стремятся выстроиться в цепочки. Внутренние деформации участков полимерной матрицы, заключенных между частицами, увеличиваются. Частицы наполнителя изменяют свое положение относительно первоначального и занимают состояние, равновесное относительно действия сил диполь-дипольного взаимодействия и силы упругости матрицы. Весь образец находится в состоянии локального минимума энергии системы. Приложение внешней механической силы разрывает цепочки частиц, но тут же образуются новые, и каждая частица снова оказывается в равновесном состоянии.

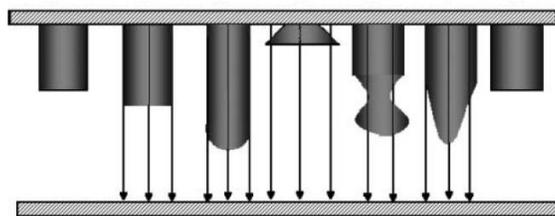


Рис. 7. Эффект памяти формы в магнито-реологических эластомерах при различных деформациях [7].

Благодаря диполь-дипольному взаимодействию образец сохраняет свою форму в магнитном поле. Если воздействие механической силы прекратится, то будет наблюдаться остаточная деформация образца. Только с прекращением действия магнитного поля силы

диполь-дипольного взаимодействия уменьшаются из-за размагничивания магнитномягких частиц, и образец возвращает исходную форму благодаря упругости матрицы [7].

Более того, эластомеры могут демонстрировать гистерезисное поведение механических свойств. Механический гистерезис связан с тем, что потери энергии, произошедшие в процессе увеличения нагрузки, не восполняются при снятии этой нагрузки. Отсутствие прямого соответствия между приложенной силой и положением частицы в матрице и ведет к изменению механических характеристик. В работе [12] было продемонстрировано, что в магнитном поле потери в образце увеличиваются из-за перестроения частиц и трения между ними. Сеть взаимодействующих частиц может быть разрушена только при достижении полем некоторого критического значения, когда сила упругости уравняется с силой магнитного взаимодействия. При этом, большие частицы теряют больше энергии. При малых деформациях потери становятся меньше, чем были в отсутствие поля, из-за взаимодействия частиц наполнителя. При больших деформациях наблюдается резкий рост модуля потерь, подобный наблюдаемому в жидкостях, что может быть объяснено только разрывом полимерной матрицы. В работе [13] динамические измерения проводились при приложении циклической синусоидальной нагрузки. Полученные зависимости также имеют гистерезисный характер.

Большой интерес представляет поведение эластомеров в переменном магнитном поле. В работе [14] для изучения механического поведения эластомеров в переменном поле образец с 25% карбонильного железа помещался в соленоид так, чтобы верхняя часть оставалась снаружи соленоида. При приложении поля наблюдалось изменение длины образца. На частотной зависимости амплитуды вибрации можно увидеть резонанс на частоте около 20-30 Гц (Рис. 8).

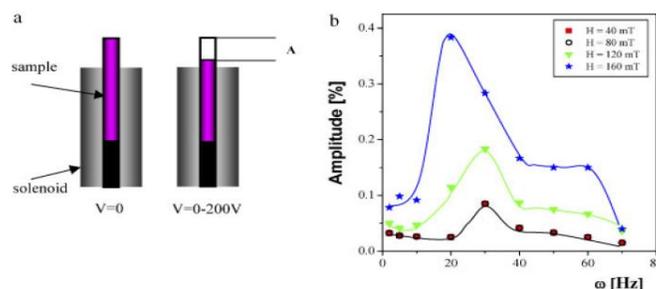


Рис. 8. Резонансное поведение магнитореологического эластомера с частицами железа в переменном магнитном поле [14].

С целью получить материал, который реагировал бы на магнитное и электрическое поле, был создан магнитоэлектрореологический эластомер [15]. Он представляет собой частицы карбонильного железа, покрытые диэлектрической оболочкой из полиакрилонитрила толщиной 100 нм и распределенные в силиконовой матрице. Магнитореологические свойства эластомера демонстрируют эффект Пэйна и магнитореологический эффект, свойственные магнитореологическим эластомерам. Приложение же электрического поля ведет к схожим зависимостям. Одновременное приложение электрического и магнитного полей отражается в дальнейшем увеличении модуля упругости. Принцип суперпозиции в данном случае не имеет места: эффект от суммарного приложения полей не является суммой отдельных эффектов.

Помимо свойств материала как целого интерес представляют также и свойства конкретных объектов, изготовленных из магнитореологических эластомеров. Так, в работе [16] показана структура микростолбиков из магнитореологического эластомера, позволяющая управлять смачиваемостью поверхности с помощью магнитного поля. Тип и «степень» движений зависят от распределения (изотропное, анизотропное) магнитных частиц внутри столбиков и силы и направления градиента магнитного поля. Измерения углов скатывания капель жидкости показали, что смачиваемость поверхности в случае наклона микростолбиков и всей поверхности образца в одну сторону уменьшается, а в случае противоположных направлений наклона – увеличивается (Рис. 9).

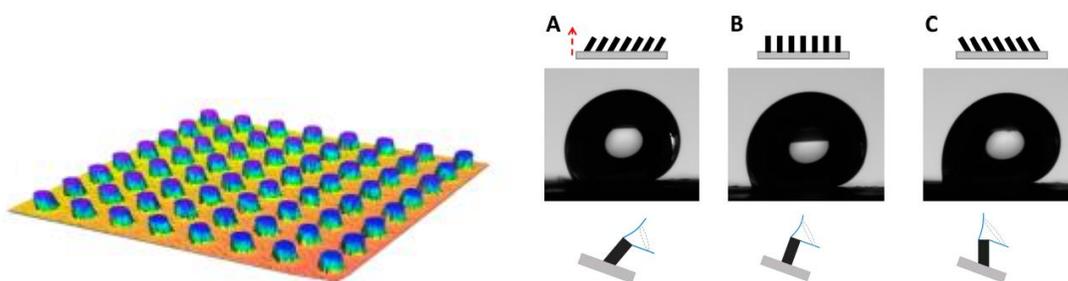


Рис. 9. Столбчатая структура и изменение смачиваемости в результате наклона микростолбиков [16].

Столбчатые структуры исследуются и в качестве образцов с переменной жесткостью [17]. Такие материалы могут изменять жесткость в широком диапазоне под воздействием магнитного поля (Рис. 10).

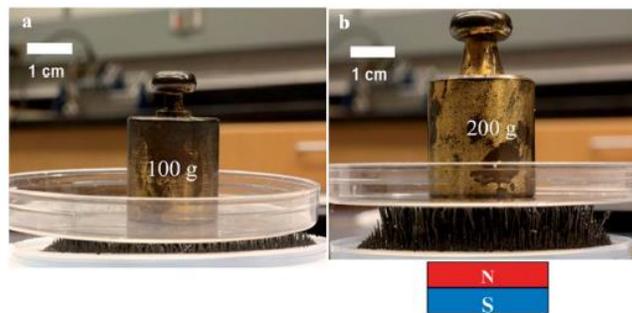


Рис. 10. Столбчатая структура с переменной жесткостью [17].

Применение эластомеров не требует больших энергетических затрат и позволяет быстро, обратимо и, что особенно важно, удаленно управлять элементом на основе магнитореологического эластомера. Большое внимание к эластомерам проявляется в различных биомедицинских приложениях. В частности, эластомеры могли бы использоваться в качестве материала для создания искусственных мышц [3]. Время их отклика на магнитное поле схоже со временем реакции мышечной ткани на нервные импульсы. Кроме того, существуют разработки перистальтических насосов на основе магнитореологических эластомеров [18]. Каналы таких насосов схлопываются магнитным полем, перекрывая поток жидкости, и раскрываются после отключения магнитного поля, затягивая жидкость в прежде сжатую область, чем обеспечивают перемещение жидкости по каналу. Также эластомеры могут использоваться в области онкологии для лечения опухолей способом гипертермии. В случае проводящих частиц эластомеры, поглощая энергию электромагнитного поля из-за скин-эффекта, демонстрируют нагрев. Более того, эластомеры позволяют обеспечить управляемую магнитным полем доставку лекарств [19].

Магнитореологические эластомеры могут выступать в качестве материалов для изготовления движителей. Так, многослойный актюатор с гидрофобной поверхностью может использоваться в микрофлюидике и «лабораториях на чипах» для управления движением капель. Поднесение магнита к многослойной упругой пластинке со слоем магнитореологического эластомера приводит к образованию углубления. При перемещении магнита перемещается и само углубление. Так как капли жидкости стремятся занять низшую точку в углублении, то и они следуют за перемещением магнита

(Рис. 11). С помощью такого актюатора могут быть осуществлены химические реакции в микроскопических объемах веществ [20].

