

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук Кострова Сергея Александровича
на тему: «Создание низкомодульных магнитоактивных
полимерных материалов и изучение их вязкоупругих свойств во
внешних магнитных полях»
по специальности 1.4.7. - Высокомолекулярные соединения

Диссертационная работа Кострова С.А. посвящена получению магнитоактивных полимерных материалов с высоким откликом на внешние магнитные поля и детальному исследованию общих закономерностей взаимосвязи состав-структура-свойства для данных композитов.

Актуальность выбранной темы определяется широким кругом применений данных материалов; их целенаправленный синтез требует выявления фундаментальных основ наблюдаемых явлений. Последнее является нетривиальной задачей прежде всего из-за большого количества параметров, влияющих на свойства композитов, и наличием магнитомеханического сцепления.

Новизна данных, представленных в диссертации, не вызывает сомнений. Предложенный способ получения низкомодульных композитов с использованием прививки боковых цепей позволяет получать материалы, модуль упругости которых растет в магнитном поле на три (!) порядка, что является впечатляющим показателем, сравнимым с лучшими результатами мирового уровня, которые традиционно достигаются за счет использования пластификаторов. Сравнение магнитореологических свойств низкомодульных изотропных и анизотропных магнитоактивных полимерных материалов слабо изучено в литературе, а влияние формы магнитных частиц на магнитореологические свойства и вовсе до сих пор не изучалось. Наконец исследования в области магнитоактивных термопластичных эластомеров представлены впервые вместе с описанием возможности многократного изменения структуры распределения магнитного наполнителя внутри полимерной среды. Полученные результаты открывают пути для управления

свойствами материала в процессе его эксплуатации, что говорит о **высокой практической значимости** полученных в диссертационной работе результатов.

Структура работы представляет собой введение и 5 основных глав, включая литературный обзор, описание методологии исследования и 3 главы с экспериментальными результатами.

Во **введении** обоснована актуальность и новизна работы, сформулирована цель работы и поставлены задачи для ее достижения, а также описана теоретическая значимость работы.

В **Главе 1** представлен литературный обзор, в котором подробно описаны явления, возникающие в образцах при приложении внешнего магнитного поля, дано их объяснение и возможные области применения. Приведено описание влияния различных параметров композита на его свойства, подчеркнуты слабо изученные области и сложности экспериментальных и теоретических подходов выполненного исследования, из чего ясно следует актуальность и значимость полученных автором результатов. Отдельный раздел обзора литературы посвящен магнитореологическому эффекту и влиянию на него анизотропии распределения магнитного наполнителя в композите. Литературный обзор составлен логично, из него следуют поставленные в диссертации задачи, и автор продемонстрировал хорошее знание современного состояния исследуемой темы.

В **Главе 2** представлено краткое описание синтеза магнитополимерных композитов, используемых для этого материалов и методик характеристики свойств полученных композитов. Приведены характеристики используемых магнитных наполнителей и полимеров, используемых при синтезе материалов. Подробно описана методика измерения вязкоупругих свойств в различных магнитных полях.

Глава 3 диссертации посвящена созданию низкомолекулярных магнитоактивных эластомеров без использования низкомолекулярного масла в

качестве пластификатора. Очевидное преимущество такого подхода состоит в повышении стабильности полученных материалов, так как масло (используемое в традиционных рецептурах) может вытекать из композита, что существенно меняет его свойств. Глава содержит два раздела, в которых предложены методы синтеза низкомодульных материалов: первый раздел посвящен полимерным сеткам с боковыми цепями, прикрепленными к точкам ветвления сетки, а второй раздел полимерным сеткам на основе гребнеобразных сополимеров с плотной прививкой боковых цепей (молекулярным щеткам). Такой подход позволяет создавать материалы с низким модулем упругости около 1 кПа. Полученные полимерные матрицы затем были наполнены магнитными частицами. Автор последовательно описывает результаты исследования вязкоупругих свойств материалов в различных магнитных полях: зависимости модулей упругости от частоты деформации, амплитуды деформации, а также отклик композитов на последовательное увеличение и уменьшение магнитного поля. Описанные в этой главе материалы демонстрируют очень высокий отклик на магнитное поле: модуль упругости исходного материала составляет величины порядка единиц кПа и превосходит МПа при включении магнитного поля величиной 1 Тл. Для современной литературы такая величина магнитного отклика считается колоссальной. Кроме того, автор продемонстрировал возможность управления свойствами материала в широких пределах за счет варьирования структурных параметров полимерной сетки. Важно отметить, что магнитные эластомеры на основе молекулярных щеток способны имитировать механические свойства биологических тканей.

Глава 4 посвящена изучению влияния формы и пространственного распределения магнитных частиц на свойства полученных материалов. Автор приводит сравнение вязкоупругих свойств композитов с изотропным и анизотропным распределением магнитных частиц внутри полимерной среды в зависимости от величины внешнего магнитного поля. В качестве еще одного изучаемого параметра добавлена форма магнитных частиц. Дается описание

синтеза; распределение магнитных частиц в композите контролируется с помощью метода сканирующей электронной микроскопии. Далее приводятся исследования механических свойств материала в различных магнитных полях в зависимости от частоты и амплитуды деформации.

