

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ НА ОСНОВЕ ПРОВОДЯЩИХ
НАПОЛНИТЕЛЕЙ»**

Выполнила студентка
219м группы:
Русакова Татьяна Сергеевна

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., профессор Перов Н.С.

Зав. Кафедрой магнетизма
Профессор Перов Н.С. _____

Москва 2018

Содержание

Введение	3
Литературный обзор	5
Изготовление магнитореологических эластомеров	5
Применение МРЭ	7
Влияние концентрации наполнителя на электрические свойства МРЭ	10
Влияние свойств матрицы МРЭ на их электрические свойства	13
Типы упорядочения частиц наполнителя в полимерной матрице	15
Влияние давления на электрические свойства МРЭ	19
Влияние магнитного поля на электрические свойства МРЭ	21
Влияние температуры на физические свойства МРЭ	24
Теоретические модели	26
Методика измерения	30
Измерение диэлектрических и электрических свойств МРЭ	32
Изучение влияния механических напряжений	33
Образцы	34
Экспериментальные результаты	35
Влияние частоты электромагнитного поля	35
Магнитодиэлектрический эффект	36
Влияние упругих напряжений	40
Электрические свойства	41
Влияние низких температур	45
Основные результаты	49
Список литературы	50

Введение

В последнее время все больше появляется необходимость в материалах, которые могли бы быть использованы в агрессивных средах и чьими свойствами можно бесконтактно управлять. Это так называемые “умные” материалы. К ним относятся магнитореологические жидкости, пены, гели и эластомеры. Для них характерно изменение физических свойств, таких, как диэлектрическая проницаемость, магнитная восприимчивость, жесткость или проводимость, при приложении внешнего магнитного или электрического поля, давления или при изменении температуры. Сферой применения таких материалов являются медицина, робототехника, амортизирующие устройства, датчики и многое другое.

В данной работе рассматриваются магнитореологические эластомеры (МРЭ). Они представляют собой слабомагнитные полимерные матрицы с диспергированными в них ферромагнитными частицами нано- и микро-размеров. Свойства эластомера будут во многом определяться исходными параметрами материалов, использованных при изготовлении композита, и способом изготовления - влиять будет жесткость полимерной матрицы, тип и концентрация используемых частиц, добавление дополнительных примесей, таких как графит или сегнетоэлектрические частицы, отверждение эластомера без магнитного поля (изотропные образцы) или в магнитном поле (анизотропные образцы).

При приложении магнитного поля к МРЭ ферромагнитные частицы в полимерной матрице будут стремиться перестроиться в “цепочечные” структуры, чтобы минимизировать энергию взаимодействия, при этом матрица будет деформироваться. Именно это является основным механизмом изменения физических свойств МРЭ в магнитном поле. Внешнее давление будет

уменьшать расстояние между частицами в матрице, усиливая их взаимодействие.

В настоящее время известны следующие эффекты в магнитоологических эластомерах:

- Магнитодеформационный эффект - изменение длины образца при приложении внешнего магнитного поля;
- Эффект памяти формы - эластомер сохраняет форму, приданную ему во внешнем магнитном поле, так как перестроение цепочек внутри матрицы уже произошло и образцу выгодно сохранять это состояние;
- Магнитокалорический эффект - изменение температуры образца при его адиабатическом намагничивании или размагничивании;
- Магнитодиэлектрический эффект - эффект, при котором во внешнем магнитном поле изменяется диэлектрическая проницаемость непроводящего образца.
- Магнитоэлектрический эффект - возникновение электрической поляризации в образце магнитоологического эластомера в магнитном поле.

Целью данной работы является исследование влияния таких внешних факторов, как магнитное поле, внешнее механическое давление и температура на диэлектрические и электрические свойства магнитоологических эластомеров.

Литературный обзор

Изготовление магнитореологических эластомеров

Магнитореологические эластомеры (МРЭ) представляют собой слабомагнитную полимерную матрицу с диспергированными ферромагнитными частицами нано- или микро- размеров. При этом свойства, проявляемые магнитными эластомерами, будут зависеть от типа магнитного наполнителя, его концентрации в образце, размера частиц и способа полимеризации.

В качестве полимерной основы чаще всего выбирают полидиметилсилоксан, силикон, касторовое масло, каучуковую резину. В 2016 году Бо-Йон Ли с соавторами предложили использовать пористую основу в качестве матрицы МРЭ. Такая эластомерная пленка получилась вследствие смешивания силоксанового полимера и воды без добавления эмульсионных агентов[1].

Наполняющие частицы, как правило, - Fe, NdFeB, FeNi и т.д. В качестве примесей могут быть использованы графен, цирконат-титанат-свинца (ЦТС), ферромагнитные частицы с покрытием из серебра.

Для того чтобы смесь получилась однородной, используют сшивающие агенты и катализаторы, в частности, октоат олова. Жидкий полимер смешивают с ферромагнитными частицами и сшивающим агентом, при помощи центрифуги или ультразвуковой ванны проводят дегазацию, заливают в стеклянную или керамическую посуду нужной формы и оставляют смесь отверждаться. В зависимости от условий, в которых проводится отверждение, можно получить:

- Изотропные МРЭ – с равномерным распределением частиц по объему полимера (рис.1а);

- Анизотропные МРЭ – отверждаемые в магнитном поле. При этом частицы в полимере образуют упорядоченную «цепочечную» структуру (рис.1б).

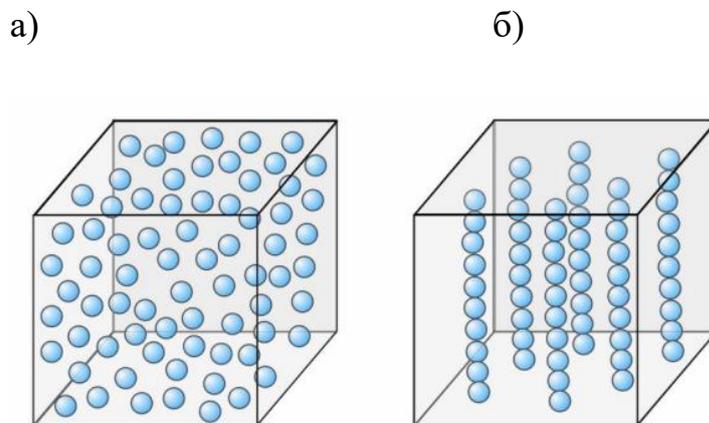


Рис.1. Распределение ферромагнитного наполнителя в полимерной матрице: а) изотропный МРЭ, б) анизотропный МРЭ

Кроме того, на свойства сформированного образца также будут влиять характеристики частиц наполнителя. Ш. Кашима и др. [2] изучали влияние размера частиц магнитного наполнителя на величину диэлектрической проницаемости образцов. Они установили, что при использовании частиц большего размера увеличивается значение проницаемости, а при полях выше 1500 кА/м происходит магнитное насыщение и значение становится постоянным. В работе [3], где исследовался магнитодиэлектрический эффект, было установлено, что маленькие частицы обеспечивают более сильный магнитный отклик.

Применение МРЭ

МРЭ уже сейчас применяются во многих сферах - от спортивного оборудования до космической промышленности. Они находят применение в электромеханических преобразователях - т.е. способны преобразовывать механическое движение в электрические сигналы [4] - этот эффект может использоваться в устройствах с сенсорным экраном. В медицинских приложениях - МРЭ используются в качестве элементов искусственных мышц [5] или в качестве аналогов перистальтической кровеносной системы [6]. В нефтяной промышленности такие композиты используются в качестве уплотнителей трубопроводов, а также для манипулирования потоком [7]. Также они используются, например, для защиты от электромагнитного излучения и для рассеивания электростатического заряда, а в микроэлектронике их используют в качестве электропроводящего клея. Кроме того, они интересны для применения как сенсоры температуры, газов (искусственный нос) и давления [8].

Обширной сферой возможного применения МРЭ являются датчики магнитного поля или давления. В основе принципа их работы лежит явление изменения диэлектрической проницаемости или проводимости при изменении внешних условий. Один из первых прототипов таких датчиков был предложен В.Е. Снайдер и Дж.Ст. Клэир в 1978 году и его планировалось использовать в компьютерных технологиях [9].

Сенсоры давления в последнее время привлекли очень много внимания за счет их возможности детектирования объектов, разработки тактильных дисплеев на их основе и детекторов отпечатков пальцев. Существует три типа таких датчиков – пьезоэлектрические, пьезорезистивные и емкостные. В настоящее время, наиболее востребованным является емкостной тип датчиков, что связано с их низкой чувствительностью к температуре и влажности, малыми затратами энергии и достаточно быстрым откликом по сравнению с двумя

другими типами. Чувствительность такого датчика напрямую зависит от того, как сильно изменяется емкость под действием внешнего давления. Величина этого изменения связана с изменением диэлектрической постоянной, толщины диэлектрика или поверхности электрода, контактирующего с эластомером. Однако проблемой таких датчиков является то, что они применимы только при высоких давлениях, а средства, для увеличения чувствительности часто дороги и сложны.

Возможные средства для увеличения чувствительности емкостного датчика были предложены Бо-Йон Ли и др. [1]. Они предложили использовать пористый эластомер в качестве диэлектрика. В результате, чувствительность датчика заметно повысилась - наличие пор позволило увеличить диапазон регистрируемых напряжений от 0,5 кПа до 2 кПа (рис.2а), а время реакции оказалось меньше 150 мс. Авторы рассмотрели два типа сенсоров: один состоящий из одной ячейки с двумя стеклянными подложками, и гибкий массив с двумя гибкими подложками.

На рис.2б можно увидеть сравнение отклика простого и пористого полимера при различных давлениях, а на рис.2в представлен отклик при давлении на элемент в третьей строке, второй колонке. Уровень яркости элемента соответствует величине изменения давления. Таким образом, авторами статьи были разработаны новые датчики давления емкостного типа на основе пористых эластомерных пленок с высокой чувствительностью при малых давлениях.

МРЭ также перспективны в качестве элементов миниатюрных колебательных контуров. М. Ландграфом и соавторами была предложена методика, где емкость изменяется при деформации, возникающей при воздействии сигналов высокого напряжения [5]. МРЭ использовался в качестве пассивного фильтра верхних частот, таким образом, изменение емкости, вызванное сжатием исполнительного механизма, изменяет амплитуду синусоидального сигнала, что может быть использовано для оценки механических деформаций.

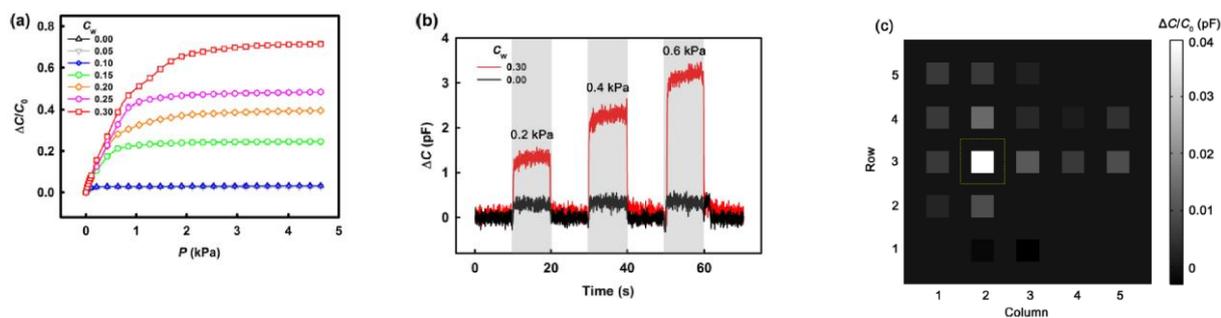


Рис.2а. Изменение емкости плоского конденсатора с МРЭ в качестве диэлектрика при приложении внешнего давления [1]

Рис.2б. Сравнение откликов МРЭ на основе простого (черная линия) и пористого (красная) полимеров [1]

Рис.2в. Отклик сенсорного элемента на основе пористого МРЭ [1]

В 2015 году была предложена модель датчика сжатий и напряжений на основе МРЭ с 35% железа в качестве наполнителя [10]. Результаты показывают рост сопротивления более чем в 30 раз при смещении в 100% (рис.3).

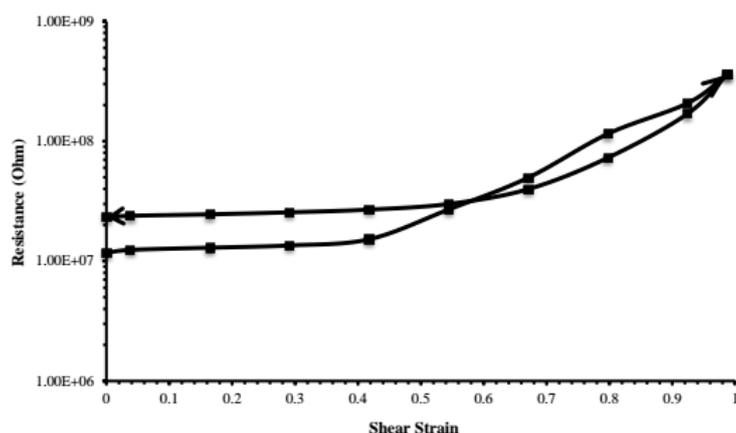


Рис.3. Изменение сопротивления МРЭ на основе Fe-35% при внешнем воздействии [10]

Таким образом, МРЭ обладают широкой сферой возможных применений, а изучение поведения этих композитов при различных внешних условиях является важной задачей для модернизации и разработки новых устройств на основе МРЭ.

Влияние концентрации наполнителя на электрические свойства МРЭ

Одним из факторов, влияющих на свойства МРЭ, является доля порошка наполнителя относительно объема всего образца. Изменение содержания ферромагнитных частиц оказывает сильное влияние на физические свойства магнитореологических эластомеров. Еще в 1993 году Т.Дж. Фиске и др. установили, что с добавлением ферромагнитных порошков объемное и поверхностное сопротивление композитов снижаются более, чем на семь порядков, диэлектрическая проницаемость увеличивается в 10 раз, а магнитная проницаемость увеличилась примерно в 6 раз [11].