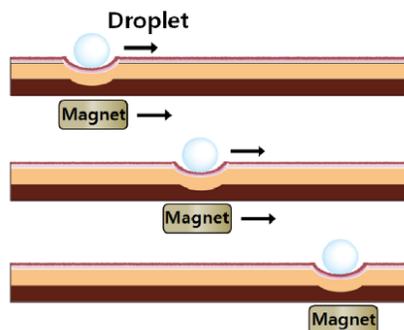


Рис. 11. Управление движением капли с помощью актюатора на основе магнитореологического эластомера [20].

Наиболее распространенным и развитым применением эластомеров на данный момент является использование магнитореологического эффекта при функционировании амортизаторов и поглотителей вибрации [1, 19, 10]. При приложении магнитного поля за счет изменения модуля упругости материала изменяется собственная частота колебаний системы, основанной на эластомере. Отдалив собственную частоту от частоты вынуждающей силы, можно уменьшить коэффициент передачи устройства, что и обеспечивает изоляцию от вибраций (Рис. 12). Подобные амортизаторы уже сейчас используются в автомобильной технике. Кроме того, такие устройства нашли бы широкое применение в строительстве зданий в сейсмически-активных зонах, так как позволяют обеспечить смещение этажей друг относительно друга и предотвратить разрушение конструкции.

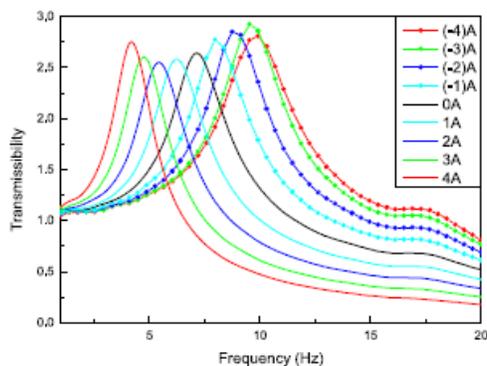


Рис. 12. Зависимость коэффициента передачи от частоты вынуждающей силы при различных величинах тока в катушке, создающей магнитное поле [19].

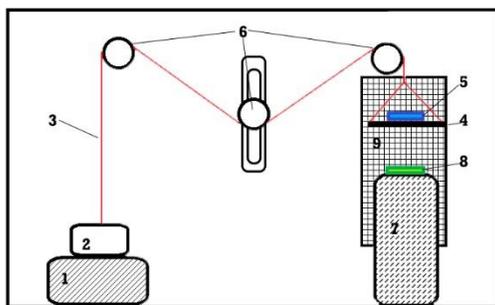
Таким образом, магнитореологические эластомеры как композитные материалы со множеством взаимодействующих элементов уже сейчас представляют значительный интерес для различных практических приложений и фундаментальных исследований. Комплексное экспериментальное изучение их свойств позволяет выявить основные закономерности их поведения в различных внешних условиях. Особенности характеристик магнитореологических эластомеров объясняются их взаимодействием с магнитным полем, что делает его ключевым аспектом в описании их свойств. Следовательно, помимо общих механических характеристик эластомеров как материала необходимо также изучение их взаимодействия с постоянным и переменным магнитным полем. Этим вопросам и посвящена данная работа.

Глава 2. Методика измерений

2.1. Измерения силы взаимодействия эластомеров с системой магнитов

Для измерения силы взаимодействия между системами магнитов и эластомерами различных размеров и формы была собрана установка на основе электронных весов (Рис. 13). На весах установлена нагрузка, к которой прикреплена нерастяжимая кевларовая нить. На другом конце нити подвешена деревянная пластина для закрепления образца. Нить перекинута через три неподвижных блока, при этом положение центрального может меняться для регулировки нулевого положения образца. Блоки изготовлены на основе подшипников с малым трением, покрытых пластиковой оболочкой с прорезью для направления нити. Под пластиной помещен подъемный механизм с ферромагнитной платформой для закрепления различных конфигураций постоянных магнитов. Расстояния измеряются с помощью миллиметровой шкалы на стенке опоры установки.

При сближении образца и магнитов сила, действующая на закрепленный на пластине эластомер со стороны магнитов, увеличивается. Таким образом, увеличивается сила, действующая на нагрузку весов в направлении, противоположном силе тяжести, что уменьшает вес нагрузки. По изменению показаний весов можно определить величину изменения силы, действующей на подвешенный образец. При измерениях показания весов в отсутствие системы магнитов были приняты в качестве точки отсчета. Затем, после установки магнитов, расстояние между ней и образцом уменьшалось с шагом в 1 мм.



1. Электронные весы
2. Нагрузка
3. Кевларовая нить
4. Пластина для подвешивания образца
5. Образец эластомера
6. Блоки
7. Подъемный механизм
8. Система магнитов
9. Миллиметровая шкала

Рис. 13. Схема измерительной установки.

Значение показаний весов регистрировалось на каждом шаге измерений, после чего по

полученным данным рассчитывались значения силы и давления, действующих на образец эластомера. Цена деления весов составляла 0.1г. Потери на трение блоков не превышали 10%.

2.2. Измерения магнитной проницаемости эластомеров

Значение магнитной проницаемости может быть получено из изменения индуктивности катушки с сердечником из эластомера. Катушка, используемая в измерениях, была помещена в куб из полимерной глины, обеспечивающий фиксацию ее положения внутри магнита и отсутствие колебаний витков катушки, приводящих к шумам в измеряемых значениях. Катушка была выведена к измерителю с помощью текстолитовой пластинки также для обеспечения отсутствия колебаний проводников. Образец помещался в катушку индуктивности в качестве сердечника, а сама катушка помещалась между полюсами электромагнита таким образом, чтобы ее ось располагалась перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Таким образом, образец находился в скрещенных постоянном и переменном полях (Рис. 14).

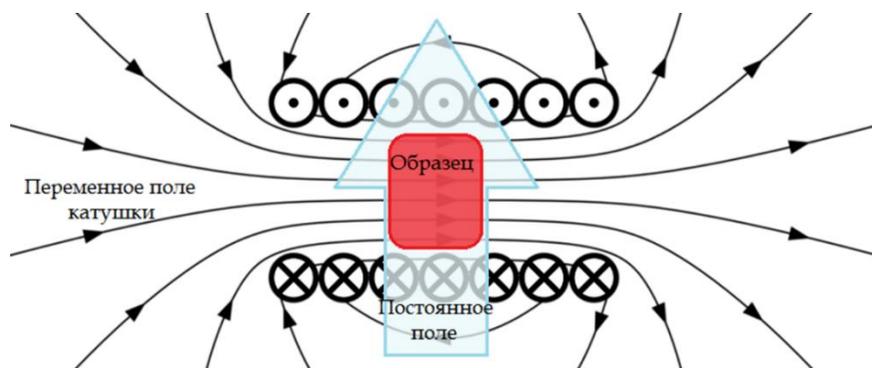


Рис. 14. Схематичное изображение методики измерений магнитной проницаемости.

Частотные зависимости индуктивности и добротности были получены с помощью измерителя иммитанса Aktacom AM-3016. Поле изменялось с шагом в 100 мТ от 0 до 500 мТ, а частота – от 50 до 1000 Гц с шагом в 20 Гц.

Индуктивность катушки с сердечником может быть приблизительно рассчитана по формуле:

$$L = k|\mu|Lo = k\sqrt{\mu'^2 + \mu''^2}Lo,$$

где μ - магнитная проницаемость сердечника, а μ' и μ'' - ее действительная и мнимая часть, соответственно, k - коэффициент заполнения катушки сердечником, L_0 - индуктивность пустой катушки, L - индуктивность катушки с сердечником.

