


«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Российский химико-технологический
университет имени Д.И. Менделеева»




_____ д.х.н., проф. Филатов С.Н.

«25» 03 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Черемных Анны Игоревны **«Надмолекулярная организация и термомеханические свойства магнитоактивируемых композиционных материалов с эффектом памяти формы на основе полилактида для биомедицинских применений»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Актуальность работы.

Диссертационная работа посвящена актуальной научно-практической задаче разработки и исследования функциональных полимерных композиционных материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) на основе полилактида (ПЛА) для применения в регенеративной медицине и малоинвазивной хирургии. В условиях роста требований к имплантируемым системам особую значимость приобретают «умные» биорезорбируемые материалы, способные программируемо изменять форму под действием внешних стимулов (температуры, магнитного поля и т.д.) и функционировать в диапазоне температур, близком к физиологическому. В этом контексте исследование механизмов реализации ЭПФ в композиционных системах на основе ПЛА с добавлением полиэтиленгликоля (ПЭГ) и магнитных наночастиц феррита кобальта (ФК), а также поиск путей снижения температуры активации

эффекта памяти формы при сохранении достаточного уровня реактивных напряжений и степени восстановления формы представляются важной фундаментальной и прикладной задачей, находящейся на стыке физики конденсированного состояния, химии и технологии полимеров.

Научная новизна исследования работы Черемных А.И. заключается в получении комплекса новых теоретических и экспериментальных результатов, существенно расширяющих представления о механизмах эффекта памяти формы в биоразлагаемых полимерных композиционных материалах на основе ПЛА. В диссертации:

1. Установлены закономерности влияния состава (содержаний полиэтиленгликоля и наночастиц феррита кобальта), метода формирования (литьё из раствора, экструзия) и условий термомеханической обработки на надмолекулярную организацию (степень кристалличности, тип морфологии) и параметры эффекта памяти формы (температура активации, реактивные напряжения, степень восстановления формы) в композиционных материалах ПЛА/ФК и ПЛА/ПЭГ/ФК.

2. Впервые построена диаграмма (пространство) структурных состояний в координатах «концентрация наполнителя – степень кристалличности», позволяющая выделить области существования различных типов надмолекулярной структуры и увязать их с характеристиками эффекта памяти формы, что создаёт основу для целенаправленного проектирования композиционных материалов с заданными параметрами ЭПФ.

3. Показано, что в экструдированных композиционных материалах с преимущественно аморфной структурой и литых образцах со сферолитной морфологией реализуются различные микромеханизмы деформации и восстановления (кавитация и вязкоупругая деформация аморфной фазы; крейзинг и «схлопывание» дефектов в окрестности кристаллитов), определяющие особенности эффекта памяти формы.

4. Определены оптимальные диапазоны содержаний ПЭГ и наночастиц феррита кобальта, обеспечивающие снижение температуры активации эффекта памяти формы до области, близкой к физиологической (порядка 40–50 °С), при сохранении высокой степени восстановления формы и приемлемых реактивных напряжений.

5. Продемонстрирована возможность дистанционной активации эффекта памяти формы в композиционных материалах на основе ПЛА за счёт нагрева наночастиц феррита кобальта в высокочастотном переменном магнитном поле,

включая условия контакта с биотканями, что открывает перспективы применения таких систем в малоинвазивных медицинских устройствах.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке новых композиционных материалов на основе полилактида с программируемыми параметрами эффекта памяти формы, ориентированных на использование при создании самопозиционирующихся и самофиксирующихся имплантируемых систем. Автором получены конкретные диапазоны концентраций ПЭГ и наночастиц феррита кобальта, обеспечивающих необходимые значения температуры активации ЭПФ, величины реактивных напряжений и степени восстановления формы, что важно при проектировании биорезорбируемых конструкций для регенеративной медицины и малоинвазивной хирургии.

Экспериментальная демонстрация работоспособности композиционного материала в форме кольцевидной клипсы, восстанавливающей исходную конфигурацию при воздействии высокочастотного переменного магнитного поля в присутствии тканей тонкого кишечника лабораторных животных, подтверждает возможность практической реализации разработанных материалов в составе модельных медицинских устройств. Результаты *in vitro* испытаний (оценка цитотоксичности и гемотоксичности) свидетельствуют об отсутствии выраженного токсического действия при выбранных концентрациях наночастиц феррита кобальта, что является необходимым условием для их дальнейшей клинической апробации. Полученные материалы и методологические подходы могут быть использованы в исследованиях и разработках профильных научных и медицинских центров при создании биорезорбируемых имплантатов и «умных» полимерных конструкций.

Материалы и методологические подходы имеют потенциал для практического внедрения в научно-исследовательской и клинической деятельности профильных учреждений, например, для разработки адаптивных имплантируемых устройств совместно с ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России (ЭДиТО) или для создания ортопедических конструкций и умных имплантатов в травматологии совместно с ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова» Минздрава России.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждаются корректной постановкой цели и задач, выбором адекватного комплекса методов исследования и использованием современного оборудования для анализа структуры и свойств материалов (ДСК, ДМА, РФА, электронная микроскопия и др.). Экспериментальные данные приведены для серий образцов с различным составом и историей формирования, что позволяет выявлять

устойчивые закономерности. Согласованность результатов, полученных различными методами, и их соответствие современным представлениям о поведении полимерных композитов с эффектом памяти формы свидетельствуют о высокой степени достоверности выводов. Значительная часть результатов опубликована в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных, и апробирована на российских и международных конференциях, что также подтверждает их научную состоятельность.

