

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

**ИННОВАЦИОННЫЕ  
НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НАУКИ  
О ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ  
И КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛАХ**

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**  
V Международной научной конференции

Санкт-Петербург  
2024

**УДК 678:001.895(063)**

**ББК 35.71:30.36я43**

**И66**

**И66**      Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах: тезисы докл. V - Международной научной конференции / Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. – Санкт-Петербург: ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2024. – 122 с.

**ISBN 978-5-7937-2639-9**

Международная научная конференция с 09.12.2024 г. по 10.12.2024 г.

Оргкомитет:

Макаров А. Г. – д-р техн. наук, профессор, председатель

Вагнер В. И. – канд. техн. наук, доцент, куратор конференции

Жукова Л. Т. – д-р техн. наук, профессор

Иванов К. Г. – д-р. физико-мат. наук, профессор

Иванов О. М. – д-р техн. наук, профессор

Иванова С. Ю. – канд. техн. наук, доцент

Киселев А. М. – д-р техн. наук, профессор

Максимов. В. В. – д-р техн. наук, профессор

Переборова Н. В. – д-р. техн. наук, доцент

Рожков Н. Н. – д-р техн. наук, профессор

Сашина Е. С. – д-р хим. наук, профессор

*Конференция финансировалась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.*

**УДК 678:001.895(063)**

**ББК 35.71:30.36я43**

**ISBN 978-5-7937-2639-9**

©ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>М.А. Бакаева, Е.С. Сашина</i> ИНКАПСУЛИРОВАНИЕ ТЕРМОХРОМНЫХ ЛЕЙКОКРАСИТЕЛЕЙ В ОБОЛОЧКУ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	10
<i>Ю.И. Марущак, Н.Н. Ясинская</i> ПРОРУБАЕМОСТЬ ТКАНЕЙ С ПОРИСТЫМ ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ	11
<i>А.А. Платунова, Л.М. Штягина</i> КАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА	12
<i>А.В. Новикова, Ю.А. Петрова, А.Н. Евдокимов, В.А. Литин</i> СОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ГЛИЦИДИЛАКРИЛАТА И КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К КРАСИТЕЛЯМ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ	13
<i>Н.В. Переборова, В.И. Вагнер</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ	14
<i>А.А. Пуртова, Ю.А. Петрова, А.Н. Евдокимов, В.А. Литин</i> ПОРИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРОВ ЛИГНИНА И АКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ	16
<i>Е.С. Цобкалло</i> СТРУКТУРНАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ВЫСОКИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И НИТЕЙ	17
<i>О.И. Ширин, В.А. Литин</i> СИНТЕЗ ПОЛИМЕРА НА ОСНОВЕ КРАФТ-ЛИГНИНА	18
<i>А.Ю. Кулешова, Е.С. Сашина</i> ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОХРОМНОГО КОЛОРИСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА ВОЛОКНИСТЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ	19
<i>С.В. Киселев, А.Г. Макаров</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	20
<i>А.С. Николаева, А.А. Самошкина, А.В. Труевцев</i> К ВОПРОСУ ОБ АРМИРОВАНИИ ТРИКОТАЖЕМ ГИПСОВОГО КОМПОЗИТА	22
<i>Е.С. Цобкалло, Г.Г. Фёдоров</i> ЭКРАНИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПОЛИМЕРНЫЕ ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	23
<i>А.А. Козлов</i> УЧЕТ НЕОБРАТИМОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	24

- Е.С. Цобкалло, Г.П. Мещерякова*  
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО ПРОЦЕССА В КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ С ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ И ПРОВОДЯЩИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ 27
- А.А. Степашкин, Н.Ю. Никитин*  
КЛАССИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО-ПОЛИСУЛЬФОН ПО ТИПУ И МАРКЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 28
- И.М. Чернина*  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ НИТИ НА ЕЕ ПРОГРЕВ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОВЫТЯГИВАНИЯ 29\*
- М.С. Чувикина, А.В. Шилов, Е.А. Ермакова, А.С. Анохин, С.С. Стрельникова*  
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ  $LaWn_3$  ИЗ ОТРАБОТАННОЙ КИСЛОТНОЙ СМЕСИ 30
- Н.В. Переборова*  
КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РЕЛАКСАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ 31
- Е.Д. Коробова, Н.В. Дащенко*  
ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ ЗОЛЕЙ 35
- Д.А. Михальченко, Е.А. Ермакова, С.С. Стрельникова, А.С. Анохин, А.А. Акимова*  
ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРЕССОВАНИИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ КЕРАМИКИ ИЗ ПОРОШКОВ СОСТАВА  $LaNiO_3$ , ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ - ГЕЛЬ МЕТОДОМ 36
- А.М. Михаириди, С.В. Вербовская, М.В. Четурнова*  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩИХ И СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГИДРОГЕЛЕЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ 37
- М.А. Егорова, С.В. Киселев*  
ДЕФОРМАЦИОННО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 38
- А.М. Михаириди*  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ ИЗ МАКУЛАТУРЫ В КАЧЕСТВЕ СУБСТРАТА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ЛИСТОВОЙ ГОРЧИЦЫ 40
- А.В. Крылов, Е.С. Цобкалло, Г.П. Мещерякова*  
ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, НАПОЛНЕННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОВОЛОКНАМИ 41
- Ю.С. Лазарова, А.А. Струк, А.В. Медведев*  
СНИЖЕНИЕ РАЗРЫВНОЙ НАГРУЗКИ КРЕМНЕЗЕМНОЙ ТКАНИ КТ-11-ТО В УСЛОВИЯХ ПОВТОРНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ 42

<i>Е.С. Цобкалло, С.А. Попова, О.А. Москалюк</i> ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОПОЛНИТЕЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	43
<i>А.Г. Макаров, Н.В. Переборова</i> МЕТОДОЛОГИЯ ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	44
<i>Е.С. Цобкалло, А.Ф. Тихомиров, С.В. Гладков</i> НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОМПОЗИТАХ ПОЛИМЕР-ПОЛУПРОВОДНИК	47
<i>К.С. Кириш, П.П. Власов</i> МАГНЕЗИАЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ	48
<i>А.В. Труевцев, А.Э. Стариченкова</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЕТЧАТОГО ЭНДОПРОТЕЗА, ПОЛУЧАЕМОГО НА ДВУХФОНТУРНОЙ ОСНОВОВЯЗАЛЬНОЙ МАШИНЕ	49
<i>Г.Д. Раков, Р.Ф. Витковская</i> УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ	50
<i>М.П. Смирнова, Е.В. Кудрявцева</i> СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА БИОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРУДНОРАСТВОРИМОГО ПРЕКУРСОРА	51
<i>А.А. Шарпова, Е.В. Кудрявцева</i> ПОЛУЧЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (I)	52
<i>С.Д. Шагров, Р.Ф. Витковская, И.Н. Худяков</i> СИНТЕЗ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ КОМПЛЕКСОВ Fe <sup>3+</sup> С ПОЛИАМИННЫМИ ЛИГАНДАМИ	53
<i>И.М. Егоров, А.А. Козлов</i> МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	54
<i>А.С. Аветисян</i> ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫЙ ALSiC: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА НАДЕЖНОСТЬ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	57
<i>Е.Д. Подкопаева, Е.А. Новожилова</i> ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ЭЛЕКТРЕТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИПРОПИЛЕНОВОГО ВОЛОКНИТА С V-СОДЕРЖАЩИМИ СТРУКТУРАМИ	58
<i>О.В. Семенуха, С.Ю. Воронина</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ: РОЛЬ ВЯЗКОСТИ, КОНЦЕНТРАЦИИ И СПОСОБОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ	59
<i>В.В. Васильева, А.А. Шрайнер, Е.С. Цобкалло</i> МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ПЛЕТЁНЫХ ЭНДОПРОТЕЗОВ	60

<i>Ю.Б. Терес, Р.А. Зильберг</i> КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА Ni(II) КАК ХИРАЛЬНЫЙ СЕЛЕКТОР ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОГО СЕНСОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНАНТИОМЕРОВ АТЕНОЛОЛА	61
<i>Е.Д. Жужа, Е.В. Дяговец, Т.В. Огнева</i> ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ	62
<i>К.В. Набутова, М.В. Базунова, Г.С. Яхина</i> РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА И АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ МИКРОСФЕР	63
<i>А.Л. Калабин</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕКУРСОРА ПАН ВОЛОКНА ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	65
<i>В.А. Азаров, Е.И. Пряхин</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СОСТАВОВ В КАЧЕСТВЕ ГЛАДКОСТНЫХ ПОКРЫТИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ	66
<i>А.П. Михайловская, И.В. Елохин, И.К. Васильев, А.А. Кузьменко</i> ОТХОДЫ ПОЛИЭФИРНОГО ВОЛОКНА КАК СЫРЬЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРЕФТАЛЕВОЙ КИСЛОТЫ	67
<i>Е.С. Чистякова, С.В. Киселев</i> СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	68
<i>М.В. Абаишкин, А.П. Михайловская</i> ВЫБОР СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ГИБКИХ ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ РУКАВОВ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРА	70
<i>К.А. Антонова, А.П. Михайловская</i> БРОМИД ТРИЭТИЛОКТАДЕЦИЛАММОНИЯ: ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	71
<i>А.С. Власова, А.П. Михайловская</i> ВЛИЯНИЕ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ СОЛЕЙ АММОНИЯ И ПИРИДИНИЯ НА НАКРАШИВАЕМОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ВОЛОКОН	72
<i>Н.Е. Серова</i> РАЗРАБОТКА ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ КРАШЕНИЯ ХЛОПКОЛАВСАНОВОЙ ТКАНИ	73
<i>Ю.Ю. Вилачева, В.В. Марценюк, О.В. Асташкина</i> РАЗРАБОТКА УГЛЕРОД-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С ФТОРОПЛАСТОВЫМИ МАТРИЦАМИ КАК КОМПОНЕНТОВ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	74
<i>Н.А. Воронина, О.И. Гладунова</i> СВМПЭ ВОЛОКНА КАК ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УНИКАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ	75
<i>М.С. Евдокимов, Н.С. Лукичева, А.Ю. Кузнецов</i> МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОРИСТЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	76

<i>О.В. Кудринская, Ю.Ю. Вилачева, О.В. Асташкина</i> СРАВНЕНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В СРЕДСТВАХ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА	77
<i>Ю.А. Лимич, Л.М. Штягина</i> ЗАГРАДИТЕЛЬНЫЕ БОНЫ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	78
<i>Е.М. Мазуркевич, Н.С. Лукичева, Н.В. Дианкина</i> МОДИФИКАЦИЯ ПИГМЕНТАМИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ КОМПОЗИТОВ	79
<i>И.М. Егорова, А.А. Козлов</i> ПРОВЕДЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИМЕРНЫХ НИТЕЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	80
<i>А.С. Мусихина, В.В. Марценюк, О.В. Асташкина</i> ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ SPIN COATING	82
<i>Е.А. Перфильева, В.В. Марценюк, О.В. Асташкина</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ	83
<i>А.Е. Прохорова, Е.П. Ширшова</i> ПЕРЕРАБОТКА КОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ПОЛЫМИ СТЕКЛЯННЫМИ МИКРОСФЕРАМИ	84
<i>А.Е. Прохорова, Е.П. Ширшова</i> ПРИМЕНЕНИЕ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР В КОМПОЗИТНОЙ ОТРАСЛИ	85
<i>В.С. Румянцева, Л.М. Штягина</i> ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОТКАНИ И СВЕРХВЫСОКОМОДУЛЬНОГО ВОЛОКНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ В КАЧЕСТВЕ СВЯЗУЮЩЕГО	86
<i>С.О. Тальвинский, Н.С. Лукичева, А.Ю. Кузнецов</i> ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПОРИСТОСТЬ ВСПЕНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	87
<i>С.В. Киселев</i> МЕТОДЫ ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	88
<i>В.И. Игошина, К.К. Ширшин</i> ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕТАКРИЛОВЫХ МИКРОСФЕР ПРИ ПОМОЩИ НОВЫХ СШИВАЮЩИХ АГЕНТОВ	91
<i>П.Б. Гвадзабия, Е.С. Сашина</i> ПОЛИМЕРЫ С ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ	92
<i>А.В. Захарова, Н.А. Тихомирова</i> МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ INK-JET ПЕЧАТИ	93
<i>А.Б. Глазырин, Б.Р. Гильмияров</i> ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЛАСТИФИКАТОРА «ОКСАНОЛ»	94