Добротность контура $Q = \frac{k\omega\mu'Lo}{Ro+k\omega\mu''Lo}$, а его сопротивление $Ro = \omega \frac{Lo}{Q_0}$, где Q_0 - добротность контура с пустой катушкой. Тогда:

$$Q(Ro + k\omega\mu''Lo) = k\omega\mu'Lo.$$

Подставив значение Ro и разделив на kLo , получим:

$$\frac{Q}{Q_0} + k\mu'' = k\mu',$$

$$\mu' = \frac{Q}{kQ_0} + Q\mu''.$$

Возведем выражение для индуктивности в квадрат:

$$\frac{Lo^2}{L^2} = k^2\mu'^2 + k^2\mu''^2$$

Поставив в это выражение формулу для μ' , получим:

$$\frac{Lo^2}{L^2} = k^2 \frac{Q^2}{k^2 Q_0^2} + k^2 \frac{2Q^2\mu''}{kQ_0} + k^2 Q^2 \mu''^2 + k^2 \mu''^2$$

$$\frac{Lo^2}{L^2} - \frac{Q^2}{Q_0^2} = k \frac{2Q^2\mu''}{Q_0} + k^2(Q^2 + 1)\mu''^2$$

$$D = \frac{4Q^4k^2}{Q_0^2} - 4k^2(Q^2 + 1) \left(\frac{Lo^2}{L^2} - \frac{Q^2}{Q_0^2} \right)$$

$$\mu'' = \frac{-\frac{2Q^2k}{Q_0} \pm \sqrt{\frac{4Q^4k^2}{Q_0^2} - 4k^2(Q^2 + 1) \left(\frac{Lo^2}{L^2} - \frac{Q^2}{Q_0^2} \right)}}{2k^2(Q^2 + 1)}$$

$$\mu'' = \frac{\frac{Q^2}{Q_0} \pm \sqrt{\frac{Q^4}{Q_0^2} - (Q^2 + 1) \left(\frac{Lo^2}{L^2} - \frac{Q^2}{Q_0^2} \right)}}{k(Q^2 + 1)}.$$

Таким образом, действительная и мнимая части магнитной проницаемости могут быть рассчитаны по формулам:

$$\mu' = \frac{Q}{kQ_0} + Q\mu'' \text{ и } \mu'' = \frac{\frac{Q^2}{Q_0} \pm \sqrt{\frac{Q^4}{Q_0^2} - (Q^2 + 1) \left(\frac{Lo^2}{L^2} - \frac{Q^2}{Q_0^2} \right)}}{k(Q^2 + 1)}.$$

Полученные выражения использовались для обработки экспериментальных данных.

2.3 Измерения реологических характеристик эластомеров

Реологические измерения были проведены на кафедре физики полимеров и кристаллов в лаборатории физики новых интеллектуальных полимерных материалов Е.Ю. Крамаренко на реометре Anton Paar модели Physica MCR 301.

Глава 3. Исследуемые образцы

3.1 Изготовление и описание образцов

Для исследования реологических характеристик были изготовлены образцы на основе двухкомпонентного силиконового компаунда фирмы “Dow Corning” с частицами карбонильного железа. Петля гистерезиса для используемых частиц приведена на рис. 15.

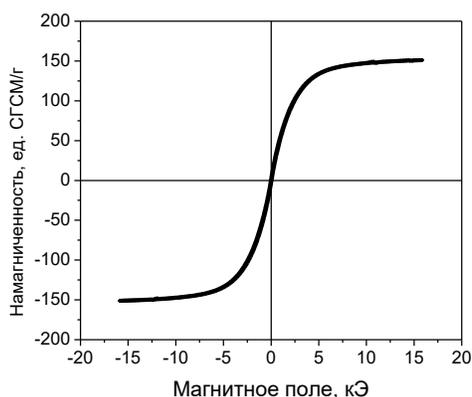


Рис. 15. Петля гистерезиса для частиц карбонильного железа

Масса железного порошка и жидких компонент силиконовой матрицы (Рис. 16(а)) была определена с помощью лабораторных весов фирмы Radwag (Рис. 16(б)). В процессе изготовления железный порошок смешивался с компонентой А силиконового компаунда. Для получения равномерного распределения частиц в эластомере смесь выдерживалась 5 минут в ультразвуковой ванне (Рис. 16(в)), после чего добавлялась компонента Б. Смесь тщательно перемешивалась и выливалась в форму для полимеризации. Концентрации частиц в эластомере составили 25масс% и 50масс%.

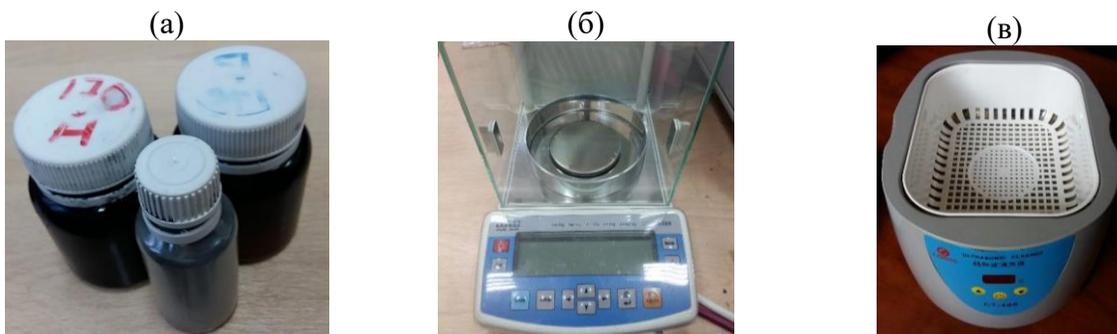


Рис. 16. Компоненты силиконового компаунда и частицы железа (а). Лабораторные весы фирмы Radwag (б). Ультразвуковая ванна (в).

Для получения столбчатых образцов использовалась специальная пластиковая форма, изготовленная с помощью 3D-принтера (Рис. 17). Диаметр отверстий формы составлял 2мм, а высота – 8мм.



Рис. 17. Форма для изготовления столбчатых образцов

Концентрация частиц в столбчатом образце (Рис. 18) составила 50%. Кроме того, был изготовлен образец с чередованием концентраций 25% и 50% на основе столбчатой структуры (Рис. 19).



Рис. 18. Столбчатый образец с частицами железа 50%



Рис. 19. Образец с чередованием концентрация 25% и 50% железных частиц

Образцы с частицами железа с другими концентрациями наполнителя, а также образцы с частицами феррита бария были изготовлены в Государственном научно-исследовательском институте химии и технологии элементоорганических соединений (ГНИИХТЭОС) Степановым Г.В. Образцы были изготовлены на основе двухкомпонентного каучука марки СИЭЛ. Концентрации частиц карбонильного железа в исследуемых образцах составили 65%, 73%, 61%, 67% (Рис. 20). Концентрация частиц феррита бария в образце составила 61% (Рис. 21). Матрица этого образца очень пластична, образец имеет пастообразную консистенцию.



Рис. 20. Образцы с частицами железа 73% и 65%



Рис. 21. Образцы с частицами феррита бария 61%

3.2. Реологические измерения

Реологические измерения, проведенные для изготовленных образцов с частицами железа, показали, что модуль упругости образца с 50% железных частиц меньше, чем образца с 25% (Таблица 1). Это явление может быть объяснено технологией изготовления эластомеров.

Таблица 1. Модуль упругости и модуль потерь образцов с частицами железа

Образец	G' кПа	G'' , кПа
25% Fe	105	2
50% Fe	75	2
Столбчатая структура	25	2
Образец с чередованием концентраций	135	4

Обычно для усиления адгезии между железными частицами и матрицей частицы покрываются поверхностно-активными веществами или слоем полимера, усиливающего сцепление частиц с матрицей [7]. В нашем случае использовались частицы без покрытия, что обуславливает возможность образования разрывов на границе раздела. При увеличении концентрации количество таких разрывов увеличивается. Таким образом, материал становится более пористым, что может объяснить снижение модуля упругости (Рис. 22)

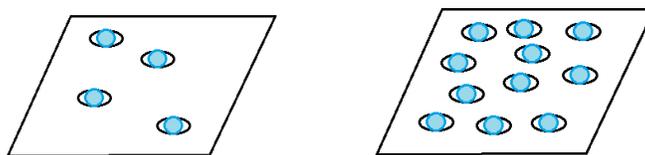


Рис. 22. Возникновение разрывов на границе раздела полимер-частица при различных концентрациях наполнителя

Измерения образца со столбчатой структурой показали, что его модуль упругости меньше, чем модуль упругости исходного материала, что объясняется морфологией поверхности образца (Таблица 1). При дальнейших исследованиях и учете коэффициента

заполнения для этого образца было получено значение модуля сдвига, сравнимое с модулем сдвига образца с 50% железных частиц (для столбчатой структуры – 88 кПа, для исходного образца – 75 кПа). Модуль упругости образца с чередованием концентраций имеет значение большее, чем каждый из эластомеров, входящих в состав образца.

Кроме того, модуль упругости и модуль потерь зависят от нормальной силы, приложенной к образцу в процессе измерений (Рис.23). Зависимость модуля потерь от силы для образца с чередованием концентраций демонстрирует существование релаксационных процессов в образце. При времени в 140 с от начала измерения деформации образца входят в устойчивый режим. Такие особенности поведения могут быть заложены в принципы функционирования актюаторов различных типов или датчиков силы.