Частицы наполнителя образуют в полимерной матрице области, проводимость которых выше, чем проводимость полимера, поэтому проводимость композитов сильно зависит от концентрации наполнителя и, соответственно, величины контактного сопротивления между частицами. Так, когда добавлено достаточное количество наполнителя, проводящие частицы становятся ближе друг к другу и могут формировать проводящую “тропу” через весь материал. Соответствующую концентрацию наполнителя называют порогом перколяции. Но при этом проводимость сильнозагруженного композита всегда меньше, чем проводимость металлического порошка. Известно, что контактное сопротивление между частицами намного больше, чем сопротивление материала самого наполнителя [8].

В композитах частицы могут быть разделены тонким слоем полимера, толщина которого варьируется от 10 до 100 ангстрем, в зависимости от физико-химических свойств полимерной матрицы, природы наполнителя и условий изготовления композита. В присутствии этого слоя, влияние на сопротивление оказывает только туннельное сопротивление.

Кроме того, нередко в МРЭ добавляют частицы электропроводящего материала (например, частицы графита), что позволяет использовать такие

композиты в качестве магниторезисторов, сенсоров магнитного поля, усилителя механических напряжений и т.д.[12].

Ш. Сасаки с соавторами исследовали, как от концентрации частиц железа будет зависеть проводимость образцов [13]. Ими было показано, что при малых концентрациях частиц (до 0.02) ток через эластомер с плотной матрицей остается постоянным при увеличении магнитного поля при любых прикладываемых к образцу напряжениях. При концентрации частиц 0.06 проводимость росла только при приложении высокого напряжения (1000 В). При концентрациях $\varphi = 0,14$ и $\varphi = 0,27$ рост проводимости наблюдался в обоих рассматриваемых случаях (30 и 1000 В). Можно сказать, что электрический ток при напряжениях 30 и 1000 В протекает через цепные структуры магнитных частиц.

В нулевом магнитном поле проводимость также зависела от объемной доли частиц наполнителя, причем в образцах с плотной матрицей проводимость изначально была ниже, чем в образцах с сильно пористой матрицей, и росла с увеличением доли частиц, а в пористой матрице наоборот - падала (рис.4). Считается, что это противоречивое поведение обусловлено выбором материала матрицы и происходящими процессами рассеяния.

А в исследовании 2015 года авторы предложили модель сенсора деформаций и напряжений, для которого были исследованы образцы с массовыми концентрациями 30%, 35% и 40% железа [10]. Для образца с 30% железа сопротивление уменьшилось более чем на три порядка при увеличении механического напряжения до 40Н. Для образца с 35% уменьшение произошло более чем на два порядка, а для 40% - около двух порядков при том же механическом напряжении.

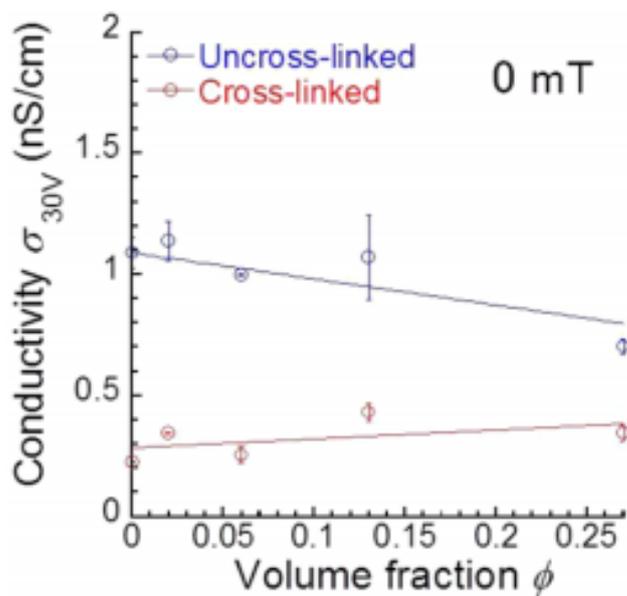


Рис.4. Изменение проводимости в зависимости от доли ФМ частиц в плотном (красная линия) и в пористом (синяя) эластомерах [13]

Авторы связывают это с уменьшением толщины полимерной прослойки между частицами наполнителя в результате механических напряжений, прикладываемых к композитам.

Влияние свойств матрицы МРЭ на их электрические свойства

Влияние материала матрицы в первую очередь обусловлено упругими силами, препятствующими деформациям, происходящим под действием внешних (механическое напряжение) или внутренних сил (перестроение частиц вдоль линий магнитного поля). Материалы матриц, используемые для создания магнитореологических композитов, могут сильно различаться - от твердых парафинов до мягких силиконов.

Наиболее широко используемыми являются эластомеры на основе силикона или каучука. Кроме того, выше уже были описаны некоторые результаты, полученные для образцов с пористыми матрицами. Можно сказать, что у образцов с мягкими матрицами всегда наблюдается рост диэлектрической проницаемости и уменьшение сопротивления в магнитном поле.

В 2015 году И. Бикой с соавторами был создан твердый композитный материал из парафина, содержащий ферромагнитные частицы и частицы графена [14]. Было изучено два образца с концентрациями наполнителя 60% и 20%. Авторы показали, что в образце, где содержание магнитных частиц выше, явно выделяется область роста и уменьшения емкости. А для образца с меньшей концентрацией во всех полях наблюдался слабый, но не монотонный рост (рис.5а).

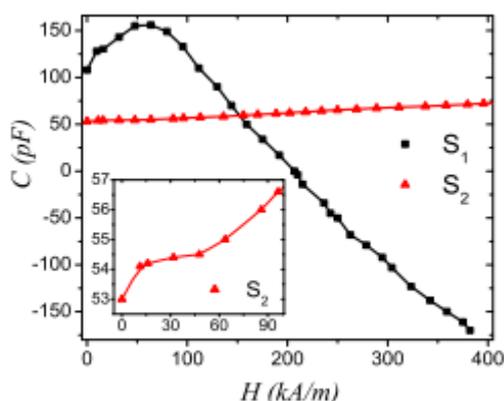


Рис.5а. Изменение емкости в парафиновом МРЭ с загрузкой частиц 60% (S_1) и 20% (S_2) [14]

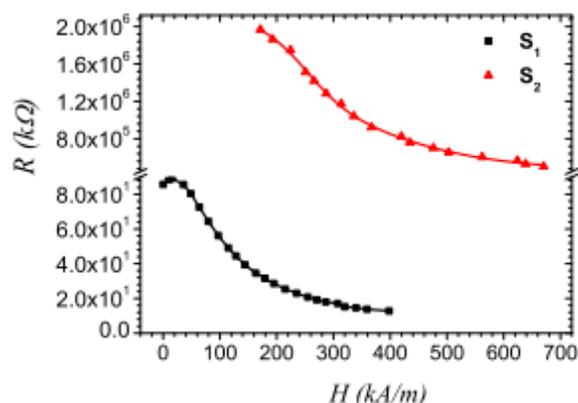


Рис.5б. Изменение сопротивления в парафиновом МРЭ [14]

В случае же сопротивления, у более загруженного образца снова наблюдается максимум, а у образца с меньшим содержанием ферромагнитных частиц сопротивление становится измеримым (с использованными приборами) только начиная с определенного значения поля и дальше спадает (рис.5б). Авторы отмечают, что увеличение объема частиц приводит к уменьшению расстояния между ними и увеличению магнитодипольного взаимодействия, и тогда магнитодиэлектрики становятся магниторезисторами. Таким образом, было показано, что в композите на основе парафина при высоких концентрациях ферромагнитных частиц диэлектрическая проницаемость имеет различные тренды изменения в разных диапазонах магнитных полей.

Типы упорядочения частиц наполнителя в полимерной матрице

Даже композиты с одинаковыми полимерными матрицами и равными долями наполнителя могут демонстрировать различный отклик на изменение внешних условий в зависимости от типа упорядочения частиц. При изготовлении МРЭ образцов можно получить как изотропное (равномерное) распределение частиц в полимерной матрице, так и упорядоченные цепочки частиц - анизотропное распределение (рис.6).

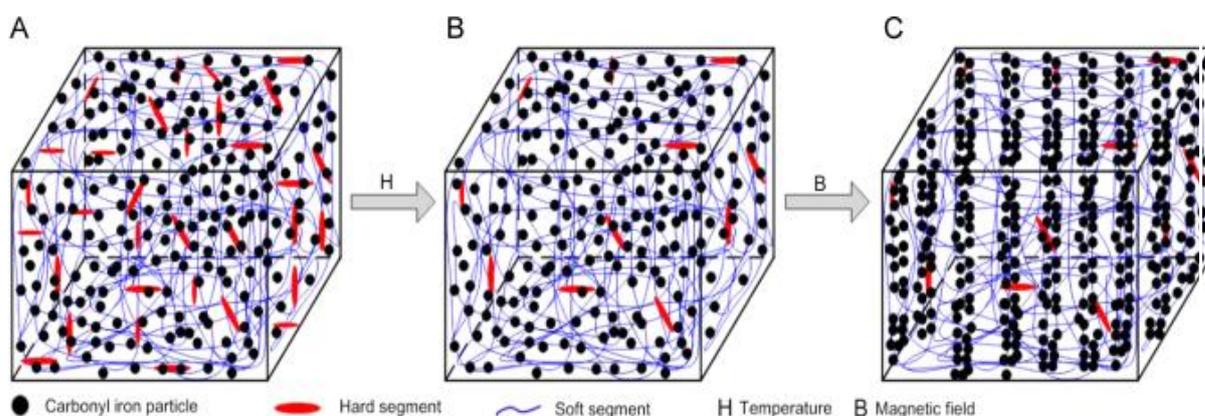


Рис.6. Распределение частиц в полимерной матрице: А,В - изотропные МРЭ, С - Анизотропный МРЭ [15]

При формировании анизотропной структуры в МРЭ, композиты приобретают новые свойства, как, например, большие изменения удельного электрического сопротивления при приложении давления. Н. Кчитом и Г. Боссисом было обнаружено, что изменение в сопротивлении при приложении давления для анизотропных образцов на порядок больше, чем для изотропных [8]. Кроме того, частицы наполнителя имеют сильные поверхностные неровности, и при их соприкосновении под действием давления, электрический ток протекает благодаря микроконтактам.

На рис.7 сравнивается проводимость в изотропном и анизотропном образцах с одинаковым содержанием магнитной фазы. Также добавлена аналогичная зависимость для порошка, однако результат для него невоспроизводим, так как в результате деформации частицы не возвращаются к своему первоначальному положению, как это происходит в эластомере. Причина различий в величине эффекта в том, что магнитное поле в процессе изготовления образца обеспечивает более близкий контакт между частицами. А большая чувствительность порошка к давлению по сравнению с МРЭ обусловлена тем, что полимер добавляет дополнительную жесткость композиту, поэтому для аналогичного уменьшения сопротивления необходимо приложить большее давление.

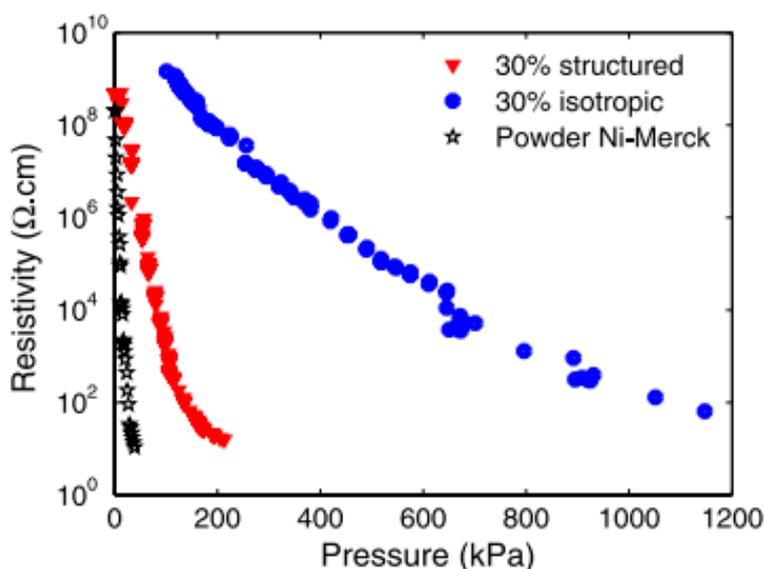


Рис.7. Зависимость проводимости изотропного и анизотропного МРЭ от внешнего давления в сравнении с аналогичной зависимостью для чистого порошка [8]

Кроме того, Г.В. Степановым и др. было показано, что изменение в сопротивлении изотропного и анизотропного образцов имеет одинаковый характер (рис.8) [16]. При этом видно, что при обратном ходе магнитного поля присутствует гистерезис. Также авторами было показано, что при повторении цикла два и более раз, петля больше не сдвинется (рис.9).

Физические свойства сильно зависят от объемной доли частиц, приложенного давления и поперечного поля. Анизотропия существенно увеличивает проводимость в одном из направлений.

