

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБРНАУКИ РОССИИ)**
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова» (КБГУ)**

Ул. Чернышевского, 173, Нальчик, КБР, 360004. Тел./факс (8-8662) 42-52-54
E-mail: yka@kbsu.ru ОКПО 02069510, ОГРН 1020700739234, ИНН 0711037537, КПП 072501001

21.11.2025 № 0101-20/8413
На № _____ от _____

«Утверждаю»

Проректор по НИР КБГУ

Ю. Хашипов

«17» ноября 2025 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова на диссертационную работу Семенухи Оксаны Викторовны, выполненную на тему «Разработка и исследование тензочувствительных композитов на основе полидиметилсилоксана, модифицированного углеродными наноструктурами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.11. – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов.

Актуальность диссертационной работы

Диссертация Семенухи О.В. представляет важность для развития современных технологий для создания тензочувствительных композитов, модифицированных углеродными наноструктурами и применяемых в качестве сенсоров систем для мониторинга состояния конструкций в электротехнической и транспортной областях.

Создание высокотехнологичной продукции на основе новых материалов является приоритетом, указанным в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. В первую очередь такая продукция востребована в аэрокосмических, транспортных, электротехнических и медицинских видах техники, где существует множество трансформируемых конструкций и элементов. Для определения геометрических характеристик и мониторинга состояния трансформируемых конструкций используют сенсорные системы с тензочувствительными материалами. Традиционные тензорезисторы для мониторинга, которые изготавливаются из металлической фольги и полупроводников различного типа, из-за ограниченной способности к растяжению могут регистрировать только малые деформации (~5%). Однако многие конструкции в процессе эксплуатации претерпевают более значительные деформации. При этом наиболее характерными деформациями для трансформируемых конструкций являются растяжение, сжатие и изгиб. Использование в качестве тензочувствительных элементов полимерных композиционных материалов (ПКМ) имеет ряд преимуществ перед традиционными: они оказывают минимальное воздействие на конструкцию, способны к значительным растяжениям и обеспечивают широкий диапазон рабочих температур. Одним из эффективных материалов для изготовления ПКМ является полидиметилсилоксан (ПДМС), который обеспечивает им высокую эластичность, инертность к агрессивным воздействиям окружающей среды и работоспособность в широком диапазоне температур. Модификация ПДМС электропроводящими углеродными наноструктурами обеспечивает появление функционального свойства полимерных композитов – тензочувствительности – вследствие формирования проводящих структур внутри полимерной матрицы.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Выявлены и количественно описаны взаимосвязи между способами диспергирования углеродных наноструктур в ПДМС и изменением электропроводности композитов. Установлено, что применение двухстадийного способа диспергирования для изготовления композита на основе ПДМС,

модифицированного углеродными наноструктурами, обеспечивает увеличение электропроводности материала в 7 раз.

2. Установлены закономерности влияния исходных (ОУНТ, МУНТ, Matrix) и гибридных углеродных наноструктур (графен/ОУНТ, графен/МУНТ) на электропроводящие свойства композита, полученного двухстадийным способом.

3. Установлены закономерности влияния углеродных наноструктур различного типа на электропроводящие, реологические, механические, тензочувствительные свойства композита на основе ПДМС.

Теоретическая значимость работы состоит

- в расширении знаний о влиянии способов диспергирования углеродных наноструктур в полимере на электропроводящие свойства ПКМ на основе ПДМС;

- в расширении знаний о взаимосвязи структуры углеродных наполнителей и тензочувствительных свойств разработанного ПКМ на основе ПДМС и углеродных наноструктур в режимах изгибающих напряжений и циклической деформации «нагружение-разгружение».

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что впервые разработан гибкий наноконпозиционный материал на основе ПДМС со значением коэффициента тензочувствительности для эксплуатации при комнатной температуре:

- в режиме циклической деформации «нагружение-разгружение» на 25% около 0,4 и 1,0 для ОУНТ и МУНТ, соответственно;

- в режиме циклической деформации «нагружение-разгружение» на 25% около 1,0 и 0,7 для графен/ОУНТ и графен/МУНТ, соответственно;

- в режиме изгибающих напряжений около 2 для ОУНТ в виде мастербатча.

Разработанный двухстадийный способ диспергирования углеродных наноструктур перспективен для использования при создании композитов на основе полимерных матриц с аналогичными реологическими свойствами.

В результате физической модификации получены гибридные углеродные наноструктуры для изготовления электропроводящих и тензочувствительных композитов.