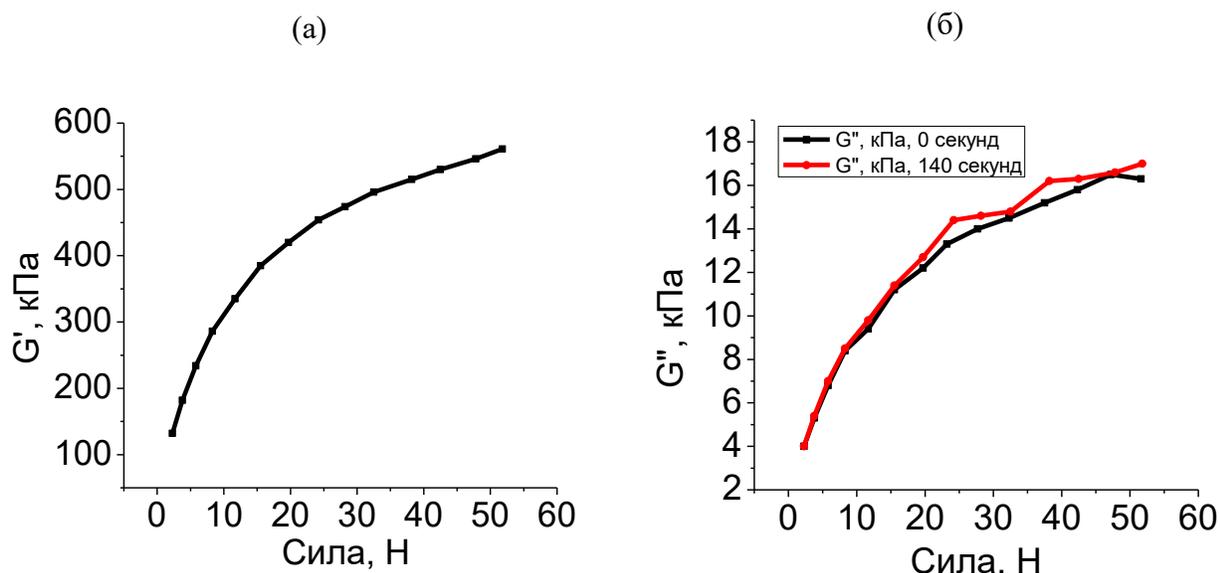


Рис. 23. Зависимость модуля упругости (а) и модуля потерь (б) образца с чередующимися концентрациями частиц на основе столбчатой структуры от приложенной нормальной силы

Полевые зависимости модулей упругости образцов с 25% и 50% частиц (Рис.24) демонстрируют магнито-реологический эффект в этих образцах. Слабый рост модулей с полем объясняется большим значением жесткости матрицы-носителя. Кроме того, зависимости имеют явно выраженный гистерезисный характер в случае больших концентраций наполнителя.

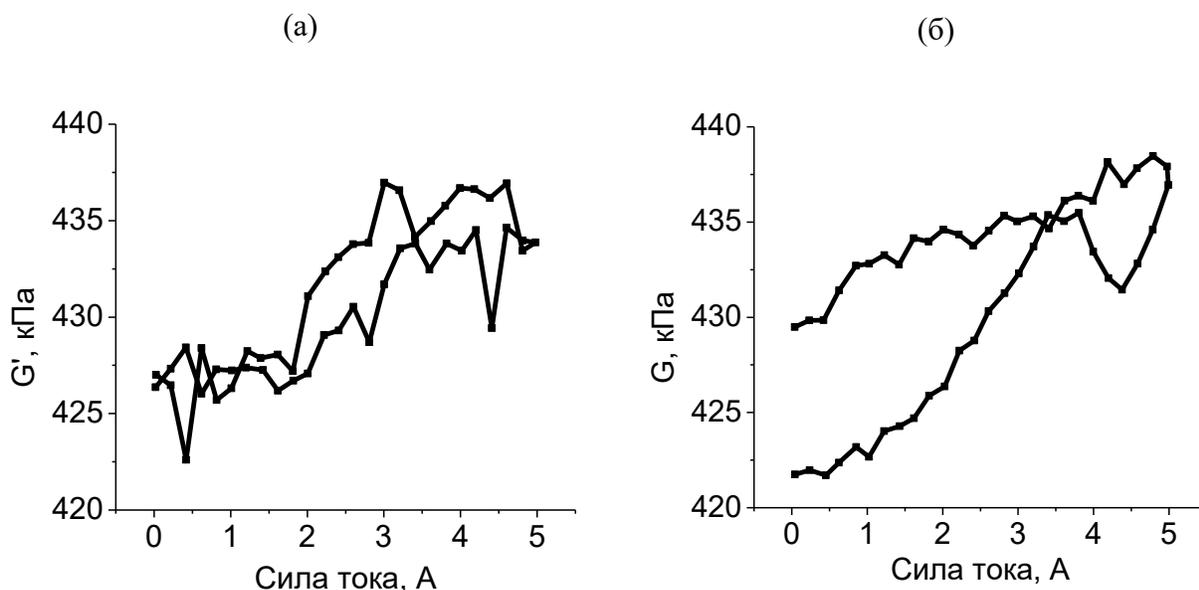


Рис. 24 Зависимость модуля упругости образца с 25% (а) и 50% (б) железных частиц от силы тока в катушке, создающей поле.

При увеличении напряженности поля магнитные моменты частиц упорядочиваются, и частицы стремятся занять положение с минимумом энергии. Прикладываемые в процессе измерений на реометре деформации смещают их из первоначального положения, облегчая их перемещение в матрице в состояние, где взаимодействие системы частиц будет максимально возможным. При уменьшении напряженности поля частицы за счет более сильного взаимодействия в новом состоянии сильнее сопротивляются действию силы упругости матрицы, что объясняет большее значение модуля упругости при обратном ходе поля. В образце с большей концентрацией частицы за счет малых расстояний между ними взаимодействуют сильнее. По этой причине гистерезис во втором случае оказывается более выраженным. Таким образом, чтобы избежать гистерезисного поведения эластомера можно использовать образцы с меньшим содержанием наполнителя.

Приложение магнитного поля к столбчатому образцу также приводит к проявлению магнитореологического эффекта. Модуль Юнга этого образца в отсутствие поля составляет 264 кПа, а при приложении максимального поля – 270 кПа (модуль сдвига 88 кПа и 90 кПа, соответственно).

Таким образом, модуль упругости образцов на основе частиц железа зависит не только от концентрации наполнителя, но и от способа его изготовления и его структуры. Материалы с новыми характеристиками могут быть получены путем комбинаций материалов с различными параметрами.

Глава 4. Результаты

4.1. Взаимодействие с полем постоянных магнитов

Магнитореологические эластомеры имеют широкие перспективы использования в различных областях. Существуют разработки актюаторов и перистальтических насосов [18, 20], в принципы работы которых положено притяжение между эластомером и системой, создающей магнитное поле. При этом нам неизвестны публикации, в которых производилась бы оценка сил таких взаимодействий. Точные расчеты взаимодействий на малых расстояниях невозможны из-за необходимости учета множества факторов (размагничивающий фактор, полевая зависимость магнитной проницаемости, неоднородное распределение магнитного поля и т.п). Для определения ключевых факторов и наиболее общих закономерностей необходимы экспериментальные данные. В рамках сформулированных проблем одной из важных задач является исследование взаимодействия эластомеров с постоянными магнитами, так как они не требуют дополнительного подвода энергии. С этой целью в настоящей работе проводились измерения силы взаимодействия эластомеров с системами постоянных магнитов в различных конфигурациях.

Были проведены измерения силы взаимодействия эластомера с частицами железа с одним неодимовым магнитом, диаметр которого составлял 1 см. При этом размер эластомера совпадал с размером магнита. Полученные результаты приведены на рис. 25. Зависимость силы от расстояния имеет два гиперболических участка, соединяющихся на расстоянии порядка линейного размера магнита. Зависимость силы от расстояния в степени -3 имеет линейный участок при больших расстояниях между эластомером и магнитом. Таким образом, поле магнита может рассматриваться как поле магнитного диполя. На более близких расстояниях магнит не может быть рассмотрен в качестве точечного диполя. Тем не менее, зависимость силы от расстояния в -3 степени также демонстрирует линейное поведение, что означает, что магнит также может быть представлен в качестве магнитного диполя, но с отличными характеристиками, что и обуславливает появление второго гиперболического участка.

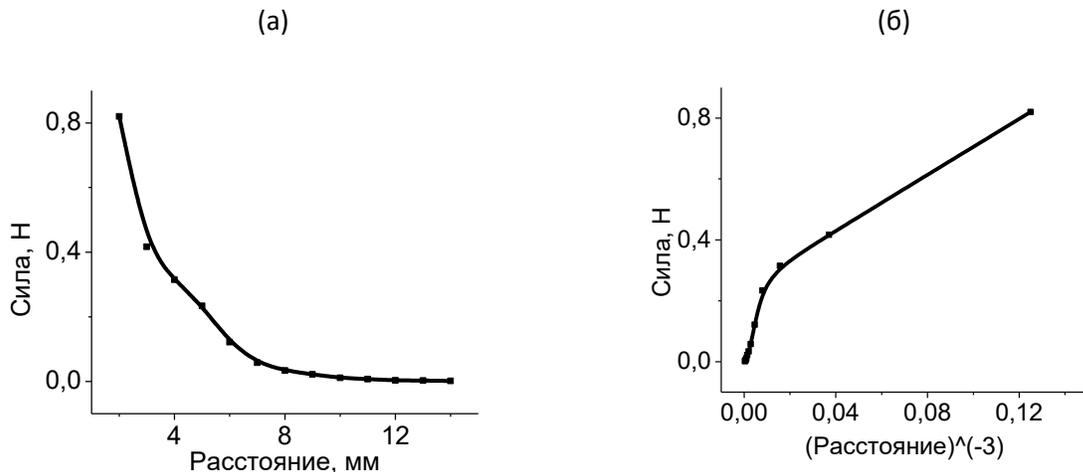


Рис. 25. Зависимость силы взаимодействия эластомера и магнита от расстояния между ними (а) и от расстояния между ними в степени (-3) (б). Линейные размеры эластомера и магнита совпадают.