<i>Н.П. Мидуков, В.С. Куров, М.А. Зильберглейт</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И АНАЛИЗ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕЖВОЛОКОННЫХ СВЯЗЕЙ. В 2D/3D ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	95
<i>В.В. Хачиниколаев, В.Ю. Пишрайнен</i> ФТОРОПЛАСТОВОЕ ПОКРЫТИЕ АНОДИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ - КЛЮЧ К ПОВЫШЕНИЮ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	96
<i>А. Яркевич, В.В. Марценюк, О.В. Асташкина</i> ПОЛУЧЕНИЕ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА	97
<i>Ю.А. Петраш, А.А. Безруков, О.И. Гладунова</i> О СПОСОБЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ГРАФЕНОВ ПЕРЕД ВВЕДЕНИЕМ В ПОЛИМЕРНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ	98
<i>М.А. Егорова, И.М. Егоров</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ СИНТЕТИЧЕСКИХ ШВЕЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ	99
<i>М.И. Яровой, Н.И. Свердлова, А.Ю. Кузнецов</i> ВТОРИЧНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ В КАЧЕСТВЕ НАПОЛНИТЕЛЯ В СОСТАВЕ КОМПОЗИТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	101
<i>Е.А. Печёркина, В.В. Васильева, А.А. Шрайнер, Е.С. Цобкалло</i> ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ХИРУРГИЧЕСКИХ ЭНДОПРОТЕЗНЫХ СЕТОК	102
<i>Ч.Р. Мухаметдинов, Р.А. Зильберг</i> ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ БУТИЛИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД	103
<i>Е.О. Булышева, Г.И. Ишмакаева, Р.А. Зильберг</i> МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ТИПА «ЭЛЕКТРОННЫЙ ЯЗЫК» ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ НАПРОКСЕНА	104
<i>Н.В. Переборова, А.Г. Макаров</i> МЕТОДЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	105
<i>Б.Ю. Прядезников, О.А. Молоканова (Москалюк)</i> ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОПИСАНИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	107
<i>Б.М. Примаченко</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНОГО КОМПОНЕНТА ДЛЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАСЧЁТОМ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ГРАНИЦ ПОГРЕШНОСТЕЙ	108
<i>В.Р. Олексенко, А.Е. Соков, Т.Е. Горкина, Ю.А. Петрова, В.А. Липин</i> ФЛОКУЛИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПОЛИАМФОЛИТОВ	110
<i>Д.А. Прибыткова, Е.И. Пряхин</i> ДВУХСЛОЙНАЯ СИСТЕМА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТРУБ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОТ КОРРОЗИИ	111

<i>М.А. Егорова, А.М. Литвинов</i> ЦИФРОВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	112
<i>М.А. Сычева, Р.А. Зильберг</i> ХИРАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НИКЕЛЯ (II), ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ В КАЧЕСТВЕ МОДИФИКАТОРА, ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНАНТИОМЕРОВ НАПРОКСЕНА	114
<i>Д.Ю. Селякова, О.А. Молоканова, О.О. Бабич, Е.В. Кудрявцева</i> ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ВОЛОКОН, ОБРАБОТАННЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ CU-AG	115
<i>В.А. Лысенко</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРКОЛЯЦИИ В УГЛЕРОДНЫХ ПОЛИВИНИЛСПИРТОВЫХ ВОЛОКНАХ	115
<i>И.М. Егоров, А.А. Козлов</i> ВЫЧИСЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	117
<i>М.А. Селянкин, М.М. Ромашева, Е.Ю. Демьянцева, Р.А. Смит</i> ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ СТЕБЛЕЙ ТОПИНАМБУРА И СОЛОМЫ ПШЕНИЦЫ	119
<i>Ю.А. Петраш, А.А. Безруков, О.И. Гладунова</i> СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ГРАФЕНАМИ И ГРАФЕНОВЫМИ НАНОПЛАСТИНАМИ	120
<i>М.М. Ромашева, В.А. Панова, Е.Ю. Демьянцева, Р.А. Смит</i> ВЫДЕЛЕНИЕ РЕДУЦИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА	121

# МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

**М.А. Бакаева, Е.С. Сашина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ИНКАПСУЛИРОВАНИЕ ТЕРМОХРОМНЫХ ЛЕЙКОКРАСИТЕЛЕЙ В ОБОЛОЧКУ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

«Умный» текстиль – это текстиль, способный реагировать на условия окружающей среды. Многие «умные» свойства волокнистым материалам способны придать современные отделочные средства, и, в первую очередь, микрокапсулированные препараты, являющиеся эффективным инструментом при разработке инновационных материалов. При создании таких препаратов в оболочку из полимера заключается активное вещество или композиция, обладающая необходимыми свойствами. При химических методах капсулирования вокруг ядра капсулированного вещества образуется защитное покрытие в процессе реакции полимеризации, поликонденсации пленкообразующих компонентов или полиионной самоорганизации.

Получение инкапсулированных термохромных красителей, меняющих свой цвет на волокнистом материале, представляется крайне актуальной задачей. Многие потребители технического, бытового, специального текстиля делают запрос на изделия с термохромным эффектом, которые находят спрос не только в дизайне, спортивной и спецодежде, но и в медицине, строительстве, военно-промышленном комплексе [1].

Для получения микрокапсул с термохромным красителем на основе кристаллического фиолетового лактона нами были использованы стирол и смолы на основе формальдегида, так как они отвечают требованиям светопрозрачности и непроницаемости для материала ядра. Важным аспектом при капсулировании является подбор подходящего эмульгатора. В нашем исследовании было выбрано НПАВ, которое представляет собой смолу и создает защитную оболочку ядра, необходимую при отверждении смол на основе формальдегида [2-3].

Выявлено, что карбамидоформальдегидная смола является подходящим материалом оболочки микрокапсулы для инкапсулирования термохромных красящих композиций на основе кристаллического фиолетового лактона. Нами были получены термохромные микрокапсулы с размерами 0,9-1,1 мкм.

### **Список литературы**

1. Sripal S., Saenkham A., Chaodongbung T., Wannoo B. Reversible coloring/decoding reactions of thermochromic leuco dyes controlled by a macrocyclic compound developer // *Struct. Chem.* 2022. 33. P. 1085–1095.
2. Zhao, W. Preparation of Thermochromic Microcapsules of Bisphenol A and Crystal Violet Lactone and Their Effect on Coating Properties / W. Zhao, X. Yan // *Polymers.* 2022. Vol. 14. Issue 1393.
3. Han, Y. Effect of Thermochromic and Photochromic Microcapsules on the Surface Coating Properties for Metal Substrates / Y. Han, X. Yan, W. Zhao // *Coatings.* 2022. Vol. 12. Issue 1642.

**Ю.И. Марущак, Н.Н. Ясинская**

Витебский государственный технологический университет

## **ПРОРУБАЕМОСТЬ ТКАНЕЙ С ПОРИСТЫМ ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

В производстве швейных изделий текстильные материалы при стачивании подвергаются проколу иглой, что может вызывать прорубку материала. Искусственные кожи и материалы с покрытиями в сравнении с тканями являются более капризными в обработке, так как обладают повышенной прорубаемостью. На сегодняшний день особой популярностью пользуются ткани с пористым полиуретановым (далее – PU) покрытием, имитирующие натуральную кожу («экокожа»). Анализ литературных источников показал, что в теории такие материалы обладают способностью к «самовосстановлению». В отличие от других реактопластов физические связи в полиуретане составляют 50-90% от общего числа поперечных связей в объеме полимера, поэтому структура обладает способностью разрушаться и перестраиваться при нагревании [1]. При пошиве изделий из опытной партии тканей с пористым PU покрытием белорусского производства установлено, что следы от проколов со временем частично затягиваются. Для материалов с полимерным покрытием отсутствует информация о влиянии процесса пошива на структуру материала и показатели качества, отсутствуют экспериментально подтвержденные сведения о способности современных материалов к самовосстановлению целостности структуры после прокола иглой, что подтверждает актуальность исследования.

Авторами проведены исследования способности самовосстановления отечественных тканей с PU покрытием различной толщины полимера: №1з – 100 мкм, №2р – 400 мкм, №3ч – 700 мкм, №4г – 520 мкм, №5с – 310 мкм. Для прокола использовали иглы фирмы «Schmetz» с заточкой острия R, номер №80. Для замера формы и площади отверстия использовали микроскоп Альтами МЕТ5. Образцы №3ч и №4г обладают наилучшей способностью к самовосстановлению целостности после прокола (около 2-3 секунд), что обусловлено большей пористостью PU покрытия. Первоначальная форма прокола у №3ч продолговатая, площадь 17110 мкм<sup>2</sup>, у образца №4г круглая, площадь 21704 мкм<sup>2</sup>. Прокол образца №2р формирует круглое отверстие площадью 40938 мкм<sup>2</sup>. В течение 20 минут прокол затягивается до круглого отверстия площадью 1293 мкм<sup>2</sup>. Спустя 25 минут покрытие полностью самовосстанавливается. Прокол образца №1з формирует отверстие, приближенное к круглой форме площадью 103982 мкм<sup>2</sup>. Процесс самовосстановления проходит менее динамично, чем у образца №2р. В течение 2 минут прокол затягивается до отверстия площадью 93450 мкм<sup>2</sup>, далее процесс останавливается. При прокалывании образца №5с формируется отверстие продолговатой формы площадью 34290 мкм<sup>2</sup>, в течение 10 минут прокол затягивается до незаметных следов. Для образцов, у которых не произошло полное самовосстановление целостности структуры после прокола требуется воздействие влажно-тепловой обработки, в результате которой предположительно структура полиуретана перестроится при нагревании и следу от прокола будут незаметны.

### **Список литературы**

1. Каблов В.Ф., Новопольцева О.М., Кочетков В.Г. Технология переработки полимеров: учеб. пособие. ВолгГТУ. 2018. 244 с.

**А.А. Платунова, Л.М. Штягина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **КАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) – это термопластичный полимер, который относится к семейству полиолефинов. Он известнее благодаря высоким прочностным и ударным свойствам, низким коэффициентом трения и скоростью изнашивания, биосовместимостью, хемостойкостью и другими.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен получается в суспензионных или газофазных процессах. В основном применяются три различных класса катализаторов:

1. Гетерогенные титан-магниевые катализаторы (ТМК);
2. Гомогенные или нанесённые на носитель металлоценовые комплексы;
3. Гомогенные и гетерогенные феноксииминовые (FI) или другие постемаллоценовые катализаторы.

Гетерогенные титан-магниевые катализаторы (ТМК) – это катализаторы, применяемые в практике для полимеризации олефинов. Титан-магниевые катализаторы стали применять для получения полиолефинов с середины XX века. ТМК содержат несколько типов активных центров, которые проявляют различную реакционную способность. Благодаря этому они производят полимеры с широким распределением по молекулярной массе. Обычно ТМК работают при температуре полимеризации от 60 до 100 °С. Высокая температура вызывает увеличение скорости передачи цепи.

Металлоценовые катализаторы – это катализаторы полимеризации при низком давлении, каталитически активным центром у них является атом металла, который входит в состав металлоорганического комплекса. Структурно данные комплексы состоят из двух лигандов, которые в свою очередь связаны через мостиковую группу. Два лиганда могут быть одинаковыми или различными.

FI катализаторы представляют из себя гетероатоомокоординированный комплекс ранних переходных металлов, который совмещает пару несимметричных феноксииминовых хелатирующих лигандов с переходным металлом 4-й группы. Данные катализаторы обладают рядом уникальных свойств: точный контроль переноса цепи, высокой селективностью по этилену, высокой переносимостью функциональных групп и другими.

Пределы молекулярной массы сверхвысокомолекулярного полиэтилена зависят от таких факторов как: температура, концентрация мономера, природа растворителя, особенно в отношении металлоценовых катализаторов.

### **Список литературы**

1. Гостев С.С. Реакторные полимерные композиции СВМПЭ с низкомолекулярным полиэтиленом высокой плотности: синтез на металлоценовых и пост-металлоценовых катализаторах, морфология, свойства: дис. кандидата химических наук: 01.04.07. Москва, 2023. 141 с.
2. Металлоценовые катализаторы // INPOLIMER URL: [clck.ru/3DjD7Q](https://clck.ru/3DjD7Q) (дата обращения: 02.10.2024).
3. Makio H, Fujita T. Development and application of FI catalysts for olefin polymerization: unique catalysis and distinctive polymer formation. Acc Chem Res. 2009 Oct 20;42(10):1532-44. doi: 10.1021/ar900030a. PMID: 19588950.