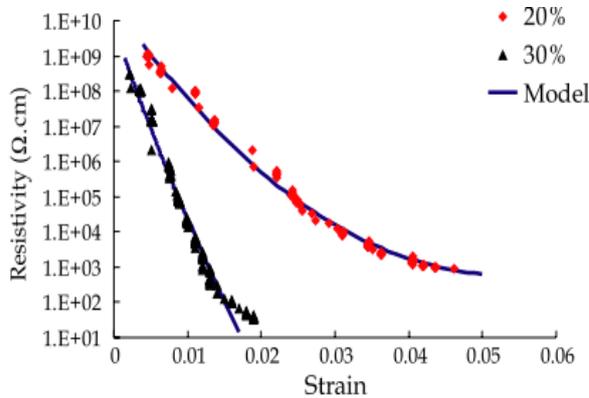


Рис.8а. Изменение сопротивление изотропного образца в зависимости от внешнего воздействия [16]

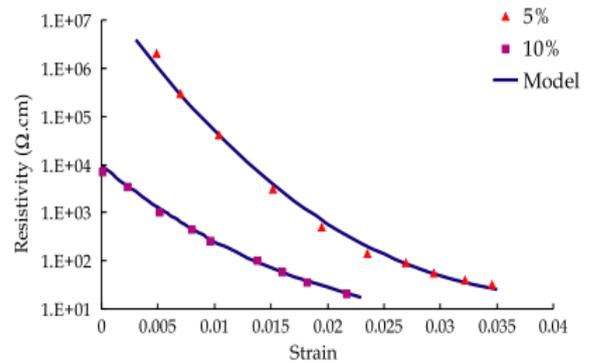


Рис.8б. Изменение сопротивление анизотропного образца в зависимости от внешнего воздействия [16]

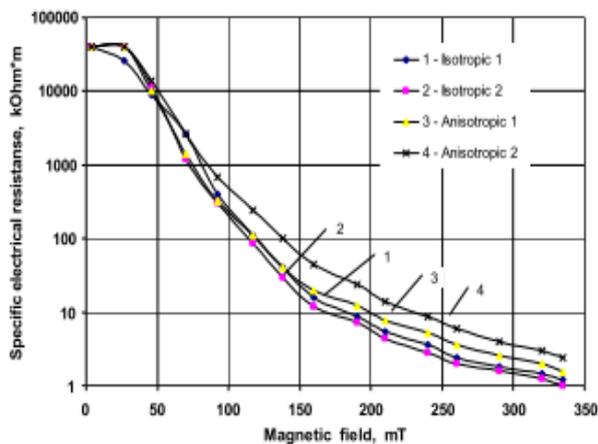


Рис.9а. Гистерезисный характер изменения сопротивления МРЭ в зависимости от внешнего магнитного поля [16]

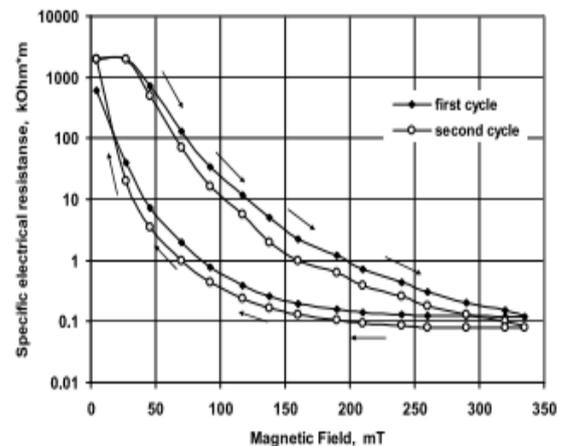


Рис.9б. Воспроизводимость петли гистерезиса изменения сопротивления в зависимости от магнитного поля [16]

Для сравнения влияния магнитного поля и давления на изотропные и анизотропные образцы И. Бикой были изготовлены образцы с различными объемными долями ферромагнитных частиц [17]. В слабых магнитных полях изотропные образцы демонстрируют более высокие значения сопротивления,

при этом образцы с малой концентрацией не проводили электрический ток, пока сдвливающая сила не превышает некоторого порога. В более сильных полях ток протекал через образцы при любом давлении, но в изотропных образцах изменения сопротивления с ростом поля почти не происходило. Авторами было установлено, что МРЭ становятся электропроводящими для объемных концентраций проводящих частиц больше 40%.

Влияние давления на электрические свойства МРЭ

Как уже отмечалось выше, частицы в полимерной матрице разделены слоем полимера. При приложении давления к образцу МРЭ расстояние между частицами в полимерной матрице будет изменяться, а, следовательно, должны изменяться и физические свойства эластомера.

Ещё в 1978 году было проведено сравнение удельного сопротивления эластомеров [9]. Реакция материалов характеризуется относительно медленным снижением сопротивления при приложении давления, достаточно устойчивым значением при достижении давления и относительно быстрым возвратом к предыдущим значениям при удалении давления. (Рис.10а).

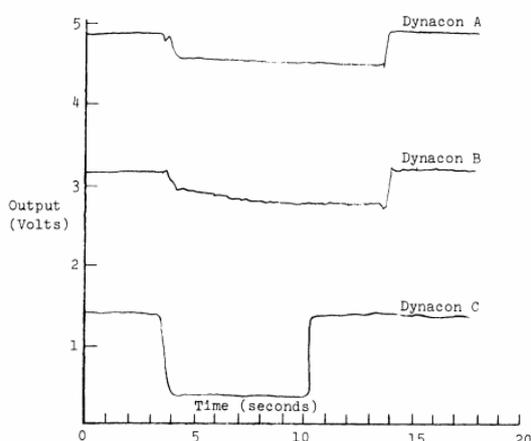


Рис.10а. Отклик МРЭ на изменение приложение и снятие давления [9]

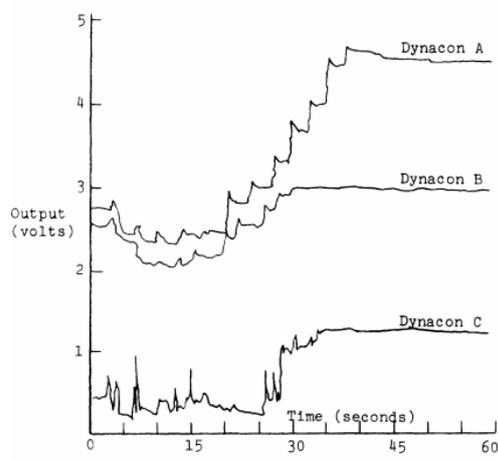


Рис.10б. Релаксация отклика МРЭ при ступенчатом уменьшении давления [9]

Отклик на давление проверяли, прикладывая значения от максимального, и затем ступенчато уменьшая до нуля. Видно, что в различных матрицах стабилизация значения сопротивления не происходит мгновенно, но времена стабилизации порядка 1 секунды (рис.10б).

Если рассмотреть деформацию сжатия, то И. Бика и др. показали, что изменение сопротивление устойчиво во времени и сильно зависит от величины давления (рис.11,12) [18].

В 2017 году Ш. Сасаки и др. был изучен образец магнитореологического эластомера с плотной матрицей и объемной долей частиц 0,27 [13]. Было обнаружено, что в поле 0 мТл электропроводность не зависела от деформации при приложенных напряжениях 30 и 1000 В. А в поле 500 мТл проводимость росла с увеличением деформации (рис.13).

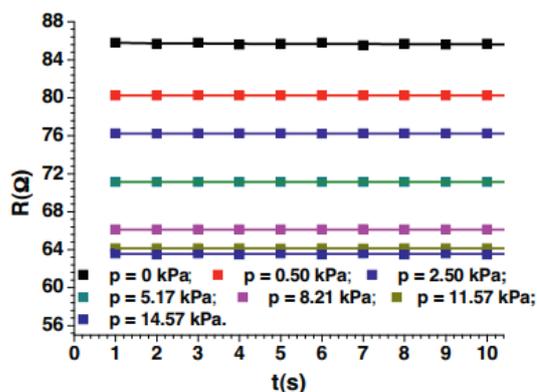


Рис.11. Зависимость сопротивления МРЭ от времени [18]

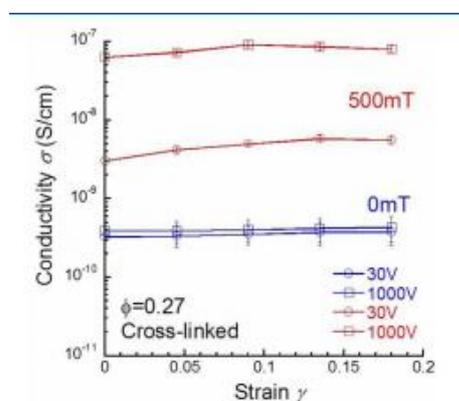


Рис.13. Зависимость проводимости МРЭ на базе плотной матрицы от давления [13]

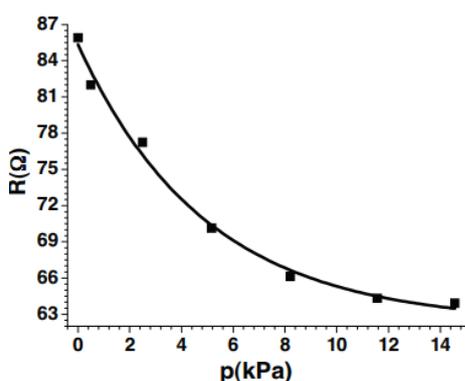


Рис.12а. Зависимость сопротивления МРЭ от внешнего давления [18]

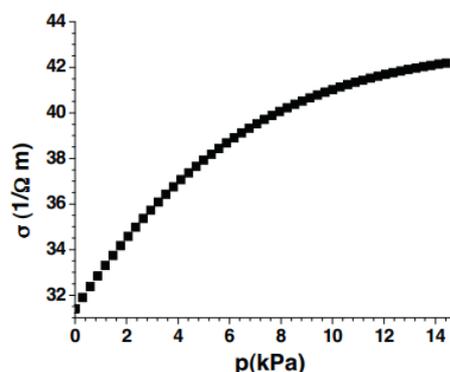


Рис.12б. Зависимость проводимости МРЭ от внешнего давления [18]

Таким образом, можно утверждать, что изменения, происходящие в композите под действием давления, устойчивы во времени, обратимы и способствуют формированию проводящих “троп” через образец.

Влияние магнитного поля на электрические свойства МРЭ

Эффекты, происходящие в МРЭ под действием магнитного поля представляют особый интерес, так как являются одним из основных механизмов в бесконтактном управлении устройств на основе МРЭ.

Под действием внешнего магнитного поля частицы в полимерной матрице будут стремиться перестроиться вдоль линий магнитного поля - сформировать “цепочки”. При этом полимерная матрица будет деформироваться. Физические свойства МРЭ будут меняться.

Процессы, возникающие в МРЭ под действием магнитного поля не устанавливаются мгновенно. В 2012 году Ш. Кашимой с соавторами было показано, что образец МРЭ сжимается (рис.14а.) в два раза быстрее, чем релаксирует в исходное состояние (рис.14б) [19]. Это происходит потому, что в то время как сжатие происходит из-за подемоторных магнитных сил, релаксация идет за счет эластичности силикона.

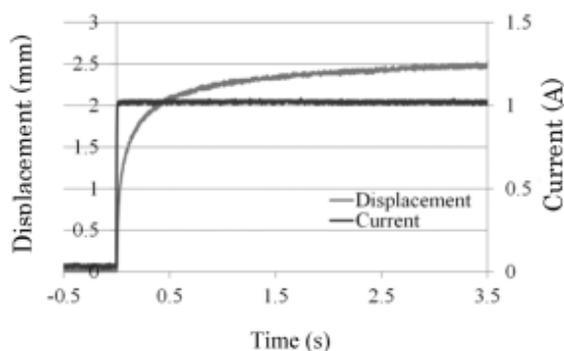


Рис.14а. Релаксация МРЭ при приложении магнитного поля [19]

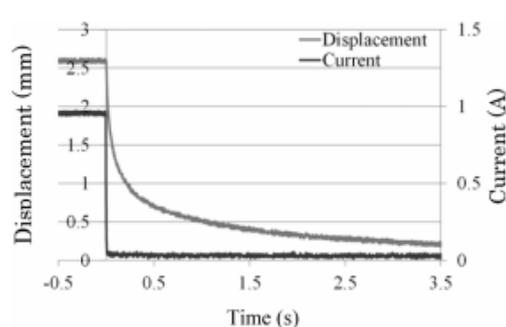


Рис.14б. Релаксация МРЭ при снятии магнитного поля [19]

Эффект магнитоимпеданса (МИ) определяется изменением импеданса во внешнем магнитном поле. Большинство материалов, демонстрирующих эффект МИ, являются магнитно-мягкими и доступны в виде аморфных проводов, лент и многослойных ферромагнитных тонких пленок. В отличие от этих традиционных материалов, которые имеют выдающийся гигантский эффект

МИ при высокой частоте (более 1 МГц), измеренные К. Вонгом и др. МРЭ материалы показали, что МИ эффект происходит при низкой частоте [4]. При этом МИ возрастает с увеличением тока и может достигать более 2100% в магнитном поле 650 мТл.

В исследовании, в котором рассматривалось влияние давления на сопротивление МРЭ, также изучали и влияние магнитного поля. Авторами было показано, что у эластомеров с наполнителями Fe, Ni и Nd-Fe-B сопротивление под влиянием внешнего магнитного поля падает на три порядка [16]. Аналогичный эффект они наблюдали и при приложении давления к образцам.

Кроме того, они установили, что значение сопротивления выходит на насыщение через 10 секунд после включения поля. (У И. Бики для их образца эта величина составляла 5 секунд [12]). При этом характер изменений с увеличением магнитного поля не менялся.

В другом комплексном исследовании [18] было показано, что изменение сопротивления сильно зависит от внешнего магнитного поля, устойчиво во времени и выходит на постоянное значение в сильных магнитных полях (рис. 15а, 15б).

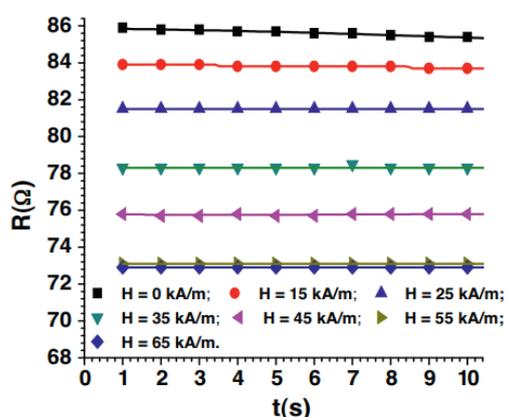


Рис.15а. Зависимость сопротивления МРЭ в магнитном поле от времени [18]

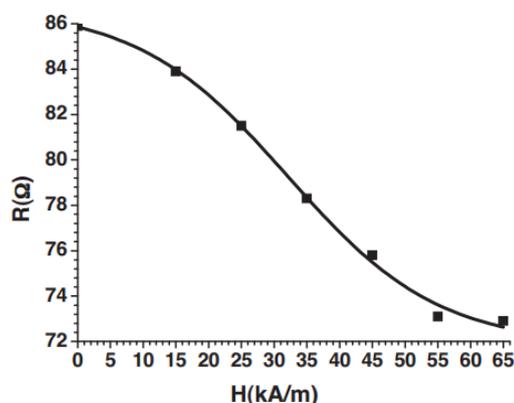


Рис.15б. Зависимость сопротивления МРЭ от внешнего магнитного поля [18]

Таким образом, было показано, что сопротивление с ростом магнитного поля уменьшается квазилинейно до определенного значения магнитного поля, а

при более сильных полях стремится к постоянным значениям - в этом диапазоне наблюдается эффект насыщения электропроводности.