В случае же, когда площадь образца намного больше площади магнита, гиперболические участки смещаются друг относительно друга так, что первый выходит за пределы измеряемого диапазона расстояний (Рис. 26). Линейный участок на малых расстояниях определяется меньшим количеством точек. Таким образом, граница применения приближений рассмотрения магнита в качестве диполя на различных расстояниях до эластомера смещается в зависимости от соотношения размеров образца и магнита.

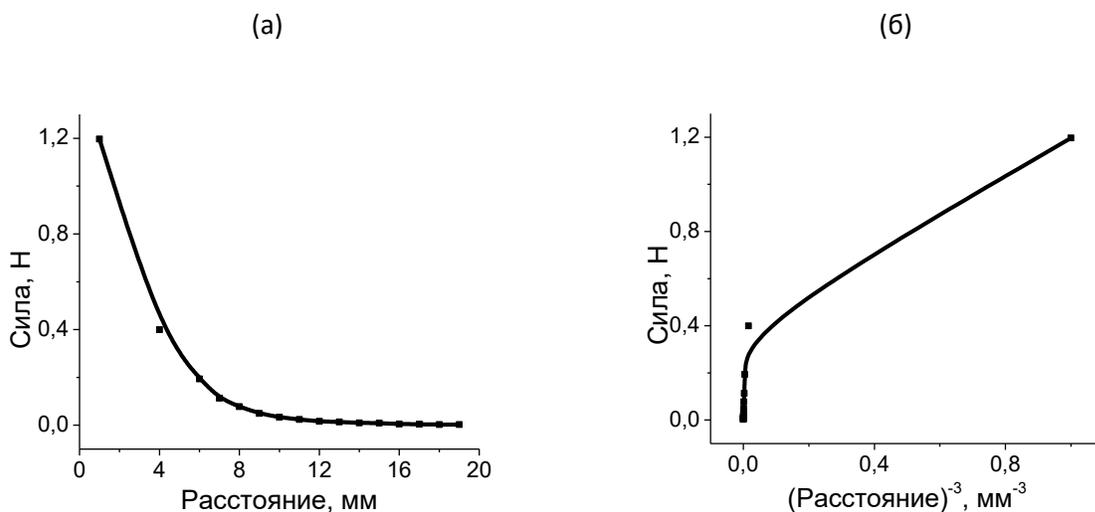


Рис. 26. Зависимость силы взаимодействия эластомера большой площади и магнита от расстояния между ними (а) и от расстояния между ними в степени (-3) (б)

Также были измерены силы взаимодействия эластомеров с двумя магнитами в различных конфигурациях (Рис.27). При измерениях изменялось расстояние между двумя магнитами, их взаимная ориентация и расстояние до эластомера. Исследовались образцы различного размера (длина составляла 1.5, 2.5 и 3.7 см). Концентрации частиц во всех образцах составляли 60-70масс% (67%, 61% и 65%, соответственно). Из экспериментальных данных следует, что зависимость силы взаимодействия от расстояния между магнитами или от длины образца немонотонна, что можно объяснить неоднородным распределением поля. Минимум достигается на расстоянии, равном длине эластомера минус суммарный диаметр магнитов, то есть сила минимальна в момент выхода магнитов из-под эластомера.

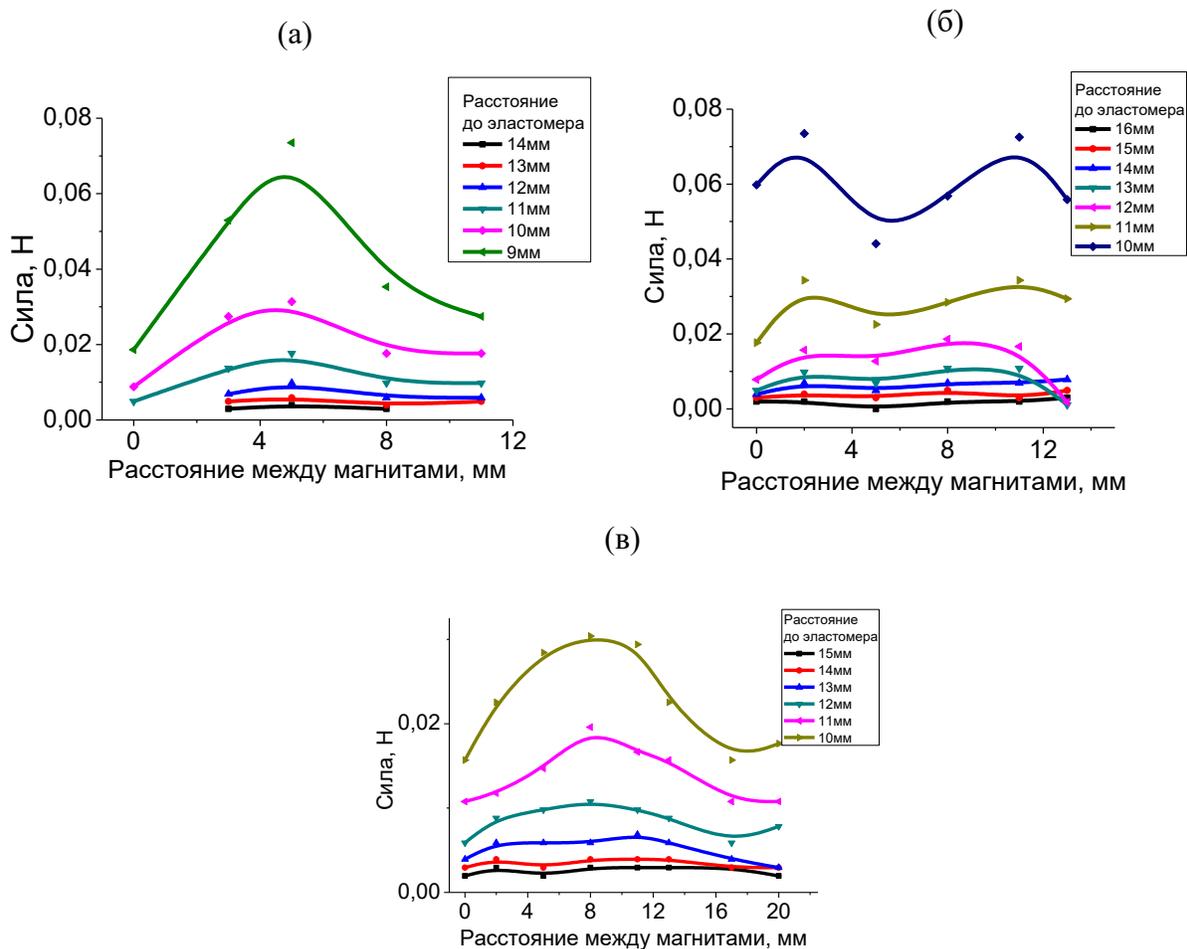


Рис. 27. Зависимость силы взаимодействия от расстояния между магнитами для эластомера длиной 1.5см (а), 2.5см (б), 3.7 см (в).

Также были измерены зависимости силы взаимодействия эластомерной ленты с частицами железа с массовой концентрацией 73% с системой 3 и 4 магнитов в различных конфигурациях от расстояния между ними. При этом, размеры эластомера совпадали с размерами системы магнитов. Можно увидеть (Рис. 28), что как для 4, так и для 3 магнитов сила в случае параллельной ориентации всех магнитов на больших расстояниях больше, чем в случае чередующихся ориентаций. На малых же расстояниях их соотношение меняется на противоположное. В случае параллельной ориентации поле магнитов описывается дипольным моментом, тогда как при чередовании ориентаций система описывается квадрупольным моментом, поле которого спадает быстрее.