**А.В. Новикова, Ю.А. Петрова, А.Н. Евдокимов, В.А. Липин**

Высшая школа технологии и энергетики  
Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и  
дизайна

## **СОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ГЛИЦИДИЛАКРИЛАТА И КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К КРАСИТЕЛЯМ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ**

Сточные воды многих отраслей промышленности, например, текстильной, пищевой, полиграфической, нефтяной содержат большое количество органических красителей, удаление которых затрудняется их высокой растворимостью в водной среде [1]. Одним из методов очистки водных растворов от красителей является сорбция из-за своей высокой эффективности, универсальности, отсутствия необходимости использования специального оборудования [2].

Перспективными сорбентами являются полимерные материалы, полученные на основе соединений, содержащих эпоксидные и спиртовые функциональные группы. Такие композиционные материалы характеризуются доступностью, стабильностью, высокой сорбционной способностью и долговечностью. В частности, производные глицидилметакрилата обладают целым рядом свойств, которые позволяют рекомендовать их для эффективной очистки сточных вод. Синтетические производные на основе (поли)глицидил(мета)акрилатов и углеводов также применяются в качестве ионообменных смол для адсорбции красителей из водных растворов [3].

Целью данной работы является исследование сорбционной способности полимеров на основе глицидилакрилата и карбоксиметилцеллюлозы по отношению к красителям различной природы.

Глицидилакрилат синтезировали нагреванием акриловой кислоты с эпихлоргидрином в присутствии хлорида тетраметиламмония с последующей обработкой карбонатом калия в ацетонитриле. Композиционные материалы на основе глицидилакрилата и карбоксиметилцеллюлозы синтезировали в ДМФА в течение 3-5 часов. Конечные продукты анализировали методом ИК- и ЯМР-спектроскопии.

Сорбционную емкость полученных сополимеров определяли на модельных растворах водорастворимых красителей: конго красный, пиразолоновый желтый и метиленовый голубой с концентрациями 5 - 50 мг/л.

Результаты экспериментальных данных равновесной сорбции обрабатывали с помощью моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радушкевича. Установлено, что сорбция красителей глицидиловыми эфирами достоверно описывается моделью Ленгмюра ( $R^2 > 0.9$ ). Рассчитанные значения кажущейся энергии сорбции красителей глицидиловыми эфирами по модели Дубинина-Радушкевича ( $< 8$  кДж/моль) свидетельствуют о протекании процесса по механизму физической сорбции.

Синтезированные глицидиловые эфиры являются эффективными сорбентами по отношению к красителям различной природы.

### **Список литературы**

1. Mashabi R.A., Khan Z.A., Elwakeel K.Z. // *Materials Advances*, 2022. Vol. 3. N. 14. P.5645-5671.
2. Ewuzie U., Saliu O.D., Dulta K., Ogunniyi S., Bajeh A.O., Iwuzor K.O., Ighalo J.O. // *J. Water Process Eng.*, 2022. Vol. 50. P. 103273.
3. Abu-Saied M.A., Abualnaja K., E. A. El-Desouky, Abdel-Naeem G., Eldeeb E.A., Elerian A. F. // *Desalination and Water Treatment*, 2024. Vol. 320. P. 100759.

**Н.В. Переборова, В.И. Вагнер**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Как правило, методы математического моделирования и компьютерного прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов разрабатываются и применяются при постоянной температуре. Однако, в реалии, такие условия встречаются достаточно редко и при эксплуатации изделий, изготовленных из полимерных текстильных материалов, исследователей интересуют вопросы учета переменной температуры при математическом моделировании и компьютерном прогнозировании указанных процессов [1].

Следует сказать, что переход в моделировании и прогнозировании деформационных процессов от условий постоянной температуры к переменной связан с определенными объективными трудностями, так как увеличивает размерности параметров математической модели на единицу. При этом параметры-константы становятся функциями одной переменной - температуры, что же касается переменных характеристических функций, то к ним также добавляется температура [2].

При выборе конкретной аппроксимирующей функции задача по прогнозированию деформационного процесса в условиях постоянной температуры сводится к определению четырёх параметров: начальной податливости, предельно-равновесной податливости, структурного коэффициента запаздывания и сило-временной функции.

Описанные методики хорошо зарекомендовали себя при исследовании и прогнозировании различных нагруженных состояний синтетических нитей и других полимерных текстильных материалов в условиях постоянной температуры.

Имеются также методики исследования деформационных процессов при изменяющейся температуре, которые нельзя назвать универсальными: если деформационное "семейство" удаётся посредством сдвигов совместить с некоторой обобщенной кривой. В этом случае говорят, что имеет место температурно-временная аналогия, а функцию сдвигов называют температурно-временной функцией [3].

То есть исследование деформационных процессов, протекающих при изменяющейся температуре, но при постоянных значениях деформации или напряжения, сводится, при соответствующем выборе нормированной функции, к определению четырех параметров (двух асимптотических значений температур, характеризующих температурные границы исследуемого процесса, структурно-температурного коэффициента и температурно-временной функции).

Имеющиеся методики позволяют прогнозировать деформационные процессы и в условиях изменяющейся температуры. Однако, данные методики либо предполагают нахождение вышеуказанных четырёх параметров для каждого из исследуемых значений температуры, тем самым резко увеличивая число определяемых параметров, либо проводят исследование процессов при температуре, которая изменяется по заранее определенному сценарию (например, линейная зависимость температуры от времени, соответствующая равномерному нагреванию образца; зависимость температуры от времени по заданному закону в ходе остывания и т.п.), что фактически привязывает значения температуры к соответствующим значениям времени, подменяя две переменные (время и температуру) одной [4].

Исследуя деформационные процессы полимерных текстильных материалов при различных значениях температуры и определяя соответствующим образом сило-временные функции для различных полимерных нитей, удалось заметить, что их графики при различных значениях температуры могут быть получены поворотом одного из них на некоторый угол, в первом приближении который можно считать линейно зависящим от значения температуры. Такой поворот графиков физически оправдан, так как при изменении температуры соответствующим образом изменяются значения времён запаздывания при одинаковых значениях напряжения.

Аналогично, исследуя характер зависимости остальных параметров от температуры (начальной податливости, предельно-равновесной податливости, параметра интенсивности деформационного процесса), можно в первом приближении считать эту зависимость линейной от температуры, что значительно упрощает процесс прогнозирования [5].

Предложенная методика прогнозирования деформационных процессов полимерных нитей в условиях переменной температуры, опробованная на различных материалах дала расчётные результаты, отличающиеся от экспериментальных на величину, не превышающую 20 %, что вполне технически допустимо.

Полученные предложенным способом деформационные характеристики являются параметрами математической модели деформационного процесса. При этом, следует заметить, что размерность параметров при переменной температуре увеличивается на единицу.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

#### **Список литературы**

1. Макаров А.Г. Контроль параметров нелинейно-наследственных ядер релаксации и запаздывания синтетических нитей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2000. № 2. С.12-16.
2. Макаров А.Г. Определение аналитической взаимосвязи нормированных ядер релаксации и ползучести в линейной теории вязкоупругости текстильных материалов // Известия Высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2002. № 2. С. 13-17.
3. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Демидов А.В., Вагнер В.И. Спектральный анализ релаксационных свойств полимерных нитей аморфно-кристаллического строения // Химические волокна. 2013. № 5. С. 44-47.
4. Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Гофман И.В., Васильева В.В. Начальная стадия релаксации напряжения в ориентированных полимерах // Физика твердого тела. 2015. Т. 58. № 4. С. 814-820.
5. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Васильева Е.К. Сравнительный анализ деформационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов из них // Химические волокна. 2015. № 6. С. 68-72.

**А.А. Пуртова, Ю.А. Петрова, А.Н. Евдокимов, В.А. Липин**

Высшая школа технологии и энергетики  
Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и  
дизайна

## **ПОРИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРОВ ЛИГНИНА И АКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ**

Использование природных биополимеров, таких как лигноцеллюлозные биомассы или их компоненты является перспективным направлением использования волокнистых материалов, включающих их модификацию. Одной из таких модификаций является полимеризация лигнина с функциональными мономерами, которая увеличивает как молекулярную массу, так и количество функциональных групп в структуре лигнина с целью получения высокомолекулярных продуктов с высокими гидрофильными или гидрофобными свойствами [1]. Функционализация лигнина мономерами, такими как акриламид, акриловая кислота, дегидроабетиновая кислота и метилметакрилат, приводит к получению биоматериалов на основе лигнина, которые имеют широкое применение, например, в качестве антипиренов, абсорбентов, гидрогелей, связующего, гидрофобного и водостойкого композита [2].

Для удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод используются химическое осаждение, адсорбция, ионообменная адсорбция, обратный осмос, электрохимическая обработка и барьерное разделение. Технология адсорбции, в том числе с использованием сополимеров на основе лигнина, считается более экономичным выбором для очистки от ионов металлов с целью защиты окружающей среды и человека [3].

Цель данной работы является получение композиционных материалов на основе лигнина и акриловой кислоты и исследование их сорбционных свойств.

Сополимер лигнина и акриловой кислоты получали путем реакции сополимеризации в присутствии инициатора реакции персульфата калия.

Было исследовано влияние прививки лигнина на механизм образования сополимеров акриловой кислоты. Получение привитых сополимеров было подтверждено методом ИК-спектроскопии. Был предложен способ прививки акриловой кислоты к лигнину. Процесс набухания исследовали гравиметрическим методом в диапазоне значений рН 3-11. Было установлено, что сополимер на основе акриловой кислоты и лигнина обладает более высокими потребительскими свойствами с точки зрения водоудержания и скорости набухания. Было обнаружено, что степень набухания сильно зависит от размеров пор и состава привитого сополимера. Полученные композиты имеют потенциальные возможности применения для удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод и др.

### Список литературы

1. Munguia-Quintero M.F., Vega-Hernandez M.A., Rosas-Aburto A., Hernandez-Luna M.G.; Lopez-Ramirez S., Barragan-Aroche J.F., Vivaldo-Lima E. An Early Study on the Synthesis of Lignin-Graft-(Net-Poly(acrylamide-co-N,N-methylenebisacrylamide)), Characterization of the Produced Copolymer, and Evaluation of Its Performance as Adsorbent for Lead Removal from Wastewater Purposes // Processes. 2023. Vol. 11. P. 2309-2325.
2. Ye. D. zhan, Jiang, L., Ma, C., Zhang, M., & Zhang, X. The graft polymers from different species of lignin and acrylic acid: Synthesis and mechanism study // International Journal of Biological Macromolecules. 2014. Vol. 63. P. 43–48.
3. Ma Y., Sun Y., Fu Yu., Fang G., Yan X., Guo Z. Swelling behaviors of porous lignin based poly (acrylic acid) // Chemosphere. 2016. Vol. 163. P. 610-619.

### Е.С. Цобкалло

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### СТРУКТУРНАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ВЫСОКИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И НИТЕЙ

Вопрос о получении синтетических нитей и волокон с высокими физико-механическими свойствами опирается на фундаментальные вопросы о взаимосвязи этих свойств с молекулярным и супрамолекулярным строением волокнистых полимерных материалов. Получение таких волокон и нитей является важнейшей задачей материаловедения, так как высокопрочные, высокомодульные нити и волокна являются основным армирующим компонентом композиционных материалов. Важнейшей характеристикой эксплуатационных свойств волокнистых материалов в особенности для авиационной, космической и военной промышленности является величина удельной прочности, определяемой как отношение прочности к удельному весу волокон или нитей. В работе проведены сравнения этой величины для наиболее распространённых конструкционных материалов, волокон и нитей. Проанализирована особенностей волокон и нитей с наиболее высокими механическими свойствами: синтетического волокна «Зайлон (РВО)», полученного на основе жидкокристаллических полиоксазолов; углеродного и базальтового волокон; высокопрочного волокна нового поколения «Вектран (Vectran)», полученного из жидкокристаллического полимера (LCP), ароматического полиэфира. Рассмотрена структурная обусловленность высоких механических свойств волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена («Дупеета, Spectra»). Эти волокна получают по технологии гель-формования, в результате реализации которой линейные макромолекулы приобретают почти совершенную параллельную ориентацию молекул, уровень параллельности ориентации полимерных цепей может превышать 95%, степень кристалличности до 85%. На основе исследования и сравнения свойств трёх групп амидных нитей, полученных из алифатических (Капрон, Найлон), метаарамидов (Номекс, Фенилон) и параарамидов (Кевлар. Амос. Русар. Технора. Тварон. СВМ) проанализировано влияние важнейшей структурной характеристики полимеров - гибкости молекулярных цепей на прочность, жёсткость и температурные свойства волокон. Основной характеристикой гибкости молекулярных цепей полимеров является сегмент Куна – минимальный отрезок цепи изолированной макромолекулы, способный перемещаться как единое целое независимо от остальных

участков цепи под действием теплового движения в отсутствие межмолекулярных взаимодействий. Рассмотрено влияние межмолекулярного взаимодействия в полимерных волокнах, так как в реальных волокна более уместно характеризовать внутреннее сегментальное движение механическим (кинетическим) сегментом, учитывающее наличие межмолекулярного взаимодействия. Проведено сравнение надмолекулярной структуры перечисленных выше видов амидных волокон. Представлены диаграммы растяжения волокон, полученные в широком диапазоне температур, определены значения прочности при различных температурах. Сформулирована структурная обусловленность высоких механических свойств волокон и нитей.