При рассмотрении изменения электрических свойств МРЭ на переменном токе многие авторы отмечали область минимума на определенных частотах. Так, И. Бика и др. при изучении МРЭ с частицами карбонильного железа (40% об) отметили, что в малых магнитных полях с увеличением частоты тока наблюдается минимум емкости конденсатора (рис.16а), в котором изучаемый эластомер помещался в качестве диэлектрика [20]. При этом с увеличением магнитного поля этот минимум пропадает. В тоже время, для сопротивления наблюдался постоянный спад с ростом частоты (рис.16б). Также с увеличением величины поля сопротивление образца уменьшалось. Относительная диэлектрическая проницаемость увеличивалась с полем, но с ростом частоты монотонно спадала. (рис.16в).

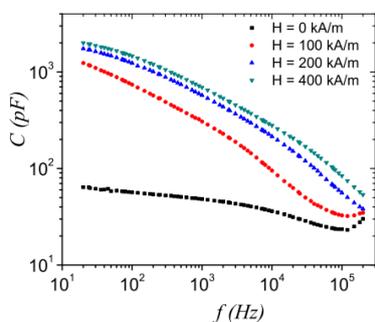


Рис.16а. Изменение емкости МРЭ в зависимости от частоты подаваемого тока. [20]

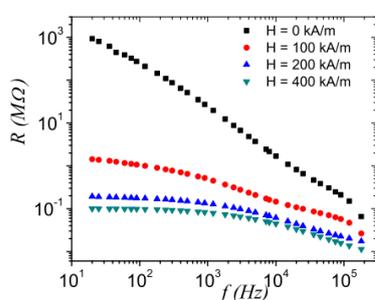


Рис.16б. Изменение сопротивления МРЭ в зависимости от частоты подаваемого тока. [20]

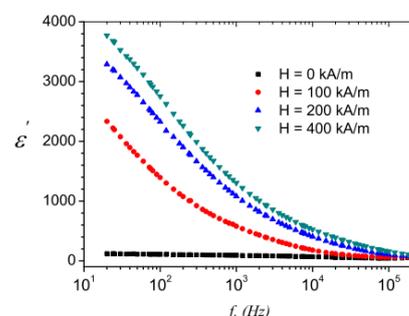


Рис.16в. Изменение диэлектрической проницаемости МРЭ в зависимости от частоты подаваемого тока. [20]

Таким образом анализ литературных данных подтверждает, что магнитоологические эластомеры чувствительны к наличию внешнего магнитного поля, которое вызывает в образцах МРЭ напряжения, аналогичные механическому давлению, при этом в сильных магнитных полях эффекты изменения электрических свойств выходят на насыщение, т.е. перестроение частиц вдоль линий магнитного поля завершено.

Влияние температуры на физические свойства МРЭ

Так как МРЭ используются во многих областях, в том числе в агрессивных средах и при различных погодных условиях, важно понимать, как именно будут изменяться величины эффектов при высоких и низких температурах.

Изменение температуры будет сильно влиять на механические свойства полимерной матрицы и, как следствие, на физические свойства эластомера в целом.

При воздействии низких температур [21] в матрице будут происходить процессы стеклования, в результате чего движение частиц внутри нее будет невозможным, а при воздействии сильных магнитных полей или давлений МРЭ может утратить целостность. Однако, если повреждений в образце не произошло, выше температуры стеклования МРЭ вернется к своему первоначальному состоянию.

При воздействии высоких температур матрица будет терять упругость, механизмы, возвращающие ферромагнитные частицы к их первоначальному положению, перестанут работать, устройства на основе этих материалов потеряют эффективность. Однако, так как при нагревании матрица размягчается и движение частиц в ней будет облегчено, то величины проявляемых эффектов могут стать заметно больше.

В 2015 году Б. Джу и соавторы показали, что с увеличением температуры и ростом магнитного поля, магниторезистивный эффект изотропного МРЭ может достигать до 4176,5% при температуре 80°C [15]. Авторы использовали для исследований образцы с массовой долей частиц карбонильного железа до 70%.

На рис.17 показаны фотографии образцов МРЭ при температуре 20°C и 80°C, соответственно. Видно, что при 20°C образец быстро восстанавливается при снятии воздействия, а при температуре 80°C форма МРЭ может быть изменен на произвольную и будет сохраняться в отсутствии внешних сил.

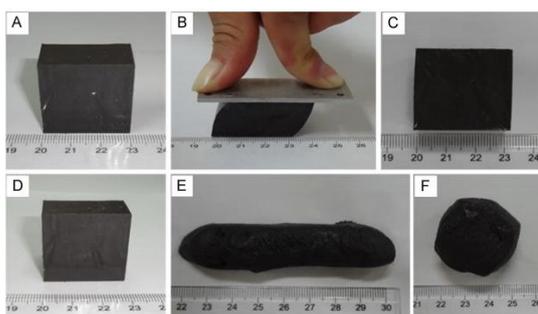


Рис.17. Деформации МРЭ при температуре 20°C (А-С) и при температуре 80°C (D-F) [15]

Таким образом, область применения магнитореологических эластомеров ограничена снизу температурой стеклования используемого полимера и сверху редуцированием упругости полимерной матрицы.

Теоретические модели

Несомненно, ввиду большого числа факторов, влияющих на свойства МРЭ и разнообразия происходящих в них процессов возникает желание иметь возможность теоретически предсказывать, какие эффекты можно ожидать от образцов при тех или иных внешних условиях.

Процессы, происходящие в магнитоэологических эластомерах под влиянием внешних воздействий сложны для точного описания или компьютерного моделирования. Однако, существуют теоретические модели, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Как уже говорилось, под действием внешнего магнитного поля ферромагнитные частицы в полимерной матрице стремятся выстроиться в “цепочки” вдоль линий магнитного поля. При деформации образцов расстояния между отдельными частицами сокращаются вплоть до возможного контакта.

К. Вонг и др. предложили следующую модель для описания процессов в МРЭ [4], [22]. Для описания сопротивления может быть использована следующая эквивалентная схема, которая представляет собой серию сопротивлений и емкостей, соединенных параллельно, как показано на рис.18.

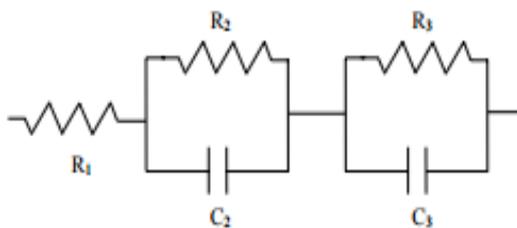


Рис.18. Эквивалентная схема для описания МРЭ [22]

Сопротивление R_1 представляет собой сопротивление частиц, R_2 и C_2 - сопротивление и емкость границы раздела электрод-образец. Кроме того, R_3 и C_3 , которые расположены последовательно, соответствуют контактам самих ферромагнитных частиц.

С использованием аналогичного представления Дж.Л. Миетта и др. в 2016 году проанализировали каждую из составляющих, которые должны давать вклад в сопротивление МРЭ [23]. Модель, предложенная ими, основывалась на сочетании эластичных свойств материала и вероятности электронов туннелировать между отдельными проводящими регионами, разделенными полимерной матрицей в “цепочках” и на их концах. Для подтверждения предположений проводились измерения на образцах МРЭ. Однако, авторы отмечают, что в случае использования суперпарамагнитных частиц в качестве наполнителя МРЭ расстояние между частицами при приложении магнитного поля изменяться не будет, а в случае с частицами, обладающими выделенным направлением намагниченности, приложение внешнего магнитного поля может привести как к уменьшению, так и к увеличению расстояния между проводящими участками. Таким образом, вклад в сопротивление образца вносят: сопротивление туннелирования между проводящими участками, собственное сопротивление каждого участка и сопротивление между образцом и электродами.

Сопротивление между “цепочками” и электродами, так как электроды не намагничиваются, остается постоянным при любой величине магнитного поля. Сопротивление в частях цепочек обусловлено тем, что частицы могут непосредственно касаться друг друга. Для рассматриваемых в данной статье образцов электрический поток через единый агрегат представляет собой скачок или туннелирование электронов из одной проводящей частицы А в другую проводящую частицу В. По этой причине разумно ожидать следующего: эффективное расстояние для электронного скачка или туннелирования между этими микрочастицами не меняется при приложении магнитного поля, таким

образом, упругие или пластические деформации композита из-за механических напряжений, вызванных магнитным полем, как ожидается, не повлияют на эффекты магнитосопротивления поскольку частицы А и В не различимы.

Таким образом, основной вклад в изменение сопротивления при приложении магнитного поля будут вносить изменения в расстоянии между частицами, разделенными слоем полимера.

И. Бика и др. разработали модель, в которой расстояние между частицами наполнителя в эластомере прямо пропорционально объемной доле наполнителя и внешнему магнитному полю и обратно пропорционально вязкости матрицы, при этом являясь функцией от времени [12]. Они получили, что стабилизация частиц при приложении внешнего воздействия должна занимать до 30 секунд.

Кроме того, очевидна связь между изменениями в проводимости эластомера, происходящими под действием магнитного поля и аналогичными изменениями под действием давления. В 2014 году И. Бика и др. теоретически соотнесли эти процессы, предложив модель, взаимно преобразующую величины изменений [18]. Исходя из своих экспериментальных данных, они определили величины магнитного поля и внешнего давления, для которых сопротивление имеет одинаковые значения, что показано на рисунке 19а. Из этих данных можно получить информацию о магнитном давлении, индуцированном магнитным полем внутри МРЭ.

Аналогичным образом ими была построена зависимость константы упругости $k = k(H, p)$, как показано на рисунке 19б. Видно, что ее можно зафиксировать магнитным путем, выбирая соответствующее значение для напряженности магнитного поля H , соответствующее давлению сжатия p .

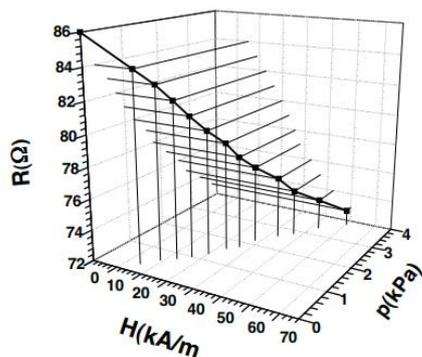


Рис.19а. Зависимость сопротивления от внешнего магнитного поля и прикладываемого давления [18]

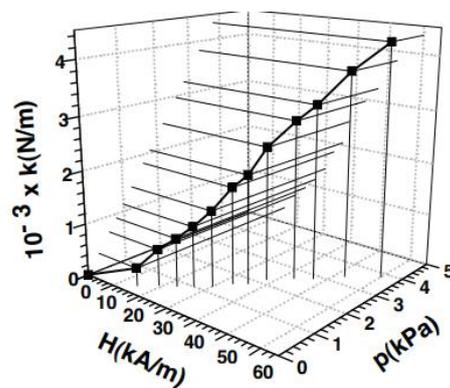


Рис.19б. Зависимость константы упругости от внешнего магнитного поля и прикладываемого давления [18]

Построенные модели учитывают собственное удельное сопротивление частиц наполнителя, их объемную долю в образце, число образовавшихся в полимере “цепочек” и упругие свойства полимерной матрицы.

На основании проведенного анализа литературных данных была сформулирована **Цель данной работы, которая** заключается в исследовании влияния внешних факторов, таких как магнитное поле, внешнее механическое давление и температура на диэлектрические и электрические свойства магнитореологических эластомеров.

Методика измерения

При разработке методики проведения измерений диэлектрических и электрических свойств магнитоэологических эластомеров были спроектированы и изготовлены на 3D-принтере измерительные ячейки (рис.20), состоящие из корпуса, в который помещался плоский конденсатор $S = 20 \times 20 \text{ мм}^2$ и дополнительных элементов. Одна пластина конденсатора была жестко зафиксирована, а к другой пластине имелась возможность приложения механического давления. Макеты ячеек были нарисованы при помощи программы Tinkercad, напечатаны в Научном Парке МГУ. Давление прикладывалось при помощи пружины, жесткостью k ; сжатие пружины осуществлялось при помощи металлических пластин толщиной 0.5 мм, помещавшихся между пружиной и ограничивающим фиксатором.

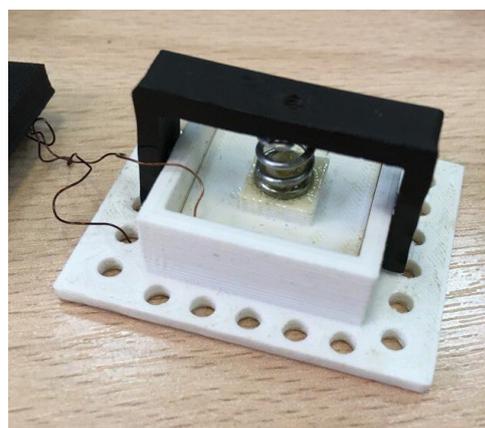
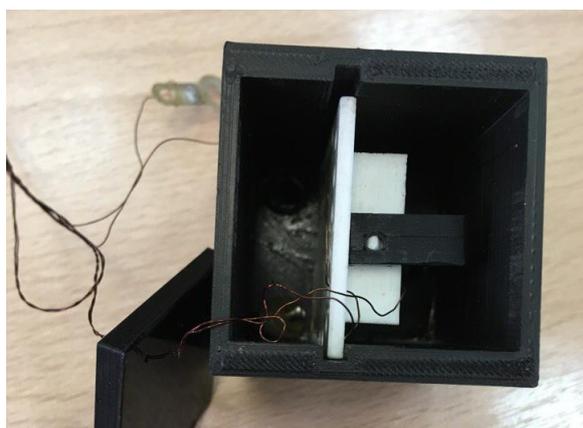
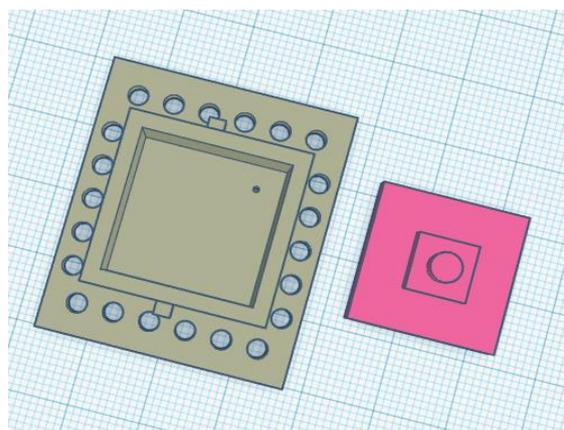
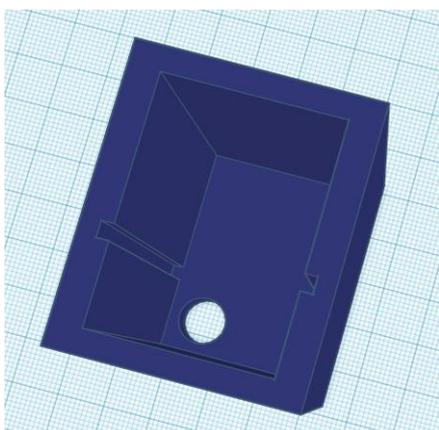


Рис.20. Измерительная ячейка с плоским конденсатором-вставкой

Образец МРЭ помещался между обкладками плоского конденсатора так, чтобы полностью заполнить объем между ними. Измерительная ячейка помещалась между полюсами электромагнита. Линии магнитного поля были перпендикулярны плоскости образца. Величина поля измерялась при помощи тесламетра, емкость конденсатора и импеданс - при помощи RLC-измерителя Актакон.