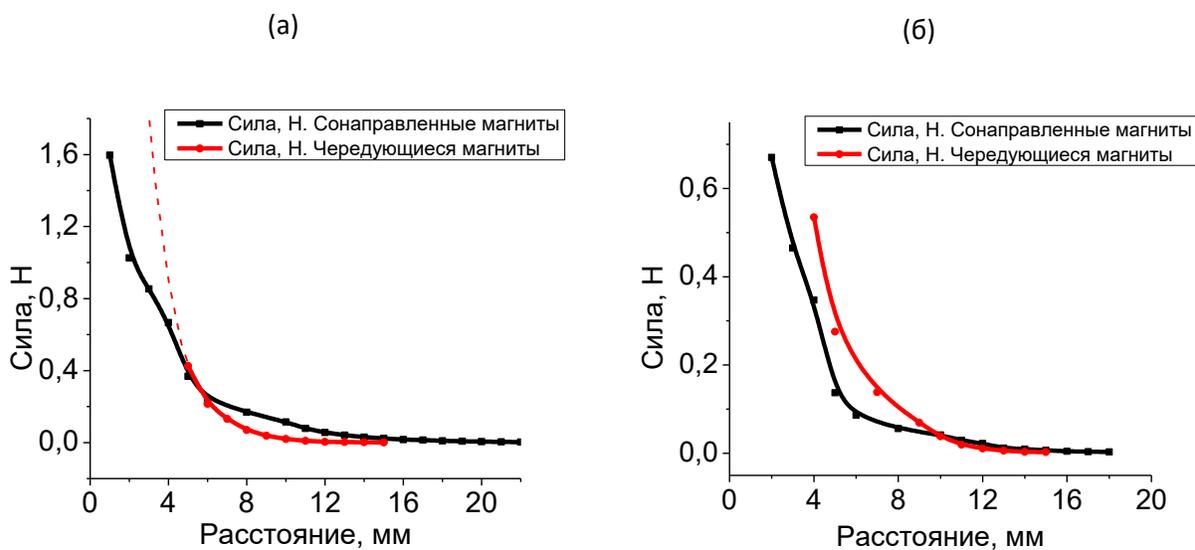


Рис. 28. Зависимость силы от расстояния между системой магнитов и эластомером в случае 4 (а) и 3 (б) магнитов

Также были проведены измерения с согнутыми образцами с частицами железа с массовой концентрацией 65%. Радиус кривизны образцов составил 1.5 см. Расстояния отсчитывались от нижней точки эластомера. Зависимости силы от расстояния для двух конфигураций эластомера (Рис. 29) демонстрируют существование участка, на котором сила практически постоянна и мало зависит от расстояния между магнитами. При этом, значение силы на этом участке мало из-за значительного расстояния между магнитами и образцом. На близких же расстояниях, сравнимых по значению с линейными размерами системы, величина силы демонстрирует сильную зависимость от расстояния между

магнитами. Максимум силы достигается на расстоянии, равном $2R - 2d$, где R – радиус кривизны эластомера, а d – диаметр магнита.

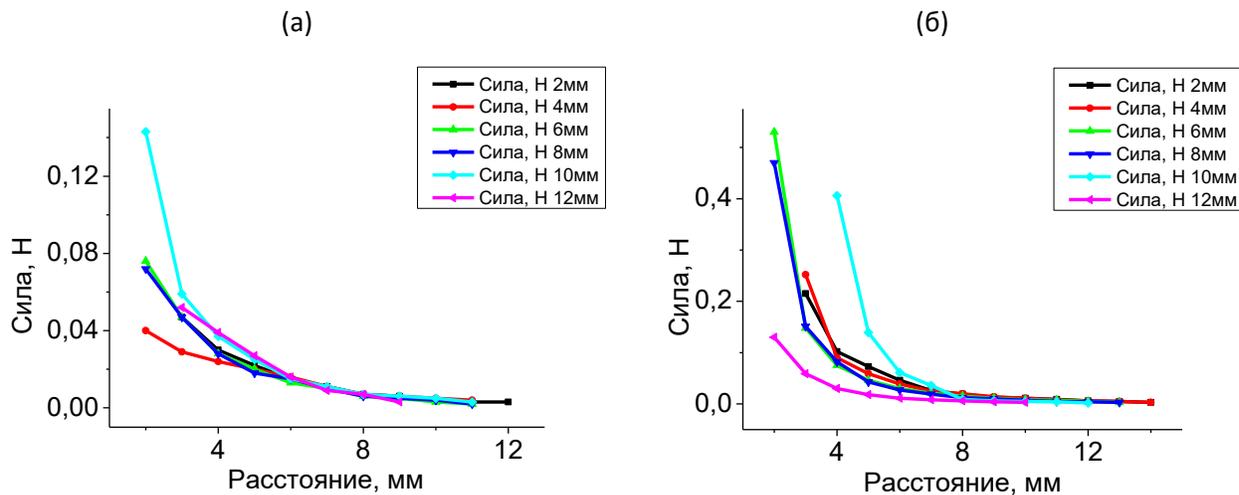


Рис. 29. Зависимость силы от расстояния между системой магнитов и согнутым эластомером при различном расстоянии между магнитами. Опора на 2 точки (а) и на 1 точку (б).

Таким образом, для различных систем постоянных магнитов можно определить оптимальные параметры, при которых возникают минимальные или максимальные силы взаимодействия, а также способы изменения параметров системы, при которых силы имеют устойчивые значения.

4.2. Взаимодействие с переменным магнитным полем

Помимо взаимодействия с постоянным магнитным полем необходимо также изучить поведение эластомера в переменном поле, так как его воздействие на частицы наполнителя, а, следовательно, и на материал в целом носит периодический характер и может привести к механическим колебаниям. Значительную важность представляют оценка параметров собственных колебаний системы и возможность возбуждения резонанса внешним переменным полем. Такой резонанс, описываемый моделью продольных колебаний упругого стержня, может наблюдаться в эластомерах с непроводящими частицами в скрещенных постоянном и переменном магнитных полях.

При помещении образца в катушку индуктивности и пропускании через нее тока, вследствие упорядочивания магнитных моментов частиц наполнителя и изменения их взаимодействия в мягкой матрице, изменяется и длина эластомера в направлении вдоль оси катушки – наблюдается магнитодеформационный эффект. При перемене направления тока в катушке и, следовательно, направления поля, изменяются и направления магнитных моментов. Таким образом, за один период колебания магнитного поля длина эластомера совершает два полных колебания. В случае проводящих частиц при изменении величины поля в частицах индуцируются токи Фуко, противодействующие изменению магнитного потока. Так как поле катушки мало, эффективное переменное поле, в котором находится эластомер, фактически стремится к нулю. Таким образом, при больших частотах переменного поля катушки образцы с проводящими частицами не демонстрируют резонансное поглощение энергии, что и наблюдается в эксперименте (Рис. 30). В случае непроводящих частиц токи Фуко не возникают.

При помещении эластомера с частицами феррита бария с концентрацией 61% в катушку индуктивности так, что диаметр катушки и образца совпадали, то есть эластомер не имел возможности колебаться, зависимости действительной и мнимой части магнитной проницаемости не имели резонансных участков (Рис. 31).

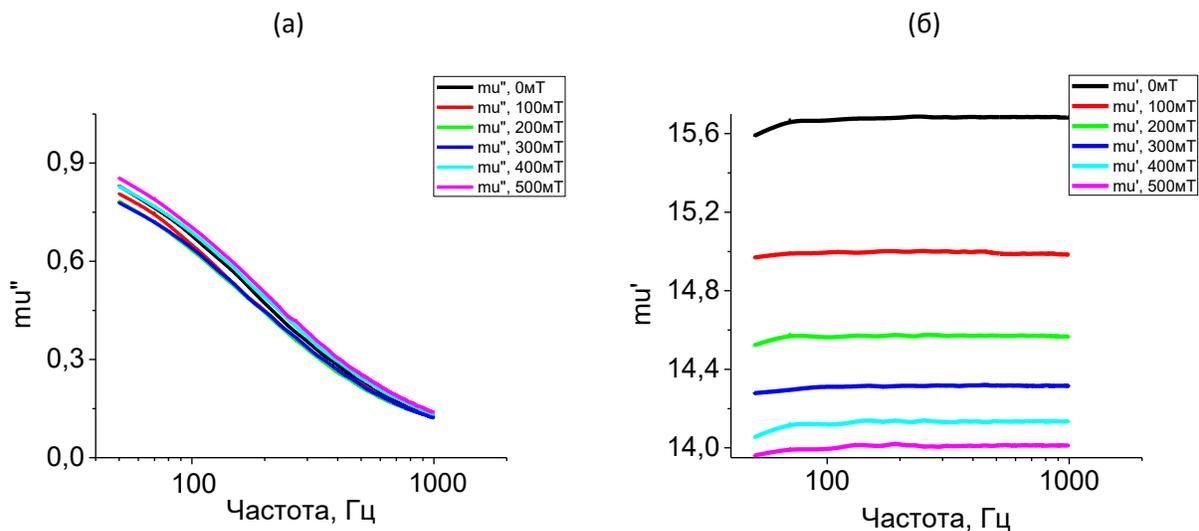


Рис. 30. Действительная (а) и мнимая (б) части магнитной проницаемости эластомера с частицами железа в скрещенных полях.