**О.И. Ширин, В.А. Липин**

Высшая школа технологии и энергетики  
Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и  
дизайна

### **СИНТЕЗ ПОЛИМЕРА НА ОСНОВЕ КРАФТ-ЛИГНИНА**

Во всем мире наименее востребованным возобновляемым ресурсом является лигнин, который составляет до 30% растительной биомассы и является отходом целлюлозно-бумажной промышленности. В настоящее время ведутся активные поиски новых областей применения химических соединений лигнина. Различные полимеры на его основе представляют практический интерес для очистки жидких матриц от частиц микропластика и создания материалов, обладающих биосовместимостью и антиоксидантными свойствами [1]. Также сополимеры лигнина с акриловой кислотой и акриламидом могут применяться в качестве ингибиторов коррозии и для других целей [2].

Проблема разделения фаз при очистке сточных вод и в целом ряде технологических процессов остается достаточно острой в силу несовершенства существующих реагентов, предназначенных для флокуляции. Использование традиционных коммерческих флокулянтов – на основе полиакриламида, полиалюминийхлорида и т.п. – может вызывать целый ряд экологических проблем, в то время как лигнин, хитозан, крахмал и другие биологические макромолекулы являются экологически чистыми, малотоксичными и широко распространенными, что позволяет их рассматривать как перспективные флокулянтные материалы. Лигнин имеет значительную молекулярную массу и достаточно высокую адсорбционную способность. Кроме того, обилие активных функциональных групп (например, фенольных гидроксильных групп) делает лигнин легко модифицируемым. Лигнинсодержащие флокулянты показали свою эффективность при очистки сточных вод, образующихся в горнодобывающей, текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности [3].

Был синтезирован полимер на основе крафт-лигнина, полученного из чёрного щёлока, акриловой кислоты и этилендиамина. Полимер был получен в две стадии. На первой стадии крафт-лигнин был сополимеризован с акриловой кислотой. В качестве инициатора использовали персульфат натрия. На второй стадии к полученному сополимеру добавляли этилендиамин. Структура полученного полимера была установлена с использованием ИК-спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре. В ИК-спектре полученного полимера присутствуют колебания –COOH группы ( $1643\text{ см}^{-1}$ ) и

колебания –NH группы ( $3194 \text{ см}^{-1}$ ), что свидетельствует об успешном протекании реакций.

### Список литературы

1. Kai D., Zhang K., Jiang L., Wong H. Z., Li Z., Zhang Z., Loh, X. J. Sustainable and Antioxidant Lignin–Polyester Copolymers and Nanofibers for Potential Healthcare Applications // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2017. Vol. 5. P. 6016–6025.
2. Gao C., Zhao X., Fatehi P., Dong X., Liu K., Chen S., Kong, F. Lignin copolymers as corrosion inhibitor for carbon steel // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 168. P.113585.
3. Zhang X., Tu M., Paice M. G. Routes to Potential Bioproducts from Lignocellulosic Biomass Lignin and Hemicelluloses // BioEnergy Research. 2011. Vol. 4. P. 246–257.

### А.Ю. Кулешова, Е.С. Сашина

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОХРОМНОГО КОЛОРИСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА ВОЛОКНИСТЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ

В мире моды отображаются актуальные общественные ценности и течения, а ее развитие происходит параллельно развитию социума. Большинство индивидуумов хотели бы носить одежду, которой нет у других, которая выделяла бы их и отражала их индивидуальность, настроение, мнение, особенности. Одежда с исчезающим, изменяющимся или появляющимся в зависимости от факторов внешней среды или по желанию человека рисунком в полной мере может удовлетворять такому желанию и служить существенным средством проявления индивидуальности. К нанесению на предмет одежды индивидуального рисунка, например, методом текстильной печати, добавляется дополнительно такое отличительное средство как использование в краске пигмента, способного к изменению цвета, например, термохромного пигмента. В настоящее время получение и исследование капсулированных термохромных красителей, меняющих свой цвет на волокнистом материале, представляется крайне актуальной задачей. Многие потребители технического, бытового, специального текстиля делают запрос на изделия с термохромным эффектом, которые находят спрос в дизайне, спортивной или специальной одежде [1]. Несмотря на существование разных классов хромофорных систем, для текстильных материалов экономически более оправданным являются системы с лейкокрасителями, в которых изменение цвета является результатом реакции переноса протона между красителем и проявителем, которая приводит к изменению хромофорной группы красителя [2].

В нашей работе для создания термохромных рисунков мы использовали отечественный пигмент, основанный на применении нетоксичных компонентов [3]. Качество напечатанных пигментами текстильных материалов в первую очередь зависит от используемых печатных составов и природы текстильного материала. Для нанесения рисунка на тканый, трикотажный текстильный материал на основе хлопка, вискозы, полиэфира применяли краску состава: пигмент термохромный 0,3-0,4 ч.; связующее *Helizarin Binder (BASF)* 1,2 ч.; карбамол ЦЭМ 0,4 ч.; мягчитель глицерин 0,2 ч.; загустка

*Tanaprint MAXX (Tanatex Chemicals)* 8 ч.; сшивающий агент хлорид магния (5% раствор) 0,2 ч. После нанесения через шаблон с авторским рисунком слоя печатной краски толщиной 0,2 – 0,5 мм осуществляли термическую обработку сухим горячим воздухом при температуре 140-160 °С в течение 2-4 мин.

#### Список литературы

1. Sripal S., Saenkham A., Chaodongbung T., Wannoo B. // *Struct. Chem.* 2022. 33. P. 1085–1095.
2. Сашина Е.С., Бакаева М.А., Михайловская А.П., Кулешова А.Ю. // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности.* 2023. № 5 (407). С. 20-29.
3. Патент РФ 2813709. Термохромная пигментная композиция. Мызников Л.В., Волкова Д.Д., Сашина Е.С.; СПГУПТД, опубл. 15.02.2024; БИ № 5.

#### С.В. Киселев, А.Г. Макаров

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цифровое прогнозирование деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов возможно только на основе системного анализа его вязкоупругих свойств, включающего в себя: экспериментальные исследования; построение математической модели вязкоупругости, наиболее адекватно отражающей деформационные и релаксационные свойства полимерного текстильного материала, а также определение вязкоупругих параметров указанного материала. Внедрению разработанных методов системного анализа вязкоупругости полимерных текстильных материалов способствует компьютеризация расчетов.

Современная деятельность человека не обходится без полимерных текстильных материалов. Полимерные текстильные материалы встречаются повсюду: от нашей одежды до оболочки космических аппаратов и подводных лодок.

Интерес к полимерам не случаен. Современная наука создала, а промышленность выпускает синтетические материалы, обладающие необходимыми свойствами. Так, например, полимеры, превосходящие по прочности металлы, применяются в качестве деталей машин, подвергающихся усиленным нагрузкам и механическим воздействиям [1].

Термостойкие полимеры применяются в областях высоких или низких температур. Примером тому может служить обшивка космического корабля, испытывающая как низкотемпературные воздействия окружающей среды в космическом пространстве, так и воздействие высокой температуры во время прохода спускаемого аппарата через атмосферу.

Современному обществу требуется большое разнообразие материалов, обладающих множеством различных свойств. Для одних целей нужны водонепроницаемые материалы, для других гигроскопические и т.д. [2].

Важными механическими характеристиками полимерных текстильных материалов являются его упругие и деформационные свойства, определяющие

способность материала изменять форму под воздействием нагрузки и восстанавливаться после ее снятия.

Для определения механических характеристик необходимо построение математической модели, отражающей физический смысл и концептуальные закономерности механического поведения полимера.

Желательно построение такой математической модели, которая позволяла бы не только с достаточной степенью точности определять механические характеристики полимера, но и была бы наиболее простой из возможных вариантов, а также включала минимум физически обоснованных параметров.

Естественное желание упрощения модели, при прочих равных условиях, диктуется стремлением облегчить процедуры определения механических характеристик полимеров и прогнозирования деформационных процессов. Включение же в модель избыточных параметров, существенно не влияющих на точность прогнозирования, усложняет процедуру получения решения.

Математическая модель механических свойств полимерных текстильных материалов представляет собой, как правило, систему уравнений относительно определяемых характеристик, связанных дополнительными условиями [3].

Для получения единственного решения системы требуется задание параметров, которыми могут служить данные эксперимента, полученные лабораторным путем. Например, при рассмотрении деформирования текстильных материалов, к ним относят данные процесса релаксации, характеризующегося переменным значением напряжения в материале при его растяжении на заданную величину деформации, и данные процесса ползучести, характеризующегося изменением деформации при постоянном напряжении.

После составления математической модели, при наличии необходимых экспериментальных данных, переходят к процедуре определения механических характеристик с помощью численных методов. На этом этапе особую актуальность приобретает компьютеризация вычислений, позволяющая уменьшить трудоемкость и повысить точность расчетов [4].

Расчетные значения механических характеристик подлежат проверке путем сравнения с экспериментальными данными. По величине отклонения расчетных значений от экспериментальных данных делается вывод о пригодности математической модели для конкретного полимерного материала.

Следующим шагом является прогнозирование деформационных процессов полимеров на основе определенных ранее механических характеристик. Расчетное прогнозирование позволяет дать рекомендации по применимости полимерных материалов и оказывает влияние на отбор образцов, обладающих необходимыми качествами [5].

Математическое моделирование механических свойств полимеров полезно сочетать с разработкой критериев достоверности определения механических характеристик и надежности прогнозирования деформационных процессов. Указанные критерии с целью контроля прогнозирования применяются как на этапе моделирования - для наилучшего составления математической модели, так и на этапе расчета - для определения погрешности прогнозирования.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### Список литературы

1. Переборова Н.В., Климова Н.С., Литвинов А.М., Агеева Е.А. Математическое моделирование эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2021. № 2. С. 41-51.
2. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Химические волокна. 2020. № 3. С. 39-42.
3. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки деформационно-функциональных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Химические волокна. 2020. № 4. С. 37-40.
4. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационных процессов полимерных текстильных материалов с целью оценки их эксплуатационных свойств // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 80-88.
5. Переборова Н.В. Применение критериев качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов для оценки их функциональности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2020. № 1. С. 101-110.

### **А.С. Николаева, А.А. Самошкина, А.В. Труевцев**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **К ВОПРОСУ ОБ АРМИРОВАНИИ ТРИКОТАЖЕМ ГИПСОВОГО КОМПОЗИТА**

Строительная и реставрационная отрасли нуждаются в нахождении новых способов улучшения конструктивных показателей зданий и укрепления сооружений. Комбинирование различных веществ остаётся сегодня одним из основных способов создания новых материалов. Результатом такой компоновки является композиционный материал. Этот подход можно применить к гипсовым декоративным изделиям, применяющимся для отделки фасадов при реставрации и ремонте.

Еще в 2013 году было высказана гипотеза о квази-непрерывном характере армирования матрицы кулирным трикотажем [1]. Данный случай близок к армированию короткими однонаправленными нитями. Если это гипотеза верна, то прочность композита с трикотажным наполнителем все-таки должна быть меньше, чем с тканым наполнителем, в котором реализуется непрерывное армирование.

Для эксперимента были изготовлены образцы трикотажа и ткани с одинаковым количеством нитей в поперечном сечении. В качестве сырья для обоих типов наполнителей были выбраны хлопчатобумажная пряжа линейной плотности 29×2 текс×2 и комплексная параамидная нить из волокна «херакрон» линейной плотности 110 текс. В качестве матрицы был выбран гипс марки Г-16.

Полученные образцы были испытаны в условиях изгиба (ГОСТ Р 56810 – 2015) на универсальном измерительном комплексе «Инстрон».