Также был изготовлен сосуд дьюара, из которого через трубчатый шланг к ячейке подводился азот. Температура в ячейке фиксировалась при помощи термопары медь-константан и мультиметра.

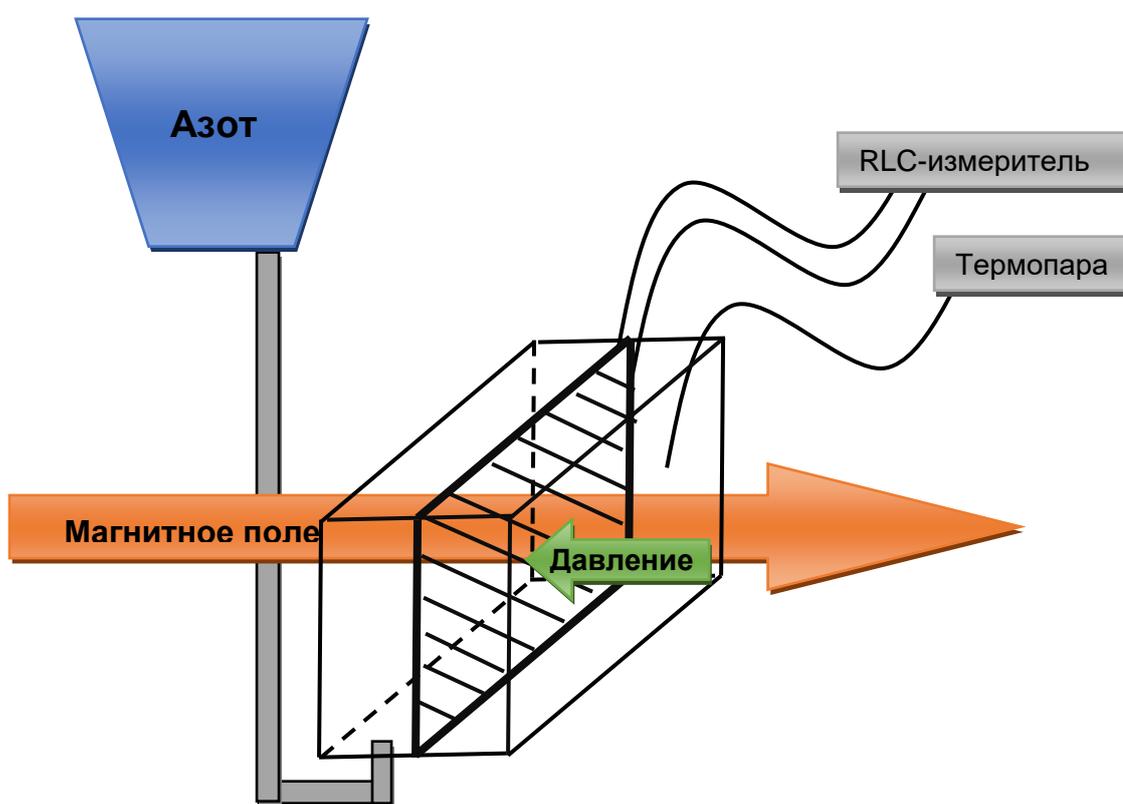


Рис.21. Схематическое изображение измерительной установки.

Измерение диэлектрических и электрических свойств МРЭ

В ходе измерений при помощи RLC-измерителя фиксировались емкость конденсатора с образцом МРЭ в качестве диэлектрика и импеданс. Измерения проводились в полях 0 мТл, 100 мТл, 200 мТл, 300 мТл, 400 мТл и 500 мТл.

По известной формуле емкости плоского конденсатора:

$$C_1 = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d} = \varepsilon C_0$$

где C_1 – емкость конденсатора с эластомером в качестве диэлектрика, а C_0 – емкость пустого конденсатора, можно определить диэлектрическую проницаемость материала между обкладками. Таким образом, из отношения емкостей заполненного конденсатора к пустому, можно получить диэлектрическую проницаемость магнитного эластомера ε .

Величина магнитодиэлектрического эффекта рассчитывалась по следующей формуле:

$$MDE = \frac{C - C_{H=0}}{C_{H=0}} * 100\%.$$

Изменение импеданса композита можно получить по аналогичной формуле:

$$MI = \frac{Z_H - Z_{H=0}}{Z_{H=0}} * 100\%$$

Изучение влияния механических напряжений

При помощи пружины к одной из обкладок плоского конденсатора с образцом МРЭ в качестве диэлектрика прикладывалось внешнее давление: 0 кПа, 23.75 кПа, 47.5 кПа, 71.25 кПа и 95 кПа. Величина давления определялась по формуле:

$$p = k \frac{\Delta x}{S},$$

где k - известная жесткость пружины, Δx - сжатие пружины, S - площадь обкладки конденсатора.

При этом, так как ячейка конденсатора была ограничена со всех сторон (рис.20), объем образца не изменялся (рис.22а, 22б), следовательно изменения его электрических свойств связаны с возникновением упругих напряжений в матрице.



Рис.22а. Положение верхней обкладки плоского конденсатора с МРЭ в качестве диэлектрика без приложенного давления



Рис.22б. Положение верхней обкладки плоского конденсатора с МРЭ в качестве диэлектрика при максимальном прикладываемом давлении

Образцы

Для исследования были использованы образцы магнитореологических эластомеров на основе Fe, FeNi, PZT:

Образцы, изготовленные в ГНИИХТЭОС и предоставлены Степановым Г.В.:

- Fe 61%
- Fe-Ni 79%
- Fe 68%, 77%, 85% (рис.22)

Образцы, изготовленные Ю.А. Алехиной на физическом факультете:

- Fe 10%
- PZT 10%
- Fe-PZT 20% 1-1



Рис.23 Образцы МРЭ с частицами Fe 68%, Fe 77% и Fe 85%.

Экспериментальные результаты

Влияние частоты электромагнитного поля

Измерения проводились при переменном токе. Как показано на рис.24 изменение частоты не оказывает сильного влияния на магнитодиэлектрический эффект, поэтому в дальнейшем все измерения проводились на частоте 50 кГц.

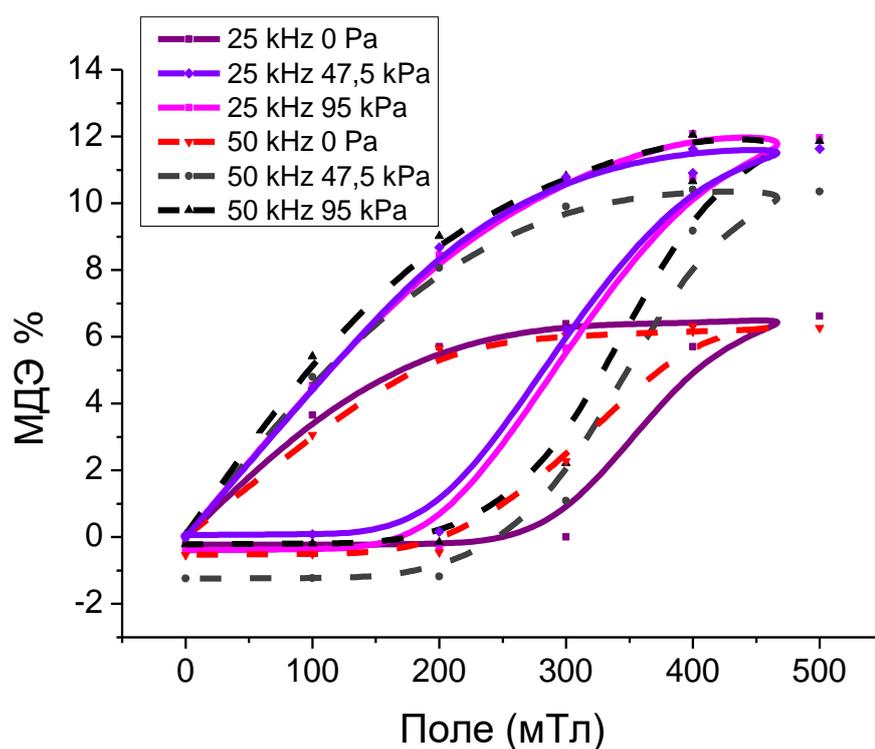


Рис.24 Магнитодиэлектрический эффект в образце Fe 61% при различных частотах переменного тока и различных давлениях.

Магнитодиэлектрический эффект

Было обнаружено, что во всех изучаемых образцах наблюдался рост диэлектрической проницаемости с увеличением магнитного поля, при этом, при уменьшении магнитного поля наблюдался гистерезисный характер МДЭ, аналогичный для всех образцов. Диэлектрическая проницаемость в образце с более упругой матрицей Fe 61% возвращалась практически к первоначальному значению, а в более мягких - разница первоначального и конечного состояний составляла порядка 1-3%.

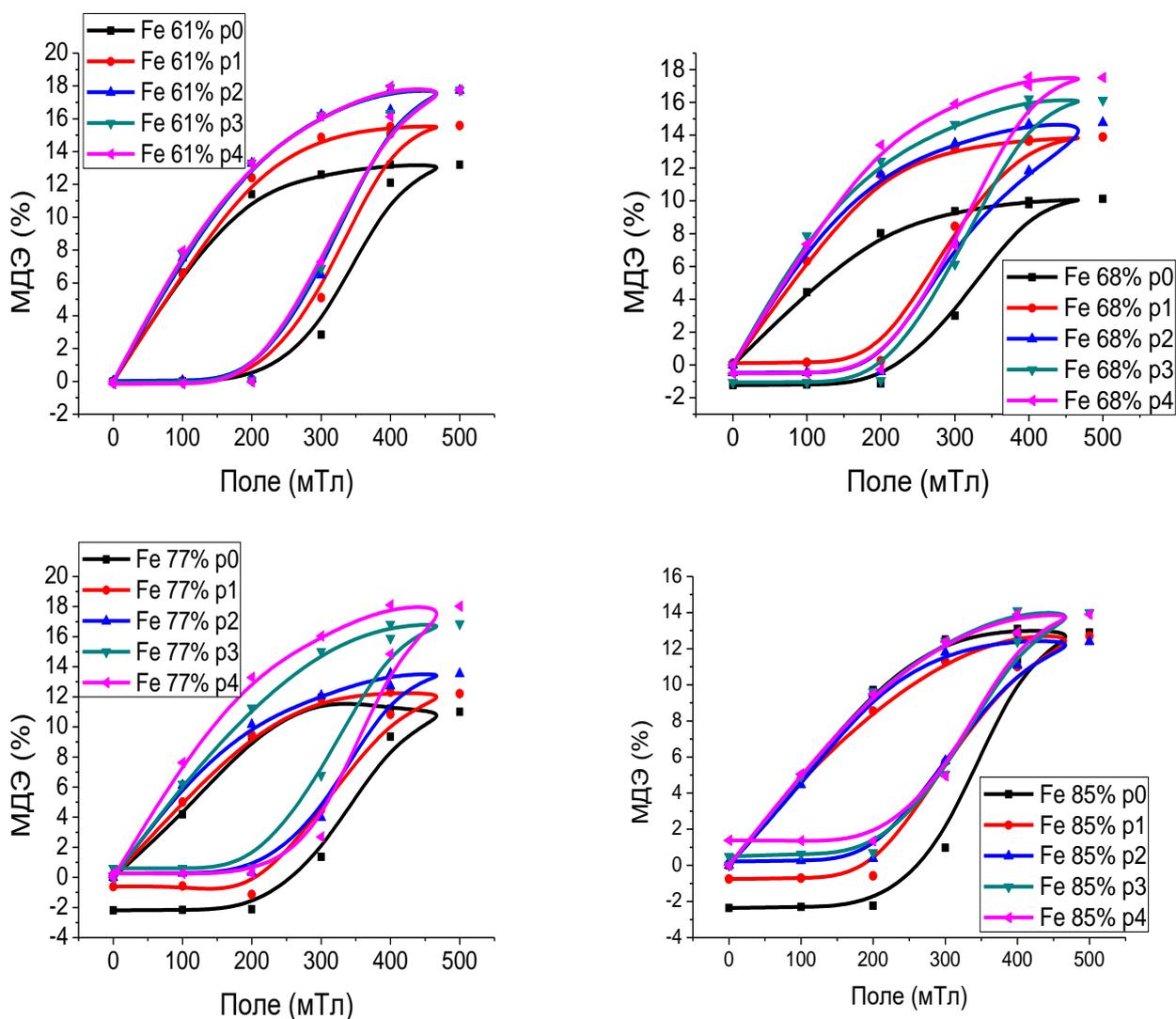


Рис.25 МДЭ в образцах МРЭ на основе Fe

Прикладываемое давление увеличивало величину магнитоэлектрического эффекта. В образце с более мягкой матрицей и наибольшей концентрацией наполнителя Fe 85% давление не оказывало значительного влияния, что можно объяснить близкими контактами между частицами наполнителя в матрице, а в более жестком образце Fe 61% эффект с ростом давления выходил на насыщение.

В образце с более упругой матрицей Fe 61% магнитоэлектрический эффект при всех прикладываемых давлениях был выше, чем в более мягких образцах с более высокой концентрацией, а при максимальном давлении МДЭ всех образцов выходил на насыщение, при котором частицы наполнителя были максимально приближены друг к другу (рис.26).