Оценка содержания диссертации. Диссертация изложена на 152 страницах и включает введение, шесть глав, выводы и список литературы из 193 источников, содержит 13 таблиц и 74 рисунка, наглядно иллюстрирующих полученные результаты.

В первой главе представлен развёрнутый аналитический обзор литературы по полимерам с эффектом памяти формы, композиционным материалам на основе ПЛА и их биомедицинским приложениям, демонстрирующий глубокое владение автором предметной областью. Во второй главе описаны исходные материалы, методы получения композиционных систем (литьё из раствора, экструзия), а также применённый комплекс экспериментальных методик изучения структуры и термомеханических свойств. В третьей и четвёртой главах рассмотрено влияние условий формирования и содержания наночастиц феррита кобальта на надмолекулярную структуру, теплофизические и термомеханические характеристики композиционных материалов ПЛА/ФК, а также особенности реализации эффекта памяти формы в материалах с различной надмолекулярной организацией.

Пятая глава посвящена изучению роли пластифицирующего компонента (ПЭГ) и совместного введения ПЭГ и НЧ ФК в трёхкомпонентные системы ПЛА/ПЭГ/ФК, построению пространства структурных состояний и выделению оптимальных областей составов с точки зрения параметров эффекта памяти формы. В шестой главе представлены результаты исследований реализации эффекта памяти формы под действием высокочастотного переменного магнитного поля и оценка аспектов биосовместимости материалов *in vitro*, что замыкает логическую цепочку «состав – структура – свойства – функциональное поведение в условиях, приближённых к реальным биомедицинским приложениям». Материал изложен последовательно и в целом соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

По объектам, методам исследования и характеру сформулированных выводов, диссертация Черемных А.И. соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния в направлении

исследования: 1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.

Результаты, изложенные в диссертационной работе, представляют интерес для учебно-методической, научно-исследовательской и проектной деятельности следующих организаций: НИИ ЭДиТО ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, ООО «Ветеринарный онкологический научный центр», ФГБУН Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук, ФГБУН Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук, ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева», а также других профильных учреждений.

Основные результаты диссертационной работы Черемных А.И. опубликованы в 7 статьях в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, 2 статьях в изданиях ВАК, а также представлены на многочисленных российских и международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

1. Автором предложена оригинальная структурная диаграмма в координатах «концентрация наполнителя – степень кристалличности», однако на диаграмме не отражена информация о температуре стеклования и температуре активации ЭПФ, которые являются ключевыми для практического применения. Было бы информативно представить трехмерную диаграмму или серию диаграмм с нанесением изолиний этих параметров.
2. В главе 6 представлены убедительные данные по дистанционной активации ЭПФ в магнитном поле, однако эксперименты проводились в незамкнутом объеме с постоянным отводом тепла. Для оценки перспектив применения *in vivo* следовало бы смоделировать условия, приближенные к физиологическим (наличие кровотока, окружающих тканей), и оценить, достигается ли при этом необходимая для активации температура.
3. В работе исследовано влияние степени деформации (50, 75, 100%) на параметры ЭПФ трехкомпонентной системы, однако не обсуждается вопрос о предельно достижимых обратимых деформациях и о том, существует ли верхний порог деформации, после которого восстановление становится невозможным из-за необратимого разрушения структуры.

Приведенные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой научной ценности диссертационного исследования.

Заключение

По совокупности полученных результатов и уровню их обоснования диссертация Черемных Анны Игоревны является самостоятельным научным исследованием, в котором решена важная научно-практическая задача разработки и изучения магнитоактивируемых композиционных материалов с эффектом памяти формы на основе полилактида для биомедицинских применений. Актуальность, достоверность и новизна научных положений, сформулированные выводы и практические рекомендации, а также их отражение в публикациях и докладах позволяют сделать вывод о соответствии диссертации требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней в НИТУ «МИСИС» и практики проведения защит кандидатов наук.

Диссертация «Надмолекулярная организация и термомеханические свойства магнитоактивируемых композиционных материалов с эффектом памяти формы на основе полилактида для биомедицинских применений» является законченной научно-квалификационной работой, а её автор – Черемных Анна Игоревна – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Отзыв о диссертационной работе обсужден и утвержден на заседании кафедры биоматериалов ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (протокол № 5 от 25.03.2026 г.)

д.х.н., доцент, заведующий
кафедрой биоматериалов
РХТУ им. Д.И. Менделеева

Межуев Ярослав Олегович

Подпись Межуева Я.О.

у д о с т о в е р я ю

Ученый секретарь

РХТУ им. Д.И. Менделеева

д.т.н., профессор



Макаров Николай Александрович