Для адекватности оценки результатов было введено удельное напряжение, то есть разрушающее напряжение, приходящееся на одну нить наполнителя. Таким образом, эксперимент показал, что трикотажный гипсовый композит с параамидным

наполнителем дает трещину при удельном напряжении 0,25 МПа/нить, с тканым наполнителем – 1,10 МПа/нить, а с хлопчатобумажным наполнителем, соответственно, 0,22 МПа/нить и 0,72 МПа/нить.

Данный факт подтверждает гипотезу о квази-непрерывной природе армирования композита кулирным трикотажем: прочность армированного им композита существенно ниже, чем у композита, армированного тканью, но это величины одного порядка. Впрочем, ценность трикотажного наполнителя заключается не столько в достигаемой прочности композита, сколько в том, что кулирным трикотажем можно обтянуть любой сложный профиль (модульон, капитель, карниз, рельеф) и залить гипсом, получая прочную деталь, которая не разрушится даже при возникновении трещины. Это создает широкие возможности для проектирования и реставрации зданий и интерьеров.

### Список литературы

1. Труевцев А.В., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А., Молоснов К.А. Полимерные композиты с кулирным трикотажным наполнителем: монография. // СПб.: СПбГУПТД, 2020. 160 с.

### Е.С. Цобкалло, Г.Г. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### ЭКРАНИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПОЛИМЕРНЫЕ ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В современной жизни электромагнитные поля (ЭМП), в том числе радиочастотного диапазона, стали неотъемлемой частью жизни людей. Совершенствование технологий беспроводной связи, электронных приборов и других технических средств вызывает существенное увеличение воздействий ЭМП на людей, что вызывает беспокойство и даже тревогу по поводу их влияния на здоровье населения [1, 2]. Следует отметить, что в настоящее время ведутся активно работы по разработки стандартов в области электромагнитной безопасности населения. Актуальным направлением материаловедения является решение задач обеспечения электромагнитной безопасности населения, что требует разработки материалов, в том числе и для одежды, обеспечивающих защиту от воздействия ЭМП. Цель настоящей работы состоит в разработки волокнистых материалов и текстильных полотен на их основе, обеспечивающих защиту от воздействий ЭМП. В настоящее время существует достаточно широкий ассортимент материалов для экранирования электромагнитного излучения [3]. Перспективными разработками являются создание специальных экранирующих тканей, выдерживающих высокие разрывную, раздирающую и истирающую нагрузки, паро- и воздухопроницаемые, выдерживающие большое количество циклов стирки и чистки, с необходимым уровнем экранирования ЭМИ.

Металлические нити, часто используемые как составляющая экранирующих текстильных материалов, не полностью удовлетворяют этим требованиям. Для решения данной задачи заменить металлические нити в тканях и недолговечные напыления на поверхности текстильных полотен могут электропроводящие композитные нити, изготовленные из синтетических волокнообразующих полимеров. Нами были получены полипропиленовые, полиамидные композитные мононити по расплавной технологии с

различной степенью вытяжки. В качестве проводящих частиц были использованы углеродные дисперсные наночастицы – углеродные нанотрубки, углеродные нановолокна, частицы технического углерода. Найдены требуемые концентрации углеродных наполнителей для получения мононитей с требуемыми свойствами. Для достижения эффекта экранирования ЭМП мононити должны иметь характеристики в следующем диапазоне: удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$  от  $10^3$  до 100 Ом, удельное объёмное электрическое сопротивление  $\rho_v$  от  $10^5$  до  $10^{-2}$  Ом\*м. Нами были изготовлены тканые и трикотажные полотна с использованием электропроводящих нитей и проведены испытания их экранирующих свойств.

### Список литературы

1. Горбанёв С.А. Никитина В.Н. Актуальность технико-гигиенического прогноза при воздействии радиочастотного электромагнитного излучения на население в условиях цифровой экономики // Медицина труда и промышленная экология. 2020. Т.60. №9. С. 614-617.
2. Файзрахманов Н.И., Ломоносов М.В. Стандарты как основа электромагнитной безопасности. Стандарты и качество. 2024. №10. С. 18-22.
3. Федоров Г.Г., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А. Современные текстильные и другие гибкие материалы для экранирования электромагнитного излучения. Обзор // Химические волокна. 2023. №1. С. 37-45.

### А.А. Козлов

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### УЧЕТ НЕОБРАТИМОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При прогнозировании деформационных процессов полимерных текстильных материалов является актуальной задача повышения точности такого прогнозирования, т.к., чем точнее будет прогнозирование, тем более достоверной будет полученная информация о деформационных свойствах полимерных текстильных материалов.

Классические методы прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов основаны на численном решении интегральных определяющих уравнений вязкоупругости полимеров типа Больцмана-Вольтерра, которые не учитывают поправки на необратимость пластической компоненты деформации и, в силу этого, могут приводить к значительным погрешностям прогноза. Для повышения точности прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов предлагается введение физически обоснованной поправки на учет необратимости пластической компоненты деформации. Введение указанной поправки существенно повышает надежность и достоверность прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов [1].

Проблемой, понижающей точность прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов на основе интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра, является то, что они были разработаны применительно к процессам, характеризующимися полной обратимостью, чего нельзя сказать про реальные

деформационные процессы полимерных текстильных материалов ввиду наличия у них пластической составляющей деформации, которая не является обратимой [2]. Поэтому для повышения надежности, достоверности и точности прогнозирования деформационных процессов факт наличия у полимерных текстильных материалов необратимой пластической компоненты деформации необходимо учитывать в первую очередь [3].

Основными эксплуатационными процессами полимерных текстильных материалов, определяющими их функциональность, являются релаксационный процесс и процесс ползучести, прогнозирование которых можно осуществлять на основе определяющих интегральных уравнений типа Больцмана-Вольтерра, которые в случае релаксации имеет вид [4]:

$$\sigma_t = E_0 \cdot \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{\partial \varphi_{\varepsilon s}}{\partial s} \cdot ds, \quad (1)$$

где

$\varepsilon_t$  - деформация, меняющаяся во времени  $t$ ,

$\sigma_t$  - напряжение, меняющееся во времени  $t$ ,

$E_0$  - модуль упругости,

$E_\infty$  - модуль вязкоупругости,

$\varphi_{\varepsilon t} \in (0;1)$  - релаксационная функция, составляющая основу интегрального

релаксационного ядра  $\frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t}$ .

В случае прогнозирования деформационного процесса интегральное определяющее уравнение Больцмана-Вольтерра имеет вид

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_0} \cdot \sigma_t + \left( \frac{1}{E_\infty} - \frac{1}{E_0} \right) \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{\partial \varphi_{\sigma s}}{\partial s} \cdot ds \quad (2)$$

где

$\varphi_{\sigma t} \in (0;1)$  - функция запаздывания, составляющая основу интегрального

деформационного ядра  $\frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t}$ .

Как было сказано выше, в силу наличия пластической компоненты деформации у полимерных текстильных материалов, прогнозирование их деформационных процессов только по уравнениям (1) и (2) не может являться достаточно точным и надежным.

При прогнозировании деформационных процессов полимерных текстильных материалов, там, где не требуется повышенная точность, исследователями может не учитываться пластическая компонента деформации, чтобы существенно не усложнять определяющие интегральные уравнения.

Однако, для повышения точности, достоверности и надежности прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов учет поправок на необратимую компоненту деформации является необходимым.

Чтобы решить задачу прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов с учетом поправки на необратимую часть деформации надо экспериментально определить коэффициент необратимости деформации. С этой целью можно провести эксперимент по повторному нагружению образца полимерного текстильного материала сразу после завершения деформационного процесса и восстановления материала при разгрузке.

Повторный деформационный процесс, проводимый после разгрузки образца

полимерного текстильного материала и его восстановления, в совокупности с первичным деформационным процессом, можно охарактеризовать как сложный двухступенчатый деформационный процесс, представляющий собой суперпозицию двух процессов. По аналогии со сказанным, деформационные процессы могут быть и многоступенчатыми.

При деформационно-восстановительных процессах полимерных материалов значение конечной деформации не становится нулевым ( $\varepsilon_{ост.} \neq 0$ ) именно из-за наличия необратимой компоненты пластической деформации, которую необходимо учитывать в определяющих интегральных уравнениях Больцмана-Вольтерра для наиболее достоверного и надежного прогнозирования этих процессов [4].

Коэффициент необратимости деформации  $\mu$  подлежит экспериментальному определению, как отношение остаточной деформации  $\varepsilon_{ост.}$  к экспериментально достигнутому значению полной деформации  $\varepsilon^*$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{ост.}}{\varepsilon^*}. \quad (3)$$

Соответственно, коэффициент обратимости деформации  $\eta$  равен

$$\eta = 1 - \mu. \quad (4)$$

На основе (3) и (4) получаем формулу для величины остаточной (необратимой) деформации [15-17]

$$\varepsilon_{ост.} = (1 - \eta) \cdot \varepsilon^*. \quad (5)$$

Учет коэффициента остаточной деформации  $\eta$  при прогнозировании деформационных процессов полимерных текстильных материалов существенно повышает точность такого прогноза [5].

Таким образом, поставленная задача повышения точности расчетного прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов решена.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### Список литературы

1. Переборова Н.В. Инновационные методы контроля качества и функциональности полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 27-32.
2. Переборова Н.В. Цифровое прогнозирование деформационных режимов эксплуатации полимерных волокнистых материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 18-21.
3. Переборова Н.В. Разработка критериев цифровой качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2. С. 93-98.
4. Переборова Н.В. Управление качеством материалов текстильной и легкой промышленности // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 154-160.
5. Переборова Н.В., Литвинов А.М., Титова Л.В. Решение задачи повышения качества и конкурентоспособности продукции текстильной и легкой промышленности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 2. С. 5-9.

**Е.С. Цобкалло, Г.П. Мещерякова**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО ПРОЦЕССА В КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ С ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ И ПРОВОДЯЩИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

Композитные материалы (КМ) с полимерной матрицей и проводящими наполнителями являются широко распространенным конструкционным материалом. Необходимость введения наполнителей обусловлена тем, что полимерные материалы в большинстве случаев являются диэлектриками, и способность накапливать статистический заряд существенно сужает область применения. Введение в диэлектрическую полимерную матрицу проводящих углеродных наполнителей (УН) таких как: многостенные (МСНТ) и одностенные (ОСНТ) нанотрубки, нановолокна (УНВ), технический углерод (ТУ) и т. д., меняет электрофизические свойства КМ. В зависимости от концентрации наполнителя КМ приобретает антистатические, экранирующие свойства или становится проводником. Результат нелинейно зависит от многих факторов, таких как: концентрация наполнителя, его геометрия, свойства самой матрицы и т. д. Экспериментальные исследования весьма трудоемки и требуют дорогостоящего оборудования, поэтому математическое моделирование процесса становится необходимым компонентом при исследовании свойств и структуры КМ. Нами было показано [1], что вероятностная модель, определяющая вероятность появления хотя бы одного проводящего кластера из  $m$  возможных с  $n$  контактами между частицами наполнителя в каждой и вероятностью контакта между частицами  $p$ ,  $P(m, n, p) = 1 - e^{m(1-p^n)}$ , дает возможность исследовать влияние параметров процесса на результат. Модель позволяет сделать два вывода: во-первых, функция Больцмана, хорошо описывающая имеющиеся экспериментальные данные, является одним из аналитических приближение модели, во вторых, для разных УН наполнителей концентрация наполнителя  $K_0$  в точке перколяции нелинейно зависит от длины элемента наполнителя  $l$ , а длина наполнителя определяет количество точек контакта минимально необходимое для возникновения проводящего кластера.

Обычно предполагается, что параметром является аспектное число УН, но в некоторых случаях оно трудно определяется из-за существенного разброса значений геометрических размеров частиц наполнителя. Анализ экспериментальных данных по композитным пленочным нитям с полипропиленовой (ПП) матрицей и наполнителями ТУ, УНВ и МСНТ и для блочных КМ с ПП матрицей и наполнителями ТУ, ОСНТ и МСНТ подтверждают наше предположение. Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются функцией

$$K_0 = A + Be^{\frac{b}{l}},$$

где  $A$ ,  $B$  и  $b$  параметры, зависящие от вида матрицы, технологии изготовления и т.д. Этот результат является еще одним подтверждением эффективности нашей вероятностной модели.

### **Список литературы**

1. Вольнова Д.В., Цобкалло Е.С., Мещерякова Г.П. Математическое моделирование концентрационных зависимостей электропроводности плёночных нитей,

наполненных углеродными нанотрубками // Известия ВУЗов. Технологии легкой промышленности. 2019. Т. 43. Вып. 1. С. 15–18.