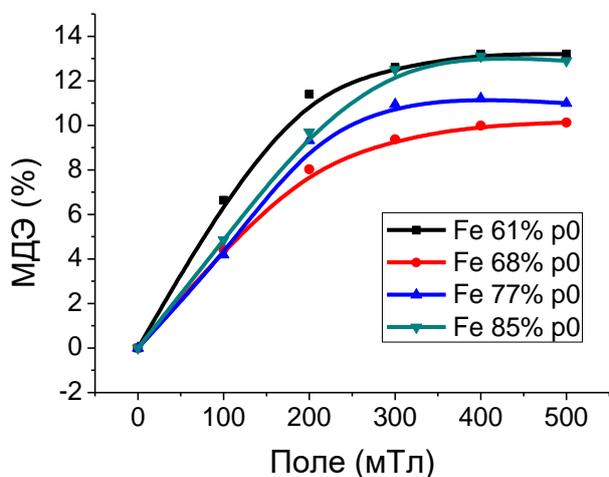


Рис.26а
Магнитоэлектрический эффект в образцах на основе Fe при нулевом внешнем механическом давлении

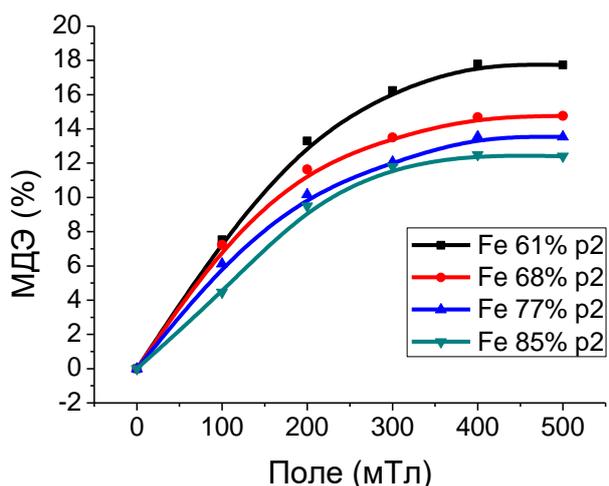


Рис.26б
Магнитоэлектрический эффект в образцах на основе Fe при внешнем механическом давлении 47,5 кПа.

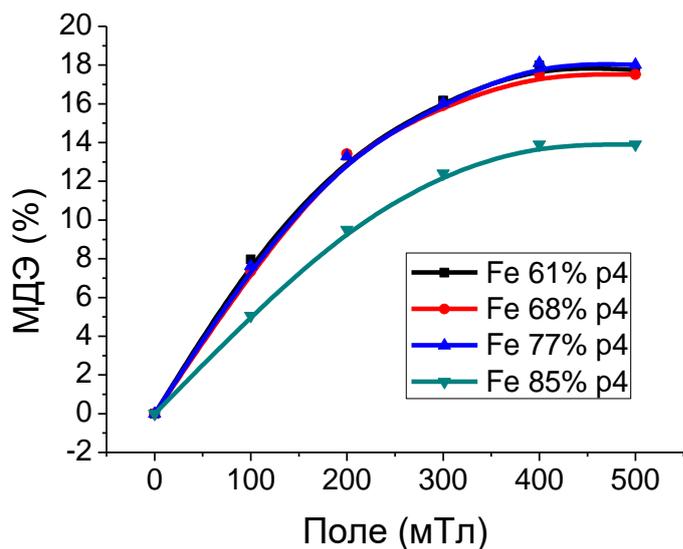


Рис.26в
Магнитодиэлектрический эффект в образцах на основе Fe при внешнем механическом давлении 95 кПа.

Был также исследован МРЭ с другими частицами - FeNi 79%. Наблюдаемый МДЭ был на порядок выше. Концентрация частиц была достаточно велика, и с ростом давления эффект выходил на насыщение. Различия в эффекте можно объяснить тем, что магнитная проницаемость частиц Fe-Ni отличается от частиц Fe и используемая при изготовлении данного эластомера матрица значительно мягче (рис.27).

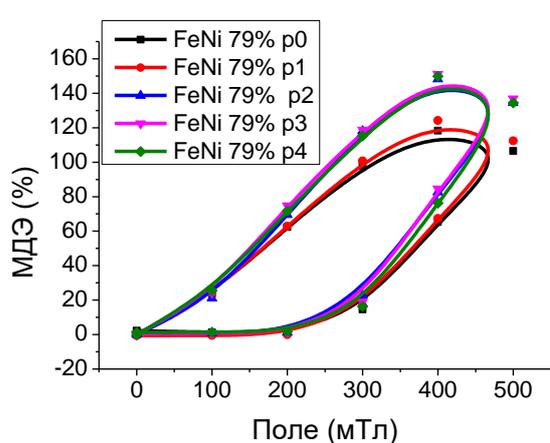


Рис.27а МДЭ в образце на основе Fe-Ni 79% в зависимости от поля при различных давлениях.

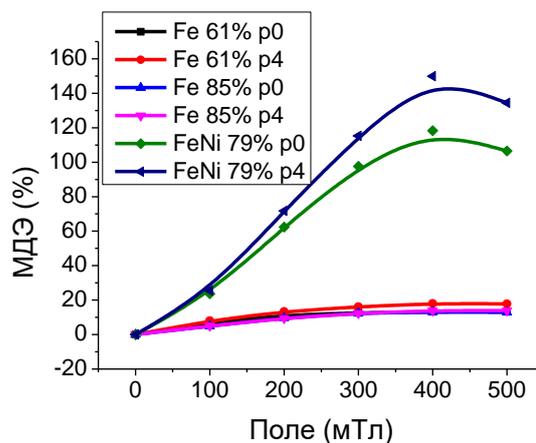


Рис.27б Сравнение МДЭ в образцах на основе Fe и Fe-Ni при нулевом и максимальном давлении.

В случае, если к ферромагнитным частицам добавлялись частицы сегнетоэлектрика (цирконата титаната свинца), магнитодиэлектрический эффект уменьшался (рис.28а), но из-за жесткости матрицы по величине был сравним с МДЭ в образцах Fe 61% и Fe 68%. Для образца со смешанным типом частиц проявлялась максимальная чувствительность к прикладываемому давлению (рис.28.б).

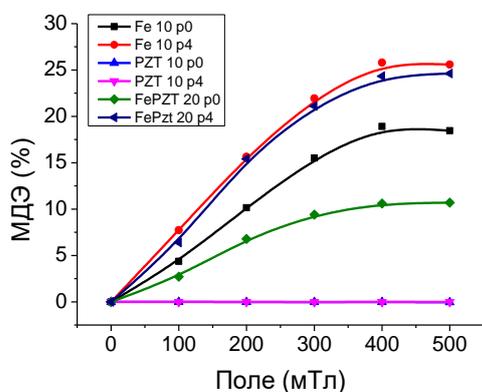


Рис.28а Сравнение МДЭ образцов на основе Fe 10%, PZT 10%, Fe-PZT 20%.

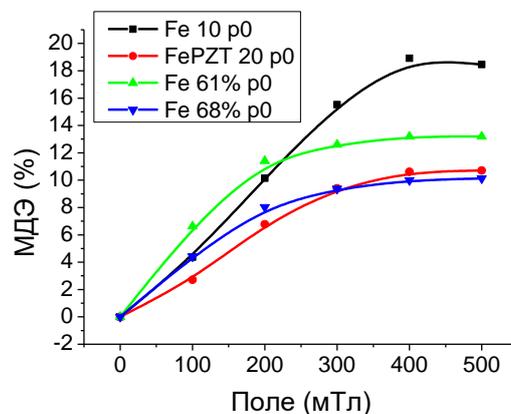


Рис.28б Сравнение МДЭ образцов на основе Fe и Fe-PZT

Влияние упругих напряжений

При приложении давления видно, что в образце с более упругой матрицей (Fe 61%) и образце большей долей частиц (Fe 85%) изменение МДЭ с ростом давления выходило на насыщение, в то время как в двух других образцах насыщения с давлением не наблюдалось (рис.29). Предположительно, это связано с тем, что матрицы этих образцов были достаточно мягкими, чтобы образец проявил чувствительность к механическим напряжениям, но в тоже время жесткими для насыщения. Таким образом, можно сделать вывод, что существует оптимальное соотношение объемной доли частиц и жесткости матрицы, при которых чувствительность к внешнему давлению будет максимальной.

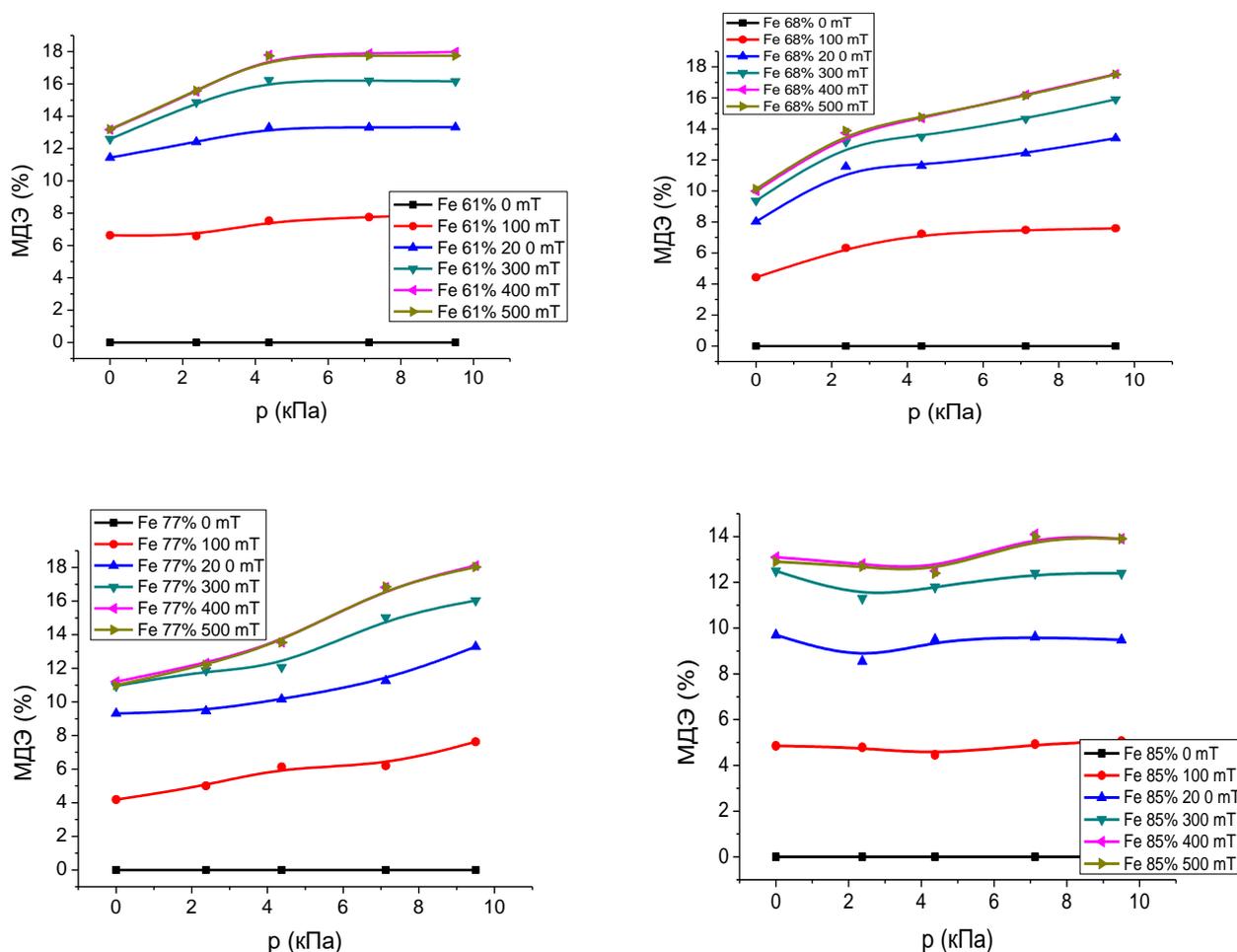


Рис.29 Зависимость МДЭ на основе Fe от внешнего механического давления.

Электрические свойства

Итак, мы рассмотрели комплексную часть потерь, а именно влияние внешних условий на комплексную часть импеданса, связанную с емкостью, а теперь перейдем к анализу поведения действительной части импеданса.