Важный результат этой главы – упрочнение композита при формировании ориентированных структур из магнитного наполнителя. Отметить нужно и вывод о примерном равенстве относительного магнитного отклика изотропных и анизотропных материалов. Особого внимания заслуживает приведенное автором сравнение магнитореологического эффекта композитов со сферическим и пластинчатым магнитным наполнителем. При низких концентрациях магнитного наполнителя для достижения высокого магнитного отклика предлагается использовать пластинчатые магнитные частицы, а при высоких концентрациях – сферические. Этот результат описан автором впервые. Широкий диапазон концентраций магнитного наполнителя, который изучен в данной главе, свидетельствует о большой синтетической работе, проделанной автором.

В **Главе 5** представлены магнитоактивные полимерные материалы на основе гребнеобразных сополимеров (молекулярных щеток). Полимерная матрица представляет собой термопластичный эластомер и способна обратимо переходить в жидкое состояние при повышенной температуре. Автор показал, что термочувствительность полимерной матрицы может быть использована для управления ориентацией распределения магнитного наполнителя за счет плавления/охлаждения материала в присутствии магнитного поля. Также было продемонстрировано, что управлять можно не только направлением, но и степенью ориентации магнитного наполнителя за счет изменения температуры обработки материала. В результате можно получить материал со свойствами, которые можно управляемо регулировать в широком диапазоне, «подстраивая» их в ходе эксплуатации, а не только на стадии синтеза, как это происходит в традиционных системах.

Все экспериментальные результаты понятно изложены и представлены в четкой последовательности, наблюдаемые явления и закономерности находят свое объяснение.

Надежность и достоверность результатов диссертационной работы, а также научная обоснованность сделанных выводов обусловлены использованием комплекса взаимодополняющих методов исследования, воспроизводимостью и непротиворечивостью данных и основаны на современных научных представлениях в области магнитоактивных полимерных материалов.

Автореферат отражает содержание диссертации.

По материалам диссертации опубликовано 17 работ, из которых 6 статей в рецензируемых журналах, индексируемых в российских и международных базах данных (Web of Science, Scopus, РИНЦ), 3 статьи входят в журналы первого квартиля согласно SJR, а также тезисы 11 докладов в сборниках трудов конференций.

Рецензируемая работа является экспериментальной и включает синтез материалов с контролируемыми параметрами и изучение вязкоупругих свойств полученных материалов в различных магнитных полях, что является основной целью работы. Автор проанализировал и подробно описал влияние различных факторов – модуля упругости полимерной среды, ее химической природы, концентрации магнитных частиц, их формы и профиля распределения частиц внутри полимерной среды на поведение композитных материалов: Отдельного упоминания заслуживает исследование магнитореологического эффекта композитов на основе пластинчатых магнитных частиц и изучение свойств термопластичных магнитных композитов.

Принципиальных замечаний по диссертации нет. Есть несколько комментариев, которые можно отнести к разряду пожеланий.

1. В разделе «Положения, выносимые на защиту» упоминаются «подходы» к получению магнитоактивных полимерных материалов и

управлению их свойствами. На самом деле в диссертации описаны не «подходы», а вполне конкретные способы получения и управления свойствами полимерных материалов. Поэтому осторожный термин «подход» нельзя признать удачным для описания существа проделанной автором работы.

2. Свойства полимерных композитов являются прямым следствием их строения, которое, в свою очередь, определяется способом синтеза композиционных материалов. В работе следовало привести подробное описание синтеза, очистки и выделения композитов, а не ограничиваться ссылкой на статьи, в которых эти синтезы описаны.

3. Было бы полезно привести количественную оценку «выпотевания» низкомолекулярных компонентов из полимерной матрицы на основе полисилаксана и сравнить этот показатель для систем с добавлением низкомолекулярного масла.

4. На рисунке 21 диссертации приведены результаты исследования механических свойств эластомеров на основе гребнеобразных сополимеров со встроенными магнитными частицами. Эти интересные результаты стоило обсудить более подробно, не ограничиваясь ссылкой на статью, где они опубликованы, и подчеркнуть роль магнитных частиц в наблюдаемых автором эффектах.

Высказанные замечания не снижают ценности работы. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.4.7. – Высокомолекулярные соединения (по физико-математическим наукам), и **полностью отвечает требованиям**, установленным в пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, Костров Сергей Александрович *заслуживает* присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.4.7. – Высокомолекулярные соединения.

Официальный оппонент:

Член-корреспондент РАН, профессор, доктор химических наук, заведующий кафедрой высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

ЯРОСЛАВОВ Александр Анатольевич

«30» 09 2024 г.

Контактные данные:

Тел.: +7(495)939-55-83

E-mail: yaroslav@belozersky.msu.ru

Шифр и наименование специальности, по которой официальным оппонентом была защищена диссертация: 02.00.06 - Высокомолекулярные соединения.

Адрес места работы: 119234 Москва, Ленинские горы, 1-3, кафедра высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Тел.: +7 (495) 939-35-71; e-mail: dekanat@chem.msu.ru