**А.А. Степашкин, Н.Ю. Никитин**

Университет науки и технологий МИСИС

### **КЛАССИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО-ПОЛИСУЛЬФОН ПО ТИПУ И МАРКЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Применение методов машинного обучения при проведении исследований свойств и условий получения различных материалов имеет большую актуальность в последние годы. Важным аспектом научных исследований является классификация результатов испытаний по тому или иному признаку. В нашей работе разработаны четыре классификатора. Два бинарных и два мультиклассовых классификатора результатов испытаний на растяжение композиционного материала углеродное волокно-полисульфон в зависимости от типа и марки углеродного волокна применявшихся при создании композиционного материала. Для построения классификаторов мы использовали два метода машинного обучения – метод случайного леса и метод К-ближайших соседей.

В результате проведенных исследований было установлено, что классификаторы, построенные на основе метода случайного леса, обладают более высокими метриками качества классификации, чем классификаторы, построенные на основе метода KNN. В случае бинарной классификации Accuracy составил 0.989, Sensitivity - 1.000, Specificity - 0.986, Precision - 0.941, Коэффициент корреляции Мэтьюса - 0.963, F1-score - 0.970. Площадь под кривой операционной характеристики приемника (AUC-ROC) – 0.993, площадь под кривой Precision – Recall (AUC-PR) – 0.993. Модель бинарной классификации, построенная на основе метода KNN, продемонстрировала худшие метрики качества классификации, в частности, AUC-ROC – 0.909 и AUC-PR – 0.941, стоит отметить, что Коэффициент корреляции Мэтьюса и F1-score у обеих моделей совпадает. В случае мультиклассовой классификации модель, основанная на методе случайного леса, также демонстрирует более высокие метрики качества, чем модель, построенная на основе метода KNN.

Анализ влияния предикторов на модель классификации на основе метода случайного леса показал, что при бинарной классификации наибольшее влияние на классификатор оказывает плотность углеродного волокна, деформация, соответствующая пределу прочности и предел прочности композиционного материала углеродное волокно-полисульфон находятся на втором и третьем месте соответственно. В модели мультиклассовой классификации результатов испытаний на растяжение композиционного материала углеродное волокно-полисульфон по марке производителя углеродного волокна наиболее значимыми предикторами являются деформация, соответствующая пределу прочности и предел прочности композиционного материала [1].

#### **Список литературы**

1. Nikitin Nikita Yu and Stepashkin, Andrey A., Application of Random Forest and Knn Methods for Classification of Mechanical Test Results of Carbon Fiber-Polysulfone

Composites. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4982010> or  
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4982010>

**И.М. Чернина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и  
дизайна

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ НИТИ НА ЕЕ ПРОГРЕВ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОВЫТЯГИВАНИЯ**

Создание полимерных композиционных материалов, содержащих углеродные наполнители, позволяет производить волокнистые материалы с улучшенной способностью проводить тепловую энергию [1].

Цель работы заключалась в создании аналитического описания процесса прогрева полипропиленовой мононити при её термической обработке в туннельной печи.

Результаты исследования процесса термообработки мононити без вытягивания рассмотрены в [2].

Представляется важным определить, как скорость подачи нити в зону вытягивания влияет на процесс ее прогрева в туннельной печи, способствующий ориентации макромолекул вдоль оси нити. Это и являлось предметом данного исследования, выполненного аналитически с использованием метода численного моделирования.

Нить рассматривалась как объект с распределёнными параметрами. Расчет проводился с использованием явной разностной схемы [3]:

$$t_{i+1,j} = \frac{a(m+1-j)}{m-j} t_{i,j+1} + at_{i,j-1} + \frac{m-a(2m+1)+(2a-1)j}{m-j} t_{i,j} \quad (1)$$

В уравнении (1)  $t_{i,j}$  – температура слоя  $j$  нити по радиусу в момент времени  $i$ ,  $a$  – характеристика теплопередачи в нити,  $m$  – число слоев нити по радиусу. Более подробные пояснения формулы (1) приведены в [2].

Созданная компьютерная программа позволяет определить зависимость от времени температуры всех слоев мононити по радиусу.

Выполнено численное моделирование процесса прогрева синтетической нити в процессе четырехкратного термовытягивания для скорости входа нити в зону вытягивания  $V = 0,1$  м/с и  $V = 0,2$  м/с.

При скорости  $V = 0,1$  м/с полный прогрев нити достигается на  $2/3$  длины печи, а при скорости  $V = 0,2$  м/с – только на выходе из печи. Можно предположить, что при дальнейшем увеличении скорости  $V$  нить не будет успевать прогреваться.

Влияние интенсивности прогрева полипропиленовой мононити на формирование необходимых физико-механических и теплофизических свойств еще предстоит изучить.

### **Список литературы**

1. Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A., Stepashkina A.S., Yudin V.E. Transenergo Plastics Based on Film-Type Composite Materials // Fibre Chemistry. 2018. Vol. 50. 274–279 p.

2. Шурыгин Д.А., Цобкалло Е.С., Чернина И.М. Исследование и моделирование прогрева полипропиленовой композиционной мононити в процессе термообработки // Химические волокна. 2023. № 3. С. 78-80.

3. Волков Е.А. Численные методы. М.: Наука. 1987. 248 с.

**М.С. Чувикина<sup>1</sup>, А.В. Шилов<sup>2</sup>, Е.А. Ермакова<sup>1</sup>, А.С. Анохин<sup>1</sup>,  
С.С. Стрельникова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ $\text{LaWN}_3$ ИЗ ОТРАБОТАННОЙ КИСЛОТНОЙ СМЕСИ**

При выщелачивании кобальта из алмазных резцов образуется большое количество отработанных кислотных смесей (ОКС). Утилизация этих смесей представляет значительную экологическую и экономическую проблему. В настоящее время утилизацию отработанных кислот производства проводят путем регенерации с получением продукционной азотной кислоты. Тем не менее, процесс регенерации ОКС остается экономически невыгодным, обладает низкой энергоэффективностью, а выбросы кислых газов в атмосферу превышают допустимые нормы.

Цель данной работы – исследование фазообразования соединения  $\text{LaWN}_3$  из отработанного раствора азотной кислоты.

Порошки синтезировали с применением золь-гель метода, где в качестве исходных компонентов были использованы оксид лантана ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), азотнокислый раствор после выщелачивания алмазных резцов, содержащий соединения вольфрама и кобальта, поливинилпирролидон 35000 (ПВП). После ксерогель подвергался термообработке в печи при температуре  $800^\circ\text{C}$  и  $900^\circ\text{C}$ , время выдержки – 3 ч.

Спектры ИК-спектроскопии регистрировали на приборе SPECORD 80 в диапазоне волновых чисел  $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ . Регистрацию рентгенодифракционных спектров образцов проводили на рентгеновском дифрактометре “UltimaIV” фирмы “Rigaku” (Япония) в интервале углов  $2\Theta$  от  $9^\circ$  до  $100^\circ$  с шагом съемки  $0,02^\circ$ .

Измерение пикнометрической плотности с точностью  $\pm 0,03\%$  проводили на газовом пикнометре Ultrarus 1200e (Quantachrome, США) в атмосфере гелия ОСЧ в режиме продувки в постоянном потоке газа. Расчет плотности производится встроенной вычислительной программой.

Инфракрасные спектры  $\text{LaCoO}_3$  состоят из нескольких полос поглощения, связанных с валентными и деформационными колебаниями в интервале от  $422$  до  $600\text{ см}^{-1}$ . В диапазоне волновых чисел от  $1550$  до  $1367\text{ см}^{-1}$  происходит колебания, принадлежащие  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ . Колебательные связи  $\text{La-O}$  происходят при  $640$  и  $810\text{ см}^{-1}$ .

Качественный РФА-анализ ксерогеля показал, что основной образующейся фазой является  $\text{La}(\text{OH})_3$  с небольшой примесью фазы  $\text{LaCoO}_3$ . Соединений  $\text{La}$  с  $\text{W}$  в ходе синтеза не образуются. Для полного получения фазы  $\text{LaCoO}_3$  возможно необходимо повышение температуры термообработки или времени выдержки в печи.

Пикнометрическая плотность аморфного ксерогеля –  $2,8002\text{ г/см}^3$ , пикнометрическая плотность порошка после термической обработки в печи при  $800^\circ\text{C}$  –  $6,9981\text{ г/см}^3$ , при  $900^\circ\text{C}$  –  $6,6558\text{ г/см}^3$ .

Таким образом согласно полученным результатам ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа можно предположить о незначительном содержании кобальта в отработанном растворе после выщелачивания алмазных резцов. Таким образом использование данных растворов не подходит для синтеза соединений лантана с перовскитоподобной структурой с включением вольфрама.

## Н.В. Переборова

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РЕЛАКСАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При проведении качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов можно использовать разработанные для этой цели критерии, либо по отдельности, либо объединив их в одном комплексном критерии, что является возможным ввиду того, что релаксационные характеристики, как параметры математических моделей релаксационных процессов этих материалов подчиняются закону Коши, обладающему свойством аддитивности [1].

Для проведения качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов были разработаны следующие критерии:

- интенсивность восстановления материала после эксплуатации;
- степень восстанавливаемости материала после эксплуатации;
- возможность многократного восстановления материала в процессе эксплуатации;
- время восстановления функциональных свойств материала после эксплуатации;
- устойчивость материала к многократному восстановлению функциональных свойств в процессе эксплуатации.

Кроме указанных пяти локальных критериев, разработаны два комплексных критерия качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов [2].

Проведение оценки эксплуатационных параметров полимерных текстильных материалов с учетом выше сформулированных критериев релаксационных свойств должно вестись в безразмерных единицах.

Для разработки критериев качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов воспользуемся математической моделью релаксации, записанной в виде

$$E_{et} = E_0 - (E_0 - E_\infty)\varphi_{et}, \quad (1)$$

$$\varphi_{et} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_\varepsilon} \ln \frac{t}{t_1} \right), \quad (2)$$

где:

$t$  - время,

$\sigma_t$  - напряжение, возникающее в материале под действием приложенной деформации  $\varepsilon$ ,

$b_e$  - параметр интенсивности релаксации,

$E_0$  и  $E_\infty$  - асимптотические значения модуля релаксации  $E_{\epsilon t} = \frac{\sigma_t}{\epsilon}$ ,

$t_1$  - значение базового времени,

$\Phi_{\epsilon t}$  - релаксационная функция в виде нормированного арктангенса логарифма (НАЛ).

**Первый критерий. Интенсивность восстановления материала после эксплуатации.**

Рассмотрим первый критерий качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов - интенсивность восстановления материала после эксплуатации.

Обозначим

$$\alpha_1 = b_{ne} \quad (3)$$

безразмерную величину, характеризующую степень интенсивности восстановления полимерного текстильного материала после эксплуатации.

Величина  $\alpha_1$  численно равна параметру интенсивности релаксации, отвечающего за восстановление функциональных свойств полимерного текстильного материала.

Можно заметить, что величина  $\alpha_1$  принимает лишь неотрицательные значения:  $\alpha_1 \geq 0$ .

Чем меньше значение величины  $\alpha_1$ , тем быстрее восстанавливается материал после эксплуатации. И, наоборот, чем больше значение величины  $\alpha_1$ , тем медленнее восстанавливается материал после эксплуатации.

Если для различных материалов выполнено неравенство  $\alpha_{1k} > \alpha_{1n}$ , то это означает, что материал с номером  $n$  восстанавливается после эксплуатации быстрее, чем материал с номером  $k$ .

Рассмотренный критерий следует применять, когда требуется оценить, насколько быстро восстанавливаются эксплуатационные свойства полимерных текстильных материалов, после эксплуатации.

Иногда бывает важно, чтобы материал после эксплуатации быстро восстанавливал свои функциональные свойства и был готов к последующей эксплуатации.

**Второй критерий. Степень восстанавливаемости материала после эксплуатации.**

Рассмотрим второй критерий качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов - степень восстанавливаемости материала после эксплуатации.

Обозначим

$$\alpha_2 = \frac{E_\infty}{E_0 + E_\infty} \quad (4)$$

безразмерную величину, характеризующую степень восстанавливаемости полимерного текстильного материала после эксплуатации.

Можно заметить, что введенная величина  $\alpha_2$  может принимать только неотрицательные значения:  $\alpha_2 \geq 0$ .

Чем меньше значение величины  $\alpha_2$ , тем восстанавливаемость полимерного

текстильного материала после эксплуатации будет более полной.

И, наоборот, чем больше значение величины  $\alpha_2$ , тем восстанавливаемость полимерного текстильного материала после эксплуатации будет менее полной.