Разработанные методики определения коэффициента тензочувствительности в режимах циклической деформации «нагружение-разгружение» при больших упругих деформациях и изгибающих напряжений расширяют возможности оценки функциональных свойств композитов при их эксплуатации.

Техническая новизна подтверждена патентом Российской Федерации № 2810692 от 28.12.2023 на изобретение «Тензочувствительный силиконовый сенсор и способ его крепления» и свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682354 Российской Федерации «Разработка цифровой сенсорной системы для мониторинга предотказного состояния рельсовых плетей с использованием наномодифицированных композиционных материалов».

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления композитов на основе ПДМС, модифицированных углеродными наноструктурами, с требуемыми функциональными свойствами.

Разработанный материал в качестве тензочувствительного элемента цифровой сенсорной системы для мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций прошел промышленные испытания в Красноярском отделении ОАО «РЖД». Результаты диссертационной работы прошли промышленную апробацию на АО «РЕШЕТНЁВ».

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе подготовки студентов института химических технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева по направлению 18.04.01 Химическая технология профиль «Инжиниринг полимерных материалов» (дисциплина «Перспективные материалы»).

Методология и методы исследований. Научная методология исследований основана на базовых знаниях закономерностей изменения свойств ПКМ. Исследования углеродных наноструктур проводили с использованием просвечивающего электронного микроскопа HT7700 (Hitachi Ltd, Япония) и спектрометра комбинационного рассеяния (КР) света T64000 Horiba Jobin Yvon (Франция). Для измерения SBET гибридного наполнителя использован анализатор

газовой сорбции ASAP-2420 (Micromeritics, США). Визуализация морфологических особенностей нанокompозита проведена с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) SEM S-5500 (Hitachi Ltd, Япония). Оценку реологических свойств наполненной полимерной матрицы проводили с использованием ротационного реометра DHR-2 (TA Instruments, США).

Одновременное определение тензорезистивных и упруго-деформационных свойств ПКМ проводили на универсальной испытательной машине (Eurotest T-50, Испания) с применением оригинального диэлектрического крепления для циклического нагружения «растяжение-сжатие» и регистрации сигнала цифровым мультиметром HANTEK 365 (КНР).

Представлено описание разработанного метода определения тензорезистивных свойств композита при изгибающих напряжениях на цилиндрическом стержне при разовом и циклическом деформировании. Собрана установка для фиксации изгиба вокруг цилиндрического стержня на основе прибора «Константа-ИЦ» (Россия) и цифрового мультиметра HANTEK 365 (КНР).

Испытания адгезионной прочности слоёв упрочненного гибкого тензочувствительного нанокompозита на сдвиг проводили на универсальной испытательной машине Eurotest T-50 (Испания).

Полученные данные подвергались статистической обработке методом наименьших квадратов.

Использование вышеперечисленных методов исследования позволяет в полном объёме характеризовать структуру и свойства нанокompозитов.

Личный вклад автора

В диссертации все исследования получены автором лично или при его непосредственном руководстве и участии. Цели и задачи работы определены совместно с научным руководителем. Автору принадлежит ключевая роль в выборе методов исследования, описании и интерпретации представленных результатов, формулировке выводов. Результаты, представленные в диссертации, докладывались автором лично.

Достоверность результатов работы обеспечена применением современных методов анализа и стандартизованных методик измерения механических свойств

материала. При выполнении диссертационной работы использовано аналитическое оборудование ресурсного центра коллективного пользования «Космические аппараты и системы».

Публикации. По результатам исследований опубликованы 29 печатных научных работ, в т. ч. 3 – в изданиях из перечня ВАК, 2 – в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus, 2 – патента РФ на изобретение, 1 – свидетельство на программу для ЭВМ.

Основное содержание и общая характеристика диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 169 наименований и содержит 121 страницу, 36 рисунков, 7 таблиц.

Во введении отражена актуальность проведенных исследований, обозначены цель и задачи, научная новизна и практическая значимость диссертации.

В первой главе приведен обзор научной, технической и патентной литературы в области электропроводящих и тензочувствительных свойств композитов с углеродными наноструктурами.

Во второй главе описаны объекты и методы исследований. В качестве полимерной матрицы был выбран ПДМС (Германия). В качестве углеродных наноструктур выбраны одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) и мастербатч Matrix на их основе 7 производства компании «OCSiAl» (Россия), многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) и графен производства ООО «НаноТехЦентр» (Россия) для создания ПКМ с регулируемыми механическими, электропроводящими и тензочувствительными свойствами.