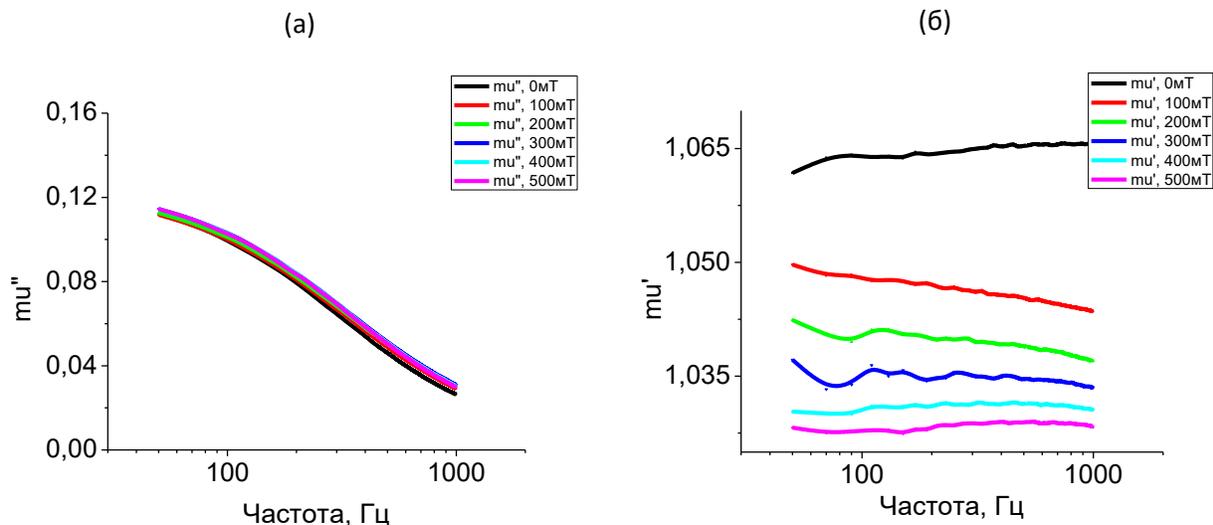


Рис. 31. Действительная (а) и мнимая (б) части магнитной проницаемости эластомера с ферритом бария в скрещенных полях. Образец плотно помещен в катушку

В случае же свободного помещения эластомера с частицами феррита бария в катушку индуктивности экспериментальные зависимости действительной и мнимой части проницаемости имеют характерный резонансный вид (Рис. 32, 33). При таком помещении образца в катушку образец имеет возможность двигаться без потерь на внешнее трение. Кроме того, из-за магнитоологического эффекта наблюдается смещение частоты резонанса с увеличением напряженности постоянного магнитного поля. Более того, существует максимум поглощения энергии в поле 200 мТ. В малых полях из-за малости упругости матрицы возвращающая сила в виде силы упругости слишком мала. С увеличением поля вследствие магнитоологического эффекта наблюдается увеличение модуля упругости материала, что приводит к росту возвращающей силы и возможности возникновения колебаний с большой амплитудой. Этим объясняется увеличение поглощения энергии с ростом магнитного поля. При дальнейшем увеличении поля модуль упругости принимает большее значение. Кроме того, магнитные моменты ориентируются в направлении поля. Поле катушки в этом случае пренебрежимо мало по сравнению с полем электромагнита, что затрудняет колебания образца в катушке и приводит к уменьшению поглощения энергии.

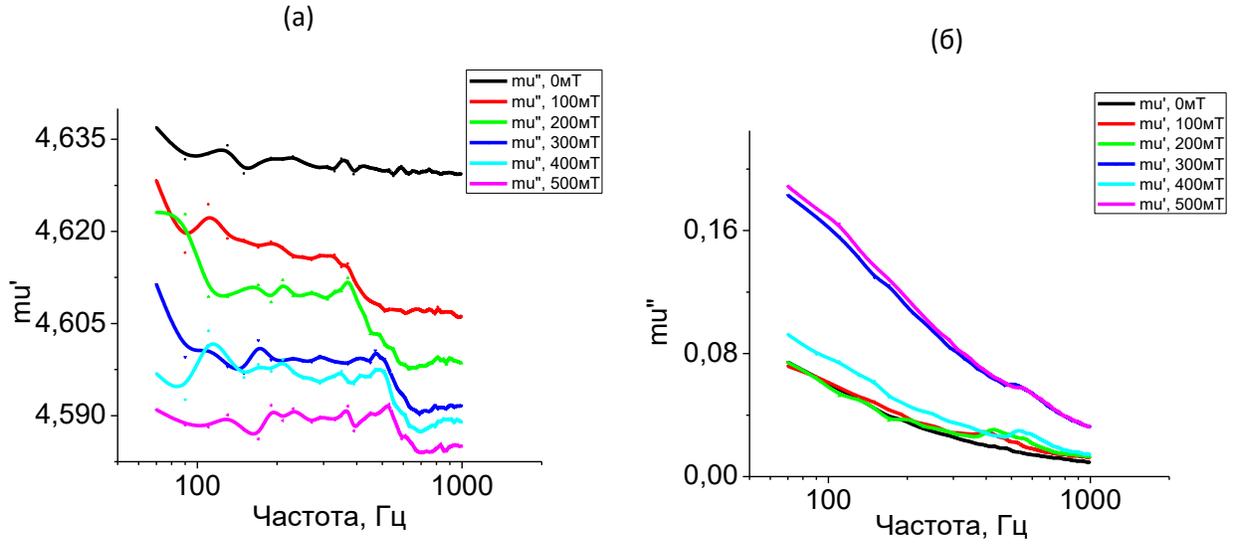


Рис. 32. Действительная (а) и мнимая (б) части магнитной проницаемости эластомера с частицами феррита бария 61% в скрещенных полях.

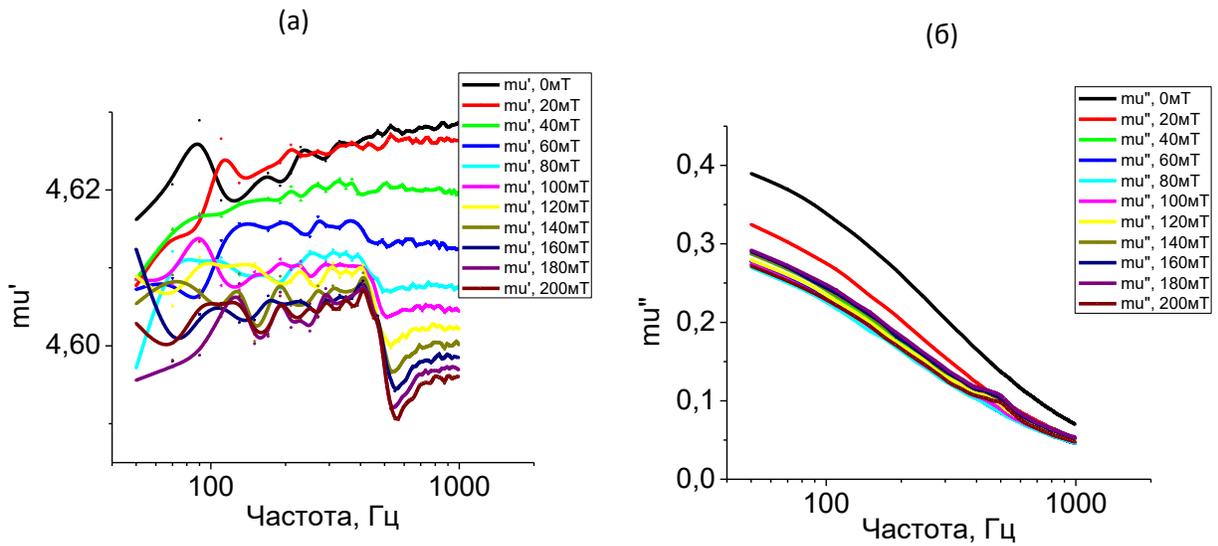


Рис. 33. Действительная (а) и мнимая (б) части магнитной проницаемости эластомера с частицами феррита бария 61% в скрещенных полях. Повтор измерений с меньшим шагом поля.

Моделирование подтверждает существование собственных частот колебаний стержня в этом частотном диапазоне. Записывая II закон Ньютона для участка стержня (Рис. 34) длиной dx , получим:

$$mu_{tt} = F' - F'',$$

где $u(x, t)$ – смещение поперечного сечения стержня в сечении с координатой x в момент времени t , F' – сила упругости, действующая в сечении x , а F'' – в сечении $x + dx$. Учитывая, что

$$F' = ESu_x(x + dx, t)$$

$$F'' = ESu_x(x, t),$$

Получаем:

$$\rho u_{tt} = ES(u_x(x + dx, t) - u_x(x, t)),$$

где ρ – плотность материала стержня.

$$Sdx\rho u_{tt} = ESu_{xx}(x, t)dx$$

$$\rho u_{tt} = Eu_{xx}$$

$$u_{tt} = \frac{E}{\rho}u_{xx}$$

$$u_{tt} = a^2u_{xx},$$

Где введено обозначение $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$.