То есть, если для различных материалов выполнено неравенство:  $\alpha_{2k} > \alpha_{2n}$ , то материал с номером  $n$  восстанавливается после эксплуатации более полно, чем материал с номером  $k$ .

Из формулы (4) следует, что материал восстанавливается полностью при нулевом значении модуля вязкоупругости  $E_\infty = 0$ .

В этом случае, очевидно,  $\alpha_2 = 0$ .

Введенный критерий имеет особую ценность, когда требуется оценить, как долго исследуемый материал может сохранять свои функциональные свойства.

### **Третий критерий. Возможность многократного восстановления материала в процессе эксплуатации.**

Рассмотрим третий критерий качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов - возможность многократного восстановления материала в процессе эксплуатации.

Обозначим:

$$\alpha_3 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_p} \quad (5)$$

безразмерную величину, характеризующую возможность многократного восстановления полимерного текстильного материала в процессе эксплуатации.

Здесь,  $\varepsilon_p$  - экспериментально полученное значение разрывной деформации в процентах,  $\varepsilon_0$  - некоторое нормирующее значение деформации, например,  $\varepsilon_0 = 10\%$ .

Величина  $\alpha_3$  может принимать лишь неотрицательные значения:  $\alpha_3 \geq 0$ .

Чем меньше значение величины  $\alpha_3$ , тем большей способностью к многократному восстановлению своих функциональных характеристик в процессе эксплуатации обладает полимерный текстильный материал.

И, наоборот, чем больше значения величины  $\alpha_3$ , тем меньшей способностью к многократному восстановлению своих функциональных характеристик в процессе эксплуатации обладает полимерный текстильный материал.

Введенный критерий имеет особую значимость, когда надо оценить, как много раз могут восстанавливать свои эксплуатационные свойства полимерные текстильные материалы в процессе эксплуатации [3].

### **Четвертый критерий. Время восстановления функциональных свойств материала после эксплуатации.**

Рассмотрим четвертый критерий качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов - время восстановления функциональных свойств материала после эксплуатации.

Обозначим:

$$\alpha_4 = \frac{\bar{t}_\varepsilon}{t_1} \quad (6)$$

безразмерную величину, характеризующую время восстановления функциональных свойств полимерного текстильного материала после эксплуатации.

Здесь:

$t_1$  - некоторое значение нормирующего базового времени, например:  $t_1 = 600c$ ,  
 $\bar{\tau}_\varepsilon$  - усредненное релаксационное время, которое может быть вычислено с  
 помощью формулы:

$$\bar{\tau}_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \tau_\varepsilon d\varepsilon, \quad (7)$$

где:

$\varepsilon_1$  - нижняя граница интервала исследуемой деформации,

$\varepsilon_2$  - верхняя граница интервала исследуемой деформации.

То есть, граница изменения допустимых значений исследуемой деформации:  
 $\varepsilon \in [\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ .

Величина  $\alpha_4$  может принимать только неотрицательные значения, то есть:  $\alpha_4 \geq 0$

Чем меньше значение величины  $\alpha_4$ , тем материал после эксплуатации  
 восстанавливается быстрее.

И, наоборот, чем больше значение величины  $\alpha_4$ , тем медленнее  
 восстанавливается материал после эксплуатации.

Введенный критерий имеет особую значимость, когда надо оценить, насколько  
 быстро или медленно восстанавливается тот или иной материал после эксплуатации [4].

**Пятый критерий. Устойчивость материала к многократному  
 восстановлению функциональных свойств в процессе эксплуатации.**

Рассмотрим пятый критерий качественной оценки релаксационных свойств  
 полимерных текстильных материалов - устойчивость материала к многократному  
 восстановлению функциональных свойств в процессе эксплуатации.

Обозначим:

$$\alpha_5 = \frac{E_\infty}{E_0 - E_\infty} \quad (8)$$

безразмерную величину, характеризующую устойчивость полимерного текстильного  
 материала к многократному восстановлению функциональных свойств в процессе  
 эксплуатации.

Величина  $\alpha_5$  может принимать только неотрицательные значения, то есть:  $\alpha_5 \geq 0$

Чем меньше значение величины  $\alpha_5$ , тем большей устойчивостью к  
 многократному восстановлению своих функциональных свойств в процессе  
 эксплуатации обладает полимерный текстильный материал.

И, наоборот, чем больше значение величины  $\alpha_5$ , тем меньшей устойчивостью к  
 многократному восстановлению своих функциональных свойств в процессе  
 эксплуатации обладает полимерный текстильный материал.

Чем выше устойчивость полимерного текстильного материала к многократному  
 восстановлению своих функциональных свойств в процессе эксплуатации, тем меньше  
 зависимость указанных функциональных свойств от влияния факторов внешнего  
 воздействия (температура, влажность, радиация и т.д.).

Нулевое значение величины  $\alpha_5 = 0$  означает абсолютную устойчивость  
 материала к многократному восстановлению своих функциональных свойств в процессе  
 эксплуатации [5].

Таким образом, были предложены критерии проведения качественной оценки релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### **Список литературы**

1. Макаров А.Г., Киселев С.В., Рыбачук С.В., Зурахов В.С. Критерии надежности прогнозирования вязкоупругости полимерных материалов // Известия вузов. Технология легкой промышленности. 2011. Т. 11. №1. С. 56-60.
2. Макаров А.Г., Киселев С.В., Рыбачук С.В., Зурахов В.С. Взаимобратимость интегральных ядер релаксации и ползучести при линейности вязкоупругих свойств полимерных материалов // Вестник СПГУТД. Серия 1. Естественные и технические науки. 2011. № 1. С. 69-72.
3. Макаров А.Г., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Описание физических законов на основе нового метода усреднения физических величин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2015. № 4. С. 3-7.
4. Макаров А.Г., Шванкин А.М. Сравнительный анализ физико-механических свойств арамидных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2016. Т. 31. № 1. С. 22-27.
5. Макаров А.Г., Шванкин А.М. Математическое моделирование деформационных процессов арамидных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2016. № 1. С. 10-14.

**Е.Д. Коробова, Н.В. Дащенко**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ ЗОЛЕЙ**

В современном мире текстильные материалы играют важную роль в повседневной жизни людей, применяясь в различных отраслях промышленности. Вместе с тем, одной из актуальных задач является создание инновационных технологий отделки текстильных материалов, которые обладают свойствами самоочищения. Это позволит улучшить функциональные характеристики текстиля и повысить его экологическую безопасность. Эффект самоочищения достигается за счёт нанесения на текстильные материалы наночастиц диоксида титана. Наночастицы диоксида титана можно получать в составе интерференционных пигментов, в которых они находятся в наноразмерных слоях в кристаллической форме анатаза, и в виде титансодержащих золей.

В настоящей работе был изучен золь-гель синтез титансодержащих золей и оценена их фотокаталитическая активность. Синтез золей диоксида титана проводили золь-гель методом, используя в качестве прекурсора раствор тетрахлорида титана в бутиловом спирте. Также при синтезе использовали различные кислоты для поддержания необходимого уровня pH, обеспечивающего эффективное протекание

процесса гидролиза прекурсора титана (соляную, серную, лимонную, уксусную, бутан-1, 2, 3, 4-тетракарбоновую кислоты), с целью оценить влияние основности кислоты на закрепление золя на ткани. Фотокаталитическую активность зольей диоксида титана оценивали по степени разложения модельного красителя метиленового голубого (МГ).

Полученные экспериментальные данные показывают, что использование уксусной кислоты в золь-гель синтезе не дает хорошего закрепления титансодержащего золя на ткани, поскольку после 5 стирки покрытие полностью смывается с ткани. При использовании двухосновной лимонной кислоты в золь-гель синтезе титансодержащего золя установлено, что после 1 стирки все образцы текстильных материалов, обработанных титансодержащими золями на базе лимонной кислоты, показывают фотокаталитические свойства на уровне холостого образца без титана, следовательно, использование данной кислоты при синтезе зольей нецелесообразно.

В литературных источниках имеются данные, что использование многоосновной 1,2,3,4-бутантетракарбоновой кислоты дает лучшее закрепление покрытие титансодержащего золя на тканях благодаря образованию дополнительных сшивок. Для оценки влияния эффективности закрепления титансодержащего золя на основе бутантетракарбоновой кислоты проводили синтез золя на волокне. Анализ полученных данных показал, что титансодержащий золь на основе бутантетракарбоновой кислоты, синтезированный на волокне, не устойчив к стирке.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в золь-гель синтезе титансодержащего золя наиболее целесообразно использование соляной кислоты.

**Д.А. Михальченко<sup>1,2</sup>, Е.А. Ермакова<sup>1</sup>, С.С. Стрельникова<sup>1</sup>, А.С. Анохин<sup>1</sup>,  
А.А. Акимова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», институт новых материалов

<sup>3</sup>МИРЭА-Российский технологический университет

## **ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРЕССОВАНИИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ КЕРАМИКИ ИЗ ПОРОШКОВ СОСТАВА $\text{LaNiO}_3$ , ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ - ГЕЛЬ МЕТОДОМ**

Никелат лантана ( $\text{LNO}_3$ ) — это перспективный керамический материал, который привлекает внимание благодаря своей структуре и своим уникальным свойствам. Изделия из него обладают электрофизическими и магнитными свойствами. Эти характеристики открывают широкие возможности для использования никелата лантана в различных областях, от электроники до энергетики.

В работе были получены порошки  $\text{LNO}_3$ , золь-гель метод. В качестве исходных веществ для синтеза использовались порошкообразные оксиды лантана ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) и оксид никеля ( $\text{NiO}$ ), азотная кислота ( $\text{HNO}_3$ ) и поливинилпирролидон (ПВП).

Полученные порошки были подвергнуты термической обработки в муфельной печи при температурах 800 и 900 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение 10 часов. Полученные порошки были использованы для прессования, а также некоторое количество порошка дополнительно подвергалась измельчению в

планетарной мельнице (PULVERISETTE 7). После обработки порошки были отправлены на полусухое прессование, где в качестве технической связки использовался 5,0 масс. % поливиниловый спирт (ПВС). На ручном прессе (Specac GS15011) проводилось двухступенчатое прессование под давлением 200 + 400 МПа с измельчением образцов между этапами. Спрессованные балки размером 4×4×40 мм были отправлены на обжиг в печь, который проводился при температуре 1300 и 1400 °С с выдержкой в течение 3 часов на максимальной температуре.

Прочность исследовалась методом трехточечного изгиба на установке разрывной машине (Instron – 5800). Полученные данные показывают, что у образцов из порошка  $\text{LNO}_3$ , который прошел только термическую обработку при температуре 800 °С предел прочности составил 73 МПа - 1300 °С, а при термообработке 900 °С - 88 МПа, при повышении температуры обжига прочность возрастает и составила: при 800 °С - 88 МПа, а при 900 °С - 96 МПа.

Порошок прошедший дополнительную обработку в планетарной мельнице показал себя следующим образом при температуре термообработки 800 °С предел прочности при 1300 °С составил 88 МПа, а при термообработке 900 °С - 96 МПа, при повышении температуры обжига прочность возрастает и составила: при 800 °С - 115 МПа, а при 900 °С - 122 МПа.

Дополнительная обработка порошка  $\text{LNO}_3$  в планетарной мельнице позволило увеличить прочность керамики. Повышение прочности также способствовало увеличению температуры обжига с 1300 до 1400 °С.

В ходе эксперимента установлено, что керамика  $\text{LNO}_3$  после термообработки 900 °С и дополнительной обработки в планетарной мельнице, и обожженная при 1400 °С имеет самую высокую прочность 122 МПа.

**А.М. Михаилиди, С.В. Вербовская, М.В. Чепурнова**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩИХ И СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГИДРОГЕЛЕЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ**

Полимерные гидрогели — это полутвёрдые материалы, представляющие собой трёхмерную сетчатую структуру и удерживающие значительный объем воды. Целлюлозные гидрогели могут применяться в биомедицине (доставка лекарств, повязки для ран) благодаря их биосовместимости и нетоксичности. Кроме того, они могут быть полезны в области защиты окружающей среды, например, для очистки сточных вод. Производство гидрогелей возможно путем растворения целлюлозы в контролируемых условиях, а затем ее регенерация в форме геля. Цель данного исследования — сравнение функциональных свойств гидрогелей, полученных из двух растворяющих систем: диметилацетамид (ДМАА)/LiCl (далее ГГ-Д) и NaOH (далее ГГ-Щ).