В третьей главе описаны физической модификации и технологии получения гибридных углеродных наноструктур на основе графена и УНТ и исследованию их характеристик. УНТ, обладающие высоким аспектным соотношением, формируют линейные проводящие пути в полимере, в свою очередь, графен благодаря двумерной структуре обеспечивает плоскостной перенос электрического заряда. Сочетание УНТ и графена приводит к образованию эффективной проводящей сети, когда графеновые нанопластинки выступают в качестве диспергатора между зонами агрегации УНТ благодаря их двумерной геометрии, которая, в свою очередь, обеспечивает лучшее формирование проводящих путей внутри матрицы.

Добавление графена в состав гибридных углеродных наноструктур позволит снизить склонность МУНТ и ОУНТ к агломерации при добавлении в ПДМС. При этом исходные углеродные наноструктуры МУНТ и ОУНТ с учетом их достаточно высокой S_{BET} будут обладать склонностью к агломерированию в полимере.

В четвертой главе подробно описаны технологии получения и функциональные свойства ПКМ. Для диспергирования углеродных наноструктур в полимерной матрице были применены 3 способа диспергирования: одностадийный механический, одностадийный ультразвуковой и двухстадийный, включающий механическое и ультразвуковое перемешивание. Эффективность способа диспергирования наполнителя в ПДМС была оценена с помощью значения удельного объемного электросопротивления ρ_v

В пятой главе представлено исследование тензочувствительных и физико-механических свойств ПКМ. При растяжении ρ_v материала сенсора претерпевает изменение так называемый тензорезистивный эффект, поэтому такой композит обладает тензочувствительными свойствами.

В приложениях к диссертации содержатся результаты использования диссертационной работы в НИР крупных предприятий Российской Федерации, например, транспортной компании ОАО "РЖД" и др.

Положения исследования, выносимые на защиту, и выводы диссертации обоснованы, согласованы, логически следуют из полученных результатов экспериментальных исследований не противоречат современным научным представлениям в области технологии переработки полимеров.

Диссертация написана логично, научным языком. Автореферат и основные публикации полностью отражают содержание и основные положения диссертационного исследования. В то же время, при анализе диссертации возникает ряд вопросов и технических замечаний.

Вопросы и замечания по работе

По представленной диссертационной работе и автореферату имеются следующие вопросы:

1. Для создания гибридных наполнителей были выбраны гибриды, состоящие из графена и углеродных нанотрубок различного типа. В диссертационной работе

получены данные о тензочувствительных свойствах композитов с гибридными наполнителями. В этой связи представляется оценить влияние исходного графена на тензочувствительные свойства композита.

2. Почему для модификации полидиметилсилоксана углеродными наноструктурами была выбрана концентрация, равная 1 масс. %?

3. В диссертационной работе отмечена гибкость, как преимущество полидиметилсилоксана для создания тензочувствительных композитов. Однако полиуретаны также являются гибкими. Почему в качестве полимерной матрицы был выбран именно полидиметилсилоксан?

4. Для повышения адгезии полимера к УНТ, автору желательно было провести активацию поверхности нанотрубок (например, термическим отжигом, химической обработкой сильными минеральными кислотами, или другими методами) с формированием полярных, кислородсодержащих, функциональных групп.

Высказанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы и её научно-практическую значимость.

Заключение

Диссертационная работа Семенухи Оксаны Викторовны «Разработка и исследование тензочувствительных композитов на основе полидиметилсилоксана, модифицированного углеродными наноструктурами» выполнена на высоком научном уровне, а полученные результаты свидетельствуют о личном вкладе автора в выбранное направление научных исследований.

Диссертационная работа по актуальности, научной новизне, объему и обоснованности научных результатов отвечает всем требованиям ВАК Минобрнауки России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Работа соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. (с изменениями и дополнениями), является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технологические разработки по получению тензочувствительных нанокомпозитов, создающие основу технологического суверенитета страны и имеющие существенное значение для развития полимерного

материаловедения Российской Федерации. Автор диссертации, Семенуха Оксана Викторовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.11. – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании семинара Центра прогрессивных материалов и аддитивных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» (протокол № 28 от 14.11.2025 г.)

Беев Ауес Ахмедович

Доктор химических наук, профессор (1.4.7-Высокомолекулярные соединения) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова».

Почтовый и юридический адрес:

360004, Кабардино-Балкарская Республика

г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Тел.: +7 996 917-79-60

E-mail: difenol@mail.ru



Беев А.А.

«17» ноября 2025 г.

Ученый секретарь

Кабардино-Балкарского государственного
университета им. Х.М. Бербекова,

Доктор филологических наук



И.В. Ашинова