Общее решение: $u = A\sin\frac{\pi atn}{l} + B\cos\frac{\pi atn}{l}$, откуда собственная частота $\omega_0 = \frac{\pi a}{l}$. Здесь A и B – константы, значения которых определяются из граничных и начальных условий, l – длина стержня, а n – номер гармоники.

При значениях $E=10^4$ - 10^5 Па, $\rho=1800$ кг/м³, $l=2.3$ см собственная частота колебаний лежит в диапазоне 50-200 Гц.

Данный эффект также может быть использован при создании актюаторов и модуляторов волн на звуковой частоте.

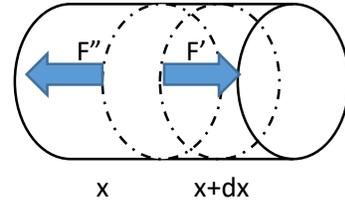


Рис. 34. Модель упругого стержня

Основные результаты

- Изготовлены и апробированы экспериментальные установки для измерения сил взаимодействий магнитореологических эластомеров с постоянными магнитами и для исследования механического резонанса в эластомерах под действием переменного магнитного поля.
- Показано, что модуль упругости магнитореологических эластомеров зависит не только от концентрации частиц, но и от способа изготовления эластомера. Для композитного образца модуль упругости неаддитивно зависит от модулей исходных материалов.
- Установлено, что полевые зависимости модуля упругости для эластомеров с большой концентрацией наполнителя имеют гистерезисный характер. Использование образцов с малыми концентрациями может обеспечить обратимость при циклических изменениях магнитного поля.
- Для систем постоянных магнитов, взаимодействующих с магнитореологическими эластомерами, были определены условия, при которых возникает минимальная/максимальная сила и создается стационарный режим действия сил при изменении конфигурации системы
- Обнаружено, что в скрещенных переменном и постоянном магнитных полях эластомеры с непроводящими частицами феррита бария могут демонстрировать эффект механического резонанса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Yancheng Li, Jianchun Li, Weihua Li and Haiping Du. A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices, IOP publishing, Smart Materials and Structures, 23 (2014);
- [2] S. Raa Khimi, K. L. Pickering, B. R. Mace. Dynamic Properties of Magnetorheological Elastomers Based on Iron Sand and Natural Rubber (2015);
- [3] By Ubaidillah, Joko Sutrisno, Agus Purwanto and Saiful Amri Mazlan, Recent Progress on Magnetorheological Solids: Materials, Fabrication, testing, and Applications, Advanced engineering materials (2014);
- [4] Hyo Seung Jung, Seung Hyuk Kwon, Hyoung Jin Choi, Jae Heum Jung, Young Gil Kim. Magnetic Carbonyl Iron/Natural Rubber Composite Elastomer and Its Magnetorheology, Composite Structures, 7 (2015);
- [5] Sahbi Aloui and Manfred Klüppel. Magneto-rheological response of elastomer composites with hybrid-magnetic fillers, Smart Materials and Structures 24 (2015);
- [6] E Yu Kramarenko, A V Chertovich, G V Stepanov, A S Semisalova, L A Makarova, N S Perov and A R Khokhlov. Magnetic and viscoelastic response of elastomers with hard magnetic filler, Smart Materials and Structures 24 (2015);
- [7] S. Abramchuk, E. Kramarenko, G. Stepanov, L. V. Nikitin, G. Filipcsei, A. R. Khokhlov and M. Zrínyi. Novel highly elastic magnetic materials for dampers and seals: Part I. Preparation and characterization of the elastic materials, Polymers for advanced technology, 18: 883–890, (2007);
- [8] T F Tian, W H Li and G Alici. Study of magnetorheology and sensing capabilities of MR elastomers, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 412 (2013);
- [9] Vladislav V. Sorokin, Eva Ecker, Gennady V. Stepanov, Mikhail Shamonin, Gareth J. Monkman, Elena Yu. Kramarenko and Alexei R. Khokhlov. Experimental study of the magnetic field enhanced Payne effect in magnetorheological elastomers, Soft Matter, 10 (2014);
- [10] Yangguang Xu, Xinglong Gong, Shouhu Xuan, Wei Zhang and Yanceng Fan. A high-performance magnetorheological material: preparation, characterization and magnetic-mechanic coupling properties, Soft Matter, 7, 5246 (2011);
- [11] Laurence Bodelot, Tobias Pöschinger, Kostas Danas, Nicolas Triantafyllidis, and Christian Bolzmacher. Magnetorheological Elastomers: Experimental and Modeling Aspects, The Society for Experimental Mechanics, Inc., Mechanics of Composite and Multi-functional Materials, 7, 32 (2016);

- [12]Vladislav V. Sorokin, Gennady V. Stepanov, Mikhail Shamonin, Gareth J. Monkman, Alexei R. Khokhlov, Elena Yu. Kramarenko.Hysteresis of the viscoelastic properties and the normal force in magnetically and mechanically soft magnetoactive elastomers: Effects of filler composition, strain amplitude and magnetic field, *Polymer* (2015);
- [13]Gzegorz Slawinski, Danuta Miedzinska, Tadeusz Niezgod, Anna Boszkowska. Experimental investigations of MREs behavior under cyclic load, *Solid state phenomena*, 183, 163-168, (2012);
- [14] S. Abramchuk, E. Kramarenko, G. Stepanov, L. V. Nikitin, G. Filipcsei, A. R. Khokhlov and M. Zrinyi. Novel highly elastic magnetic materials for dampers and seals: part II. Material behavior in a magnetic field, *Polymers for advanced technology*, 18: 513–518, (2007);
- [15] Dmitry Yu Borin and Gennady V Stepanov. Elastomer with magneto- and electrorheological properties, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(14) 1893–1898, (2015);
- [16] Dirk-M. Drotlef, Peter Blumler, Periklis Papadopoulos, and Aranzazu del Campo Magnetically Actuated Micropatterns for Switchable Wettability, *Applied materials and interfaces*, 6 (2014);
- [17] Xiao Huang, Akshi Mohla, Wei Hong,* Ashraf F. Bastawros and Xi-Qiao Feng. Magnetorheological brush – a soft structure with highly tuneable stiffness *Soft Matter*, 10, 1537, (2014);
- [18] Roland Fuhrer , Christoph M. Schumacher , Martin Zeltner , and Wendelin J. Stark. Soft Iron/Silicon Composite Tubes for Magnetic Peristaltic Pumping: Frequency-Dependent Pressure and Volume Flow, *Advance Functional materials*, 23 (2013);
- [19]Vinh Quang Nguyen , Anansa S. Ahmed , and Raju V. Ramanujan. Morphing Soft Magnetic Composites, *Advanced Materials*,24 (2012);
- [20]K. S. Seoa, R. Wia, S. G. Ima and D. H. Kima, A superhydrophobic magnetic elastomer actuator for droplet motion control, *Polymers for Advanced Technologies*, 24 1075–1080 (2013);
- [21]J Yang, S S Sun, H Du, W H Li, G Alici and H X Deng.A novel magnetorheological elastomerisolator with negative changing stiffness for vibration reduction IOP Publishing, *Smart materials and structures*, 23, (2014);
- [22] Shuaishuai Sun, Huaxia Deng, Jian Yang, Weihua Li, Haiping Du, Gursel Alici and Masami Nakano, An adaptive tuned vibration absorber based on multilayered MR elastomers, *Smart materials and structures*, 24 (2015);

Благодарности

Выражаю огромную благодарность Елене Юльевне Крамаренко и лаборатории новых интеллектуальных полимерных материалов кафедры Физики Полимеров и Кристаллов Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за предоставленные результаты реологических измерений, а также сотруднику ГНИИХТЭОС Г.В. Степанову за предоставленные образцы.

Особую благодарность хотелось бы выразить моему научному руководителю Анне Сергеевне Семисаловой за помощь в выполнении настоящей работы, поддержку и мотивацию к работе.

Также выражаю огромную благодарность рецензенту настоящей работы Елене Александровне Ганьшиной за ценные замечания и полезные советы.

Хотелось бы поблагодарить всех сотрудников и преподавателей кафедры Магнетизма за неоценимый вклад в приобретение знаний и опыта научной работы. Особую благодарность хотелось бы выразить заведующему кафедрой магнетизма Николаю Сергеевичу Перову за огромную помощь в выполнении работы и ценные советы.