Для получения гидрогелей была использована промышленная хлопковая микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ). В некоторые образцы была добавлена порошковая целлюлоза, содержащая микро- и нано-фракции. Она была изготовлена в лаборатории из макулатуры путем кислотного гидролиза в  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Свойства ГГ-Д существенно зависели от концентрации целлюлозы, её происхождения, фракционного состава и условий растворения. ГГ-Д с более высокой концентрацией целлюлозы (2-3 масс.%) имели более плотную, но хрупкую структуру по сравнению с образцами с концентрацией МКЦ 0,6-1 масс.%. ГГ-Д с добавлением порошковой целлюлозы с нано-фракцией, проявляли улучшенные эластические свойства по сравнению с ГГ-Д из чистой МКЦ.

Водоудерживающая способность ГГ-Д увеличивалась с 22,91 г/г до 59,51 г/г с уменьшением концентрации целлюлозы до определенного предела (около 0,5 масс.%), после которого гелирование не происходило. Сорбционная способность ГГ-Д по отношению к красителю метиленовому голубому была достаточно низкой, она составляла 0,07-0,09 мг/г и мало зависела от условий получения.

Второй тип растворителя для получения ГГ-Щ представлял собой 9%-ный водный раствор NaOH или раствор NaOH/мочевина (7% : 9%). Мочевина играла роль химического сшивающего агента для целлюлозных цепей при гелировании. Суспензию МКЦ перемешивали, а затем замораживали при -15 °С в течение 12 ч. Оттаивание и формирование геля происходило при температуре 25 °С или -5 °С.

ГГ-Щ, полученные без и с добавлением мочевины, имели довольно низкие значения ВУС: 3,66 и 5,69 г/г соответственно. Еще одним значимым отличием от ГГ-Д была способность обоих ГГ-Щ к повторному набуханию до значений ВУС 0,58 и 2,43 г/г. Важно отметить, что ГГ-Д, после высушивания хорнифицируются и утрачивают способность к повторному набуханию.

Сорбционная способность ГГ-Щ была в 3 раза выше, чем ГГ-Д, достигая значений 0,16 и 0,23 мг/г (без и с использованием мочевины). Это объясняется более плотной структурой ГГ-Щ. Он содержал больше молекул целлюлозы, и, следовательно, сорбционные возможности были шире.

Таким образом, ГГ-Щ имеют гораздо более низкие ВУС, чем ГГ-Д, но они способны к повторному набуханию, что открывает возможности для многократного использования. Сорбционные способности гидрогелей достаточно низкие, но возможность их регенерации может сделать их интересными для целей очистки сточных вод, что требует дальнейших исследований.

**М.А. Егорова, С.В. Киселев**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ДЕФОРМАЦИОННО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Методы математического моделирования деформационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов основаны, прежде всего, на анализе физико-механического поведения указанных материалов в деформационно-восстановительных режимах нагружения этих материалов [1].

Для полноценного исследования и прогнозирования деформационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов с целью улучшения качества соответствующих изделий, предлагается проведение исследований основополагающих деформационно-эксплуатационных процессов - релаксации и ползучести, характеризующих основные физико-механические свойства

рассматриваемых материалов [2].

Такое исследование целесообразно осуществить на основе математического моделирования с последующим компьютерным прогнозированием релаксации и ползучести.

Процессы релаксации и ползучести, хотя и имеют различную физическую природу, по сути, являются взаимобратными процессами, гармонично дополняя друг друга. В силу этого, исследование релаксационных и деформационных характеристик полимерных текстильных материалов, относящихся, преимущественно, к классу вязкоупругих твердых тел, является задачей необходимой, а в ряде случаев, и достаточной [3].

Переход при математическом моделировании деформационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов от функциональной зависимости времен релаксации от деформации к константе оправдан, когда требуется оценить лишь качественные свойства материалов. Такой переход заметно упрощает математическую модель, что немаловажно при исследовании качественных характеристик вязкоупругости. Следует заметить, что при более детальном исследовании функциональных деформационно-восстановительных процессов, например, с позиции спектрального анализа, такой переход к упрощенной математической модели неоправдан [4].

Выбор в качестве основы математической модели релаксации функции нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ) не случаен, так как вероятностное распределение Коши, интегральной функцией распределения которого она является, обладает замечательным свойством: сумма характеристик, распределенных по вероятностному закону Коши, также имеет своим распределением вероятностное распределение Коши. Для материалов текстильной промышленности выполнение этого правила чрезвычайно важно, так как любой сложный текстильный объект представляет собой совокупность более простых текстильных объектов (нити состоят из волокон, ткани из нитей и т.д.). Поэтому, если параметры более простых текстильных материалов будут подчиняться вероятностному распределению Коши, этому же распределению будут подчинены и параметры более сложных текстильных материалов [5].

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

#### **Список литературы**

1. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Моделирование релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов - основа анализа их эксплуатационных свойств // Химические волокна. 2018. № 2. С. 36-39.
2. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Козлов А.А., Васильева Е.К. Разработка интегральных критериев оптимальности математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов // Химические волокна. 2018. № 4. С. 54-56.
3. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Васильева Е.К., Шванкин А.М., Егоров И.М. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов // Химические волокна. 2018. № 6. С. 3-6.
4. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С., Васильева Е.К. Методы математического моделирования и качественного анализа релаксационно-

деформационных процессов арамидных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 2 (374). С. 251-255.

5. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Спектральный анализ вязкоупругости геотекстильных нетканых полотен и его применение для оценки их функциональности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 2 (380). С. 192-198.

## **А.М. Михаилиди**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ ИЗ МАКУЛАТУРЫ В КАЧЕСТВЕ СУБСТРАТА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ЛИСТОВОЙ ГОРЧИЦЫ**

Сельское хозяйство 4.0 обеспечивает растущее население планеты продовольствием, внедряя современные технологии и инновации в аграрный сектор. Этот подход включает в себя использование автоматизации, интернета вещей, аналитики больших данных и устойчивых методов производства для создания умных и эффективных систем, способных адаптироваться к меняющимся условиям и потребностям рынка. Применение новых материалов, таких как гидрогели, упрощает уход за растениями и позволяет сократить потребление воды и удобрений [1].

Целью данной работы было исследование влияния гидрогелей различного происхождения в почвенном и беспочвенном субстрате на выращивание горчицы листовой (*Brassica juncea* L.). К результатам выращивания относятся всхожесть семян, биомасса растений, средняя высота и выживаемость растений.

В исследовании использовали гидрогели на основе полиакрилатных солей (ГГ-ПА) и целлюлозные гидрогели (ГГ-Ц), полученные из макулатуры в лабораторных условиях [2]. В качестве почвенной среды применяли готовый грунт для выращивания овощей с добавлением 20 масс.% ГГ-Ц или ГГ-ПА, а в беспочвенной среде – только ГГ-Ц. Все эксперименты проводились в течение 8 дней, в 3-кратном повторе, данные статистически обрабатывались, а для сравнения анализировались результаты контрольных опытов без гидрогелей. В почвенном субстрате применяли два вида полива: регулярный (каждый день) и стрессовый (два раза в неделю).

Выявлено, что при регулярном поливе добавление гидрогелей в почву не оказывает значительного влияния на биомассу по сравнению с контрольным опытом. Однако в условиях стресса с дефицитом воды добавление гидрогелей улучшает результаты выращивания горчицы. Оба вида гидрогелей — ГГ-Ц и ГГ-ПА — защищают растения от гибели (в контрольном опыте с недостатком влаги все растения погибли) и позволяют получить длину ростков, сопоставимую с результатами контрольного опыта при регулярном поливе.

Показано, что добавление в почву ГГ-ПА имеет два противоположных эффекта: слабый ингибирующий эффект на рост растений (при регулярном поливе длина ростков в среде с ГГ-ПА была самая низкая) и эффект усиленного поддержания влажности во время длительных засушливых периодов (наилучший результат по длине ростков наблюдается в группе с стрессовым поливом).

В отличие от ГГ-ПА, ГГ-Ц обладает благоприятными механическими свойствами для использования в качестве беспочвенного субстрата: достаточной плотностью и способностью сохранять форму. Предполагается, что между гидрогелем и корнями растений формируется система, поддерживающая равновесие влажности. Биомасса урожая горчицы на беспочвенном субстрате из ГГ-Ц почти в два раза превысила результаты контрольного опыта с использованием хлопковой марли в качестве субстрата.

#### Список литературы

1. Mikhailidi A., Ungureanu E., Tofanică B.-M., Ungureanu O., Fortună M., et al. Agriculture 4.0. Polymer hydrogels as delivery agents of active ingredients // Gels. 2024. V. 10(6). 368 p.
2. Mikhailidi A., Kotelnikova N. Functional materials from waste paper II. Cellulose hydrogels with high water retention capacity obtained from solutions of waste paper in DMAc/LiCl // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2022. V.48. N.7. P. 1486–1497.

#### **А.В. Крылов, Е.С. Цобкалло, Г.П. Мещерякова**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

#### **ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, НАПОЛНЕННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОВОЛОКНАМИ**

Разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих наперед заданным набором функциональных свойств, является на сегодняшний день актуальной задачей материаловедения. Для ее решения перспективными выглядят материалы с углеродными наполнителями, такими как графен, мелкодисперсный технический углерод, углеродные нановолокна и другие, поскольку известно, что теплопроводящие свойства таких материалов существенно зависят от концентрации наполнителей. Однако для прогнозирования свойств ПКМ недостаточно экспериментальных данных, математическое и цифровое моделирование позволяют лучше понять структуру и свойства материалов. Необходимо понимание того, какие именно физические и химические процессы вызывают именно такую, а не иную зависимость свойств материала которая определяется его внутренней структурой. Сделать это можно только при помощи моделирования, причем наиболее перспективным выглядит сочетание математического моделирования с компьютерным.

В среде COMSOL Multiphysics была создана цифровая модель полимерного материала на основе полипропилена с наполнителем из углеродных нановолокон [1] с целью исследования его теплопроводящих свойств.

Для описания ориентации волокон удобно использовать сферическую систему координат, в которой направление оси волокна определяется двумя углами  $\theta$  и  $\varphi$ , а ось  $z$  совпадает с технологическим направлением выработки. С учетом экспериментальных данных распределение волокон по углу  $\theta$  является нормальным с математическим то ожиданием  $\theta_0 = 60^\circ$  и средним квадратичным отклонением  $\sigma \sim 10^\circ$ . Распределение же

по углу  $\varphi$  считаем равномерным. Для построения модели была выбрана полипропиленовая матрица и наполнитель из углеродных нановолокон VGSF-H.

Геометрия рассматриваемой модели представляет собой куб (фрагмент полимерной матрицы) небольшого размера, внутри которого находятся хаотично ориентированные цилиндры (углеродные нановолокна). Распределение цилиндров в достаточной мере случайно и близко к таковому в реальном композите. В модели можно наблюдать сложные разветвленные структуры, характерные для реальных композиционных полимерных материалов с анизотропными наполнителями.

На основании модели были проведены расчеты коэффициента теплопроводности ПКМ при массовой концентрации наполнителя 5%. По итогам данных расчетов, коэффициент теплопроводности составляет 1,55 Вт/(м·К), что хорошо согласуется с результатами экспериментов.

### Список литературы

1. Крылов А.В., Цобкалло Е.С., Мещерякова Г.П. Создание геометрической модели композиционного материала, наполненного анизотропными частицами, для цифрового моделирования физических свойств // Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. 2024. Вып. 2. С. 32-37.

**Ю.С. Лазарова, А.А. Струк, А.В. Медведев**

АО «НПО Стеклопластик»

### **СНИЖЕНИЕ РАЗРЫВНОЙ НАГРУЗКИ КРЕМНЕЗЕМНОЙ ТКАНИ КТ-11-ТО В УСЛОВИЯХ ПОВТОРНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Тепловая изоляция из кремнеземных материалов широко применяется в качестве наполнителя высокотемпературных композитных материалов [1].

Целью работы является исследование снижения разрывной нагрузки кремнеземной ткани КТ-11-ТО при повторном термическом воздействии в диапазоне температур 500оС–800°С.

При выборе материалов для применения в системе тепловой защиты ответственного энергетического оборудования основным критерием служит температура длительной эксплуатации. В работе [2] показано, что в диапазоне температур от 380оС до 800°С предпочтение отдается текстильным материалам с высоким содержанием диоксида кремния (от 95 до 99%) из-за их подходящей низкой плотности и низкой теплопроводности. Отечественные высокотемпературные текстильные изделия с высоким содержанием диоксида кремния подразделяются на кварцевые (на менее 99,95% SiO<sub>