

В диссертационный совет 24.2.385.01,  
созданный на базе ФГБОУ ВО  
«Санкт-Петербургский  
государственный университет  
промышленных технологий и дизайна»  
191186, Санкт-Петербург, ул. Большая  
Морская, д. 18

## ОТЗЫВ

на автореферат Семенухи Оксаны Викторовны «Разработка и исследование тензочувствительных композитов на основе полидиметилсилоксана, модифицированного углеродными наноструктурами», предоставленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.11. – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов

Разработка полимерных композитов с сенсорными свойствами для мониторинга конструкций приобретает **высокую актуальность** в таких критически важных сферах, как авиастроение, космонавтика, энергетика и гражданская инфраструктура, где требуется непрерывный контроль целостности и состояния узлов, работающих в условиях высоких механических нагрузок и перепадов температур. В диссертационной работе Семенухи О.В. отражены результаты по разработке и исследованию полимерного композита на основе полидиметилсилоксана, обладающего тензочувствительными свойствами.

**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 нанокомпозиционный 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-разгрузение» при больших упругих деформациях и изгибающих напряжений расширяют возможности оценки функциональных свойств композитов при их эксплуатации.

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»).

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».

**Методология и методы исследований.** Научная методология исследований основана на базовых знаниях закономерностей изменения свойств ПКМ. Исследования углеродныхnanoструктур 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 нанокомпозита 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 нанокомпозита 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 нанокомпозитов.

#### 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 диссертационное 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 нанопластиинки 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 SBET 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  $\rho_v$

В пятой главе представлено исследование тензочувствительных и физико-механических свойств ПКМ. При растяжении  $\rho_v$  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.

**По автореферату имеется следующее замечание:**

1. Пункт заключения № 5 не описан в тексте автореферата. «Оригинальность методик и определения коэффициента тензочувствительности нанокомпозитов в режиме циклической деформации «нагружение-разгружение» заключается в специальном зажимном

креплении, которые были напечатаны на 3D-принтере из пластика PETG и выступали в качестве диэлектрика.» Из-за отсутствия описания специального зажимном крепления не понятно в чем оригинальность методики.

2. Пункт заключения № 7 не описан в тексте автореферата. «Впервые изготовлены элементы на основе разработанных материалов на основе ПДМС.» Не описано какие именно элементы изготовлены.

3. В списке опубликованных работ автор указывает, что в рамках диссертационной работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В тексте автореферата нет информации о разработанной программе.

4. В третьем абзаце имеются грамматические ошибки «...они оказывает минимальное...». Должно быть множественное число «оказывают».

## **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.

\*Я, Мирошниченко Денис Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных в документах, связанных с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку

Кандидат технических наук,

Старший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Центр компетенций текстильной и легкой промышленности» ФГБОУ ВО «ИВГПУ»

Мирошниченко Денис Александрович

«1» декабря 2025 г.

Контактная информация:

Адрес: Россия, 153000, Ивановская область, г. Иваново, Шереметевский проспект, д. 21

Телефон: 8-930-344-16-76

E-mail: tlp\_pti@ivgpu.ru

Подпись Д.А. Мирошниченко заверяю:

Ученый секретарь

«1» декабря 2025 г.