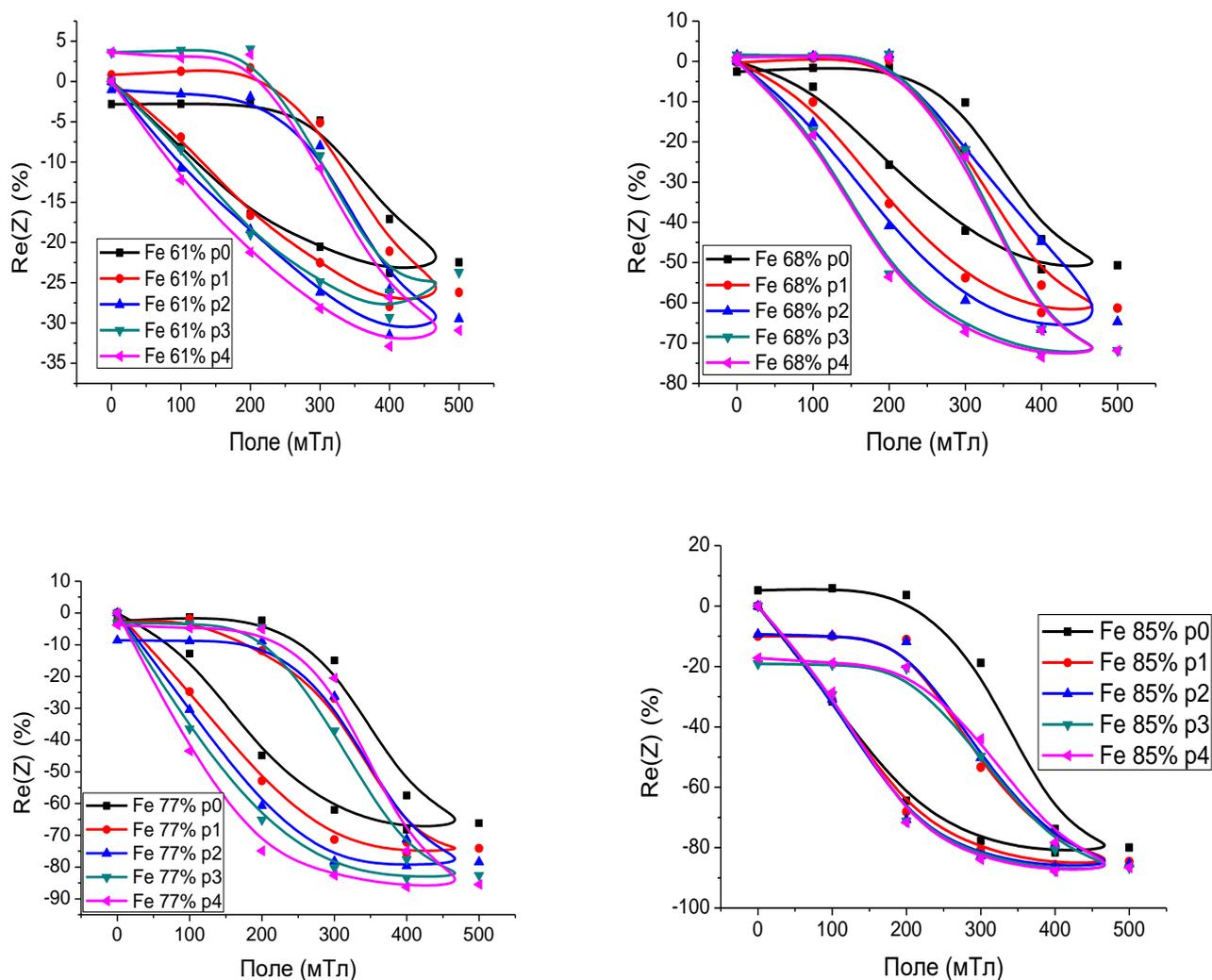
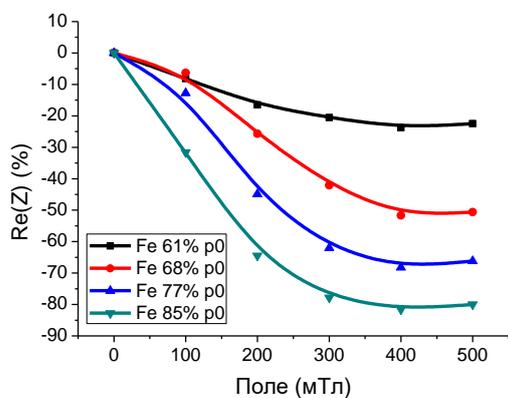


Рис.30 Изменение импеданса образцов на основе Fe в зависимости от внешнего магнитного поля и прикладываемого механического давления.

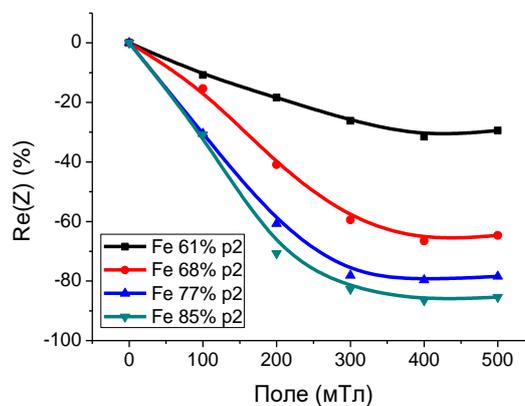
Изменение величины электромагнитных потерь в материале в магнитном поле также обладает гистерезисным характером, аналогичным для всех рассматриваемых образцов. Возвращение к первоначальному значению в

образцах при удалении поля практически не наблюдалось, разница с первоначальным значением импеданса была от 5% для более упругого образца (Fe 61%) до 20% в экспериментах с образцом с высокой долей частиц (Fe 85%), что показано на рис.30.

А



Б



В

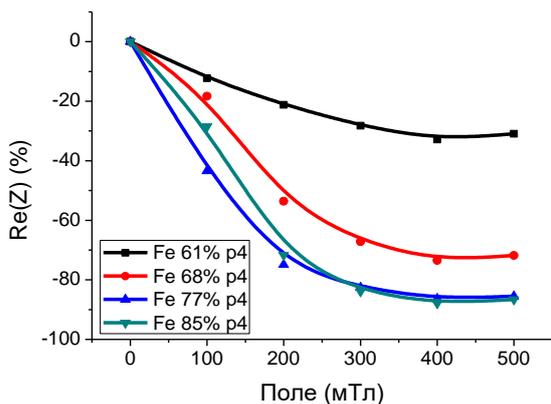


Рис.31 Изменение импеданса образцов на основе Fe при а) нулевом внешнем механическом давлении, б) при внешнем механическом давлении 47,5 кПа, в) при внешнем механическом давлении 95 кПа

Прикладываемое давление способствовало более резкому уменьшению реальной части потерь (рис.31). В образце с максимальной концентрацией наполнителя давление практически не оказывало влияния на характер изменения потерь в магнитном поле. В образцах с более мягкой матрицей при давлениях выше 71 кПа наблюдалось насыщение кривой уменьшения реальной части потерь, что говорит о максимальном сближении ферромагнитных частиц

в полимерной матрице. В образце с высокой массовой концентрацией частиц – Fe 85% - остаточные смещения в отсутствие давления практически не наблюдались, в то время как внутренние напряжения в образце вызывали заметный эффект памяти формы.

В образцах с другим типом частиц (FeNi 79%) эффект проявлялся сильнее, но при высокой загрузке частиц давление мало влияет на изменение величины эффекта. А добавление таких примесей как ЦТС вносит незначительную зависимость от давления и даже уменьшает эффект, в отличие от влияния на реактивную часть (рис.32) импеданса.

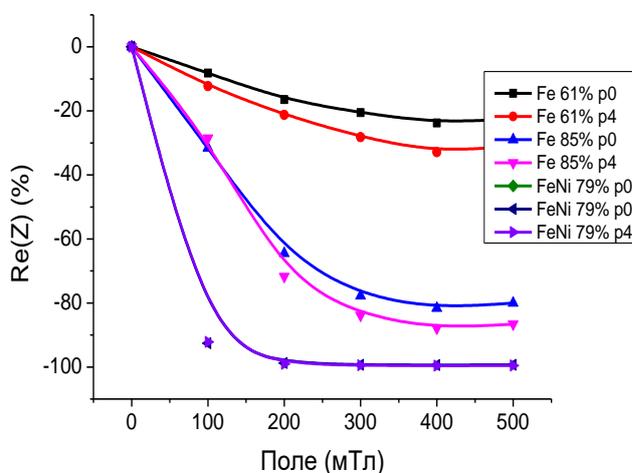


Рис.32а Сравнение изменений импеданса в образцах на основе Fe и Fe-Ni при нулевом и максимальном механическом давлении.

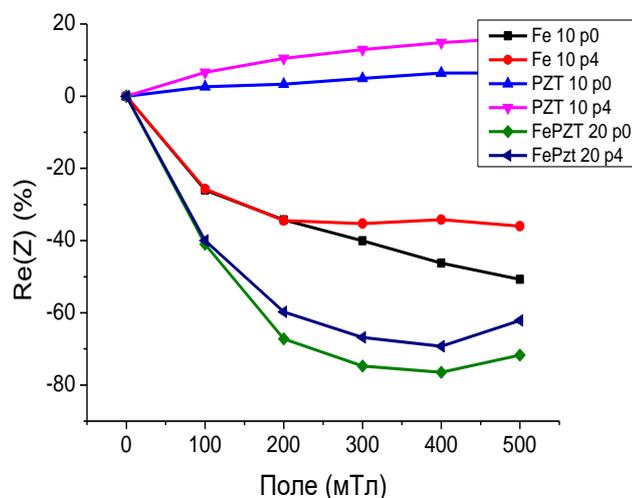


Рис.32б Сравнение изменений импеданса в образцах на основе Fe и Fe-PZT при нулевом и максимальном механическом давлении.

В целом, механические напряжения в матрицах увеличивают эффект изменения реальной части импеданса в магнитном поле, но насыщения эффекта от давления, в отличие от поля, не происходит (рис.33).

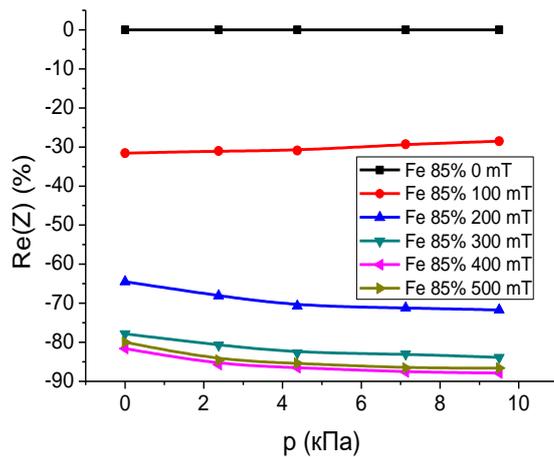
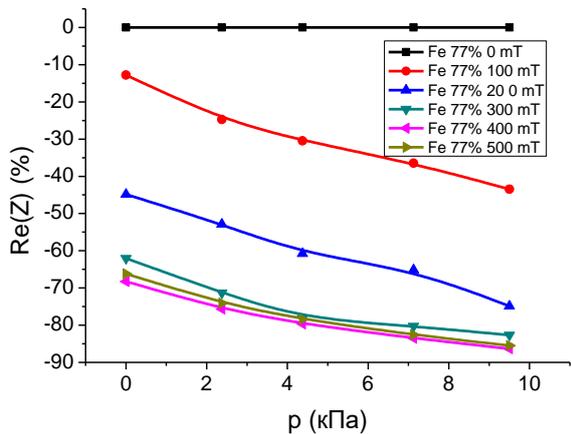
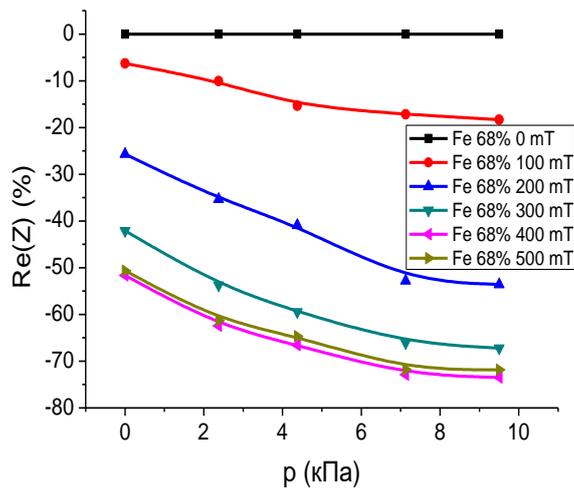
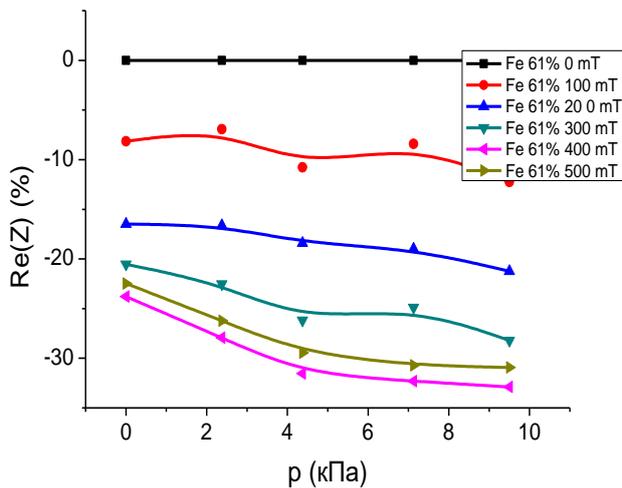


Рис.33 Эффект магнитоимпеданса в образцах на основе Fe в зависимости от приложенного механического давления в различных магнитных полях.

Влияние низких температур

В рамках бакалаврской дипломной работы ранее были проведены измерения, демонстрирующие влияние температуры на диэлектрические свойства магнитореологических эластомеров [24]. На рис.34 показаны результаты для образцов Fe 71,5% и NdFeB 35%, где выделяются следующие три области: область кипения азота, область постоянных значений, где матрица находится в замороженном состоянии и движение частиц в ней невозможно, и область выше температуры стеклования полимера, где емкость конденсатора начинает расти вследствие того, что частицы снова могут деформировать матрицу.

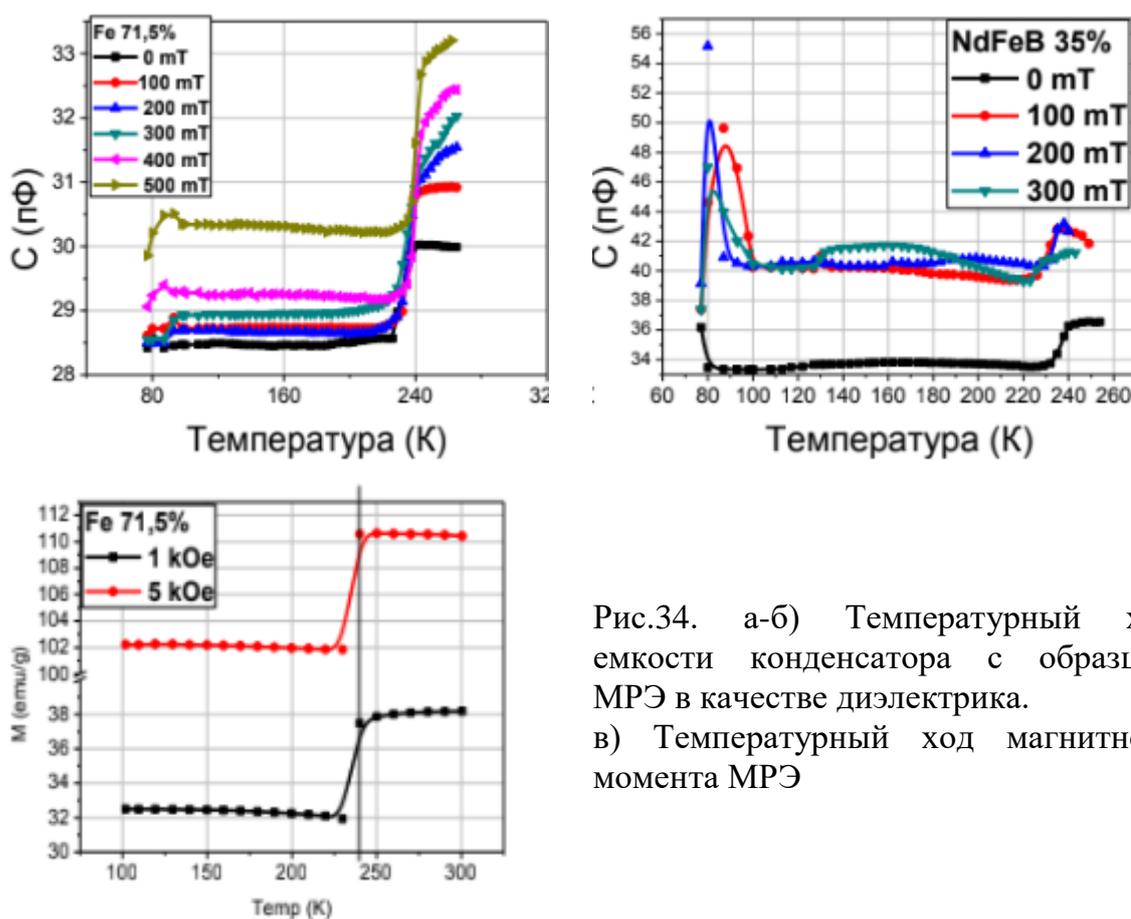


Рис.34. а-б) Температурный ход емкости конденсатора с образцом МРЭ в качестве диэлектрика.
в) Температурный ход магнитного момента МРЭ

Для полимера, использованного для создания данных образцов, температура стеклования $T_{ст} \sim 240$ К. На этой температуре также происходил скачек магнитного момента образца, что подтверждало влияние агрегатного состояния матрицы на физические свойства магнитореологического эластомера.

При выполнении магистерской диссертации было рассмотрено, как будет меняться с температурой емкость аналогичного конденсатора с МРЭ на основе Fe 68% в качестве диэлектрика при приложении к нему максимального давления. На рис.35 видно, что такого же резкого скачка, как в отсутствие давления, в образце не происходило, однако на определенной температуре ($T \sim 120$ К – температура стеклования полидиметилсилоксана) наблюдались небольшие изменения емкости. Причем, чем сильнее было внешнее магнитное поле, тем более явной становится особенность зависимости при этой температуре. Таким образом, видно, что хотя с увеличением поля диэлектрическая проницаемость МРЭ увеличивается при любой температуре, приложенное механическое давление создавало в матрице упругие напряжения, жестко фиксирующие частицы на первоначальных местах, препятствуя изменению их положения с ростом температуры.

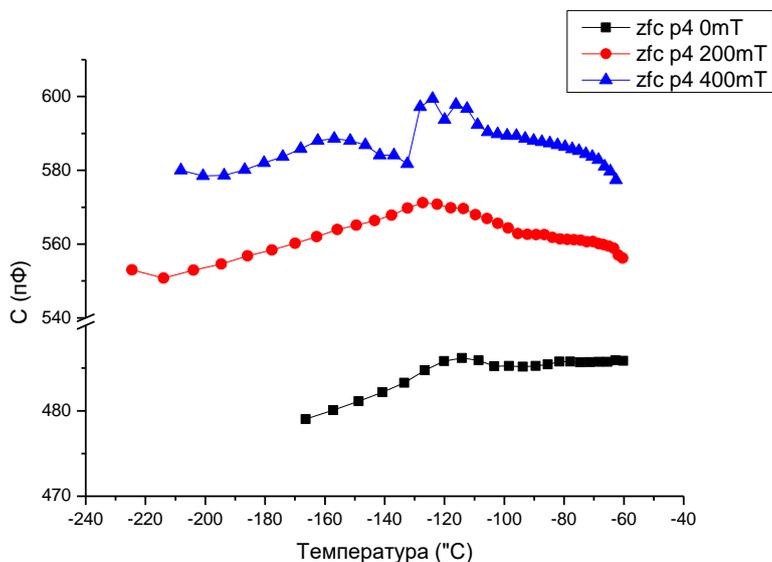


Рис. 35. Изменение емкости конденсатора с МРЭ на основе Fe 68% в качестве диэлектрика при включении поля после охлаждения образца и приложенном максимальном давлении.

Реальная часть импеданса также претерпевала изменения при прохождении через температуру стеклования полимера. Как и для мнимой части, можно заметить, что в отсутствие внешнего давления в областях выше и ниже $T_{ст}$ наблюдается рост величины сопротивления (рис.36а). В области ниже температуры стеклования рост происходит медленнее, чем в области более высоких температур. Скорее всего, изменения в первой области связаны с зависимостью собственных сопротивлений материалов от температуры, а во второй области вклад вносят также смещения частиц в упругой матрице. В то же время, приложенное давление «фиксирует» значение сопротивления (рис.36б). При этом, при любых температурах наличие внешнего магнитного поля уменьшает потери в образце.

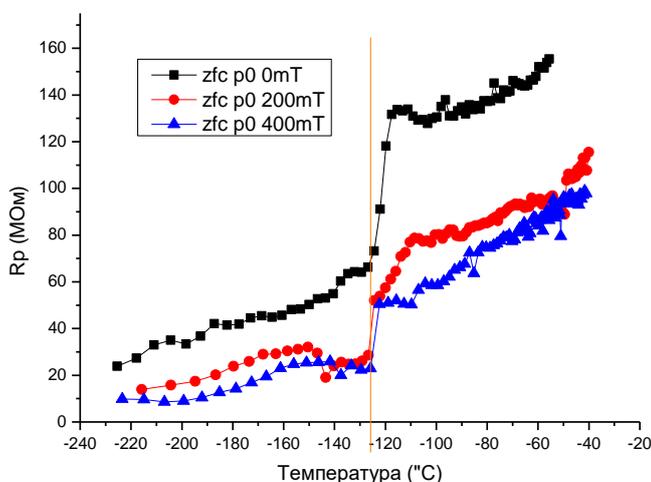


Рис. 36а. Изменение сопротивления МРЭ на основе Fe 68% при включении поля после охлаждения образца без приложения внешнего механического давления.

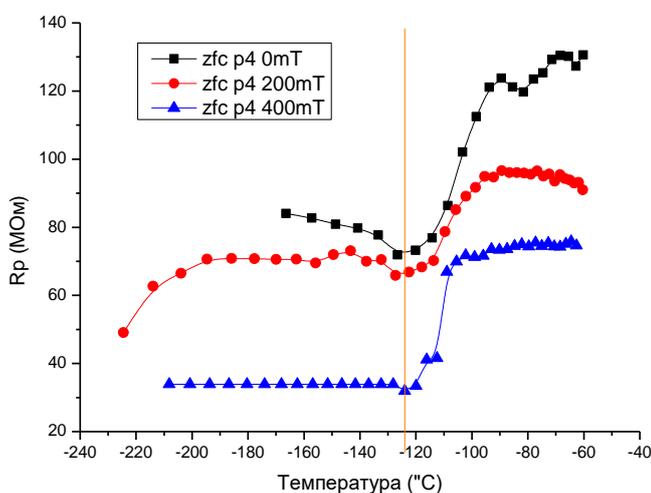


Рис. 36б. Изменение сопротивления МРЭ на основе Fe 68% при включении поля после охлаждения образца при приложении внешнего механического давления.

Таким образом, показано, что такие внешние факторы, как температура и давление оказывают сильное влияние как на реальную, так и на мнимую часть импеданса МРЭ. Основным механизмом изменений физических свойств образцов – смещение ферромагнитных частиц в полимерной матрице. Взаимодействие частиц сильно зависит от расстояний между ними, прикладываемые давления уменьшают эти расстояния, а наличие внешнего магнитного поля заставляет частицы выстраиваться вдоль линий магнитного поля, деформируя матрицу. При охлаждении образца ниже температуры стеклования движение частиц в полимере невозможно, вследствие чего изменений диэлектрических свойств не происходит, а рост реальной части импеданса обусловлен свойствами исходных материалов. При более высоких температурах прикладываемое давление вызывает внутренние напряжения в матрице, которые облегчают взаимодействия между ферромагнитными частицами, что приводит к усилению магнитодиэлектрического эффекта и уменьшению потерь материалов.

Основные результаты

- Разработаны и изготовлены измерительные ячейки, позволяющие проводить измерения электрических свойств МРЭ в магнитном поле при различных температурах.
- Диэлектрическая проницаемость МРЭ и их проводимость сильно зависят от концентрации и типа ферромагнитного наполнителя, а так же от жесткости используемой матрицы.
- Добавление примесей (ЦТС) уменьшает мнимую часть импеданса в магнитореологических эластомерах. В данной работе наблюдалось изменение на 20% в образцах Fe 10% и Fe-PZT 20% (1:1).
- Механическое давление (до 95 кПа) может изменять $Re(Z)$ на 20% в образцах с мягкой матрицей и достаточно высокой загрузкой частиц и $Im(Z)$ на 15% в образце с частицами, как ферромагнетика, так и сегнетоэлектрика.
- Ниже температуры стеклования полимера зависимости диэлектрических и электрических свойств МРЭ от температуры не проявляется из-за невозможности смещения ферромагнитных частиц в полимере.
- Наличие механических напряжений приводит к усилению магнитодиэлектрического эффекта и уменьшению потерь в МРЭ.

Список литературы

- [1] Bo-Yeon Lee, Jiyeon Kim, Hyungjin Kim, Chiwoo Kim, Sin-Doo Lee. "Low-cost flexible pressure sensor based on dielectric elastomer film with micropores". *Sensor and actuators*, 240(2106) 103-109
- [2] Shunta Kashima, Fumikazu Miyasaka, and Katsuhiko Hirata. "Novel Soft Actuator Using Magnetorheological Elastomer", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 48, NO. 4, APRIL 2012
- [3] Anna S. Semisalova, Nikolai S. Perov, Gennady V. Stepanov, Elena Yu. Kramarenko and Alexey R. Khokhlov. "Strong magnetodielectric effects in magnetorheological elastomers". *Soft Matter*, 2013, 9, 11318
- [4] X.Wang, F.Gordaninejad, M.Calgar, Y.Liu, J.Sutrisno and A.Fuchs. "Electrical Properties of Magneto-Rheological Elastomers". *Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, Vol.1
- [5] Maximilian Landgraf, Ulrich Zorell, Thomas Wetzel, Sebastian Reitelshöfer, In Seong Yoo, Jörg Franke. "Dielectric elastomer actuators as self-sensing devices: A new method of superimposing actuating and sensing signals". *Proc. of SPIE Vol. 9430* 943014-1
- [6] 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". *Adv. Funct. Mater.* 2013, 23, 3845–3849
- [7] Buc Slay and Winston Webber. "Stress relaxation of elastomer compounds". *Sealing Technology* 2011(2): 9-12
- [8] N.Kchit and G.Bossis. "Electrical resistivity mechanism in magnetorheological elastomer". *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42 (2009) 105505 (8pp)
- [9] W.E. Snyder and J.ST. Clair. "Conductive Elastomers as Sensor for Industrial Parts Handling Equipment". *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, VOL. IM-27, NO. 1.

- [10] Nima Ghafoorianfar and Faramarz Gordaninejad. "A magnetorheological elastomer compressive and shear sensor". Proc. of SPIE Vol. 9435 94351E-1
- [11] Halit S. Goktiirk, Thomas J. Fiske, and Dilhan M. Kalyon. "Electric and Magnetic Properties of a Thermoplastic Elastomer Incorporated with Ferromagnetic Powders". IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 29, NO. 6.
- [12] Ioan Bica. "Influence of the magnetic field on the electric conductivity of magnetorheological elastomers". Journal of Industrial and Engineering Chemistry 16 (2010) 359–363
- [13] Shuhei Sasaki, Yuri Tsujiei, Mika Kawai, and Tetsu Mitsumata. "Electric Conductivity and Dielectric-Breakdown Behavior for Polyurethane Magnetic Elastomers". J. Phys. Chem. B 2017, 121, 1740–1747
- [14] I. Bica, E.M. Anitas, L.M.E. Averis, M. Bunoiu. "Magnetodielectric effects in composite materials based on paraffin, carbonyl iron and graphene". Journal of Industrial and Engineering Chemistry 21 (2015) 1323–1327
- [15] Benxiang Ju, Rui Tang, Dengyou Zhang, Bailian Yang, Miao Yu, Changrong Liao. "Temperature-dependent dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomers under magnetic field". Journal of Magnetism and Magnetic Materials 374 (2015) 283–288
- [16] G.V. Stepanov, D.A. Semerenko, A.V. Bakhtiarov, P.A. Storozhenko. "Magnetoresistive Effect in Magnetoactive Elastomers". J Supercond Nov Magn (2013) 26:1055–1059
- [17] I. Bica. "The influence of hydrostatic pressure and transverse magnetic field on the electric conductivity of the magnetorheological elastomers". Journal of Industrial and Engineering Chemistry 18 (2012) 483–486
- [18] Ioan Bica, Eugen M. Anitas, Madalin Bunoiu, Boris Vatzulik, Iulius Juganaru. "Hybrid magnetorheological elastomer: Influence of magnetic field and compression pressure on its electrical conductivity". Journal of Industrial and Engineering Chemistry 52 (25), pp 8445–8453

[19] Shunta Kashima, Fumikazu Miyasaka, and Katsuhiro Hirata. "Novel Soft Actuator Using Magnetorheological Elastomer". IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 48, NO. 4, APRIL 2012

[20] I. Bica , E.M. Anitas, L.M.E. Averis. "Influence of magnetic field on dispersion and dissipation of electric field of low and medium frequencies in hybrid magnetorheological suspensions". Journal of Industrial and Engineering Chemistry 27 (2015) 334–340

[21] Русакова Т.С., Макарова Л.А. "Исследование температурной, релаксационной и деформационной зависимости электрических свойств магнитных эластомеров". Тезисы докладов XXIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам "Ломоносов-2016", секция "Физика"

[22] X.Wang, F.Gordaninejad, M.Calgar, Y.Liu, J.Sutrisno, A.Fuchs. "Sensing Behavior of Magnetorheological Elastomers". Journal of Mechanical Design, SEPTEMBER 2009, Vol. 131 / 091004-1

[23] J. L. Mietta, P. I. Tamborenea and R. Martin Negri. "Anisotropic Magnetoresistivity in Structured Elastomer Composites: modelling and experiments". Soft Matter, 2016,12, 6430-644

[24] Русакова Т.С. "Исследование температурной зависимости электрических свойств магнитных эластомеров". <http://magn.ru/diploma/2016/rusakova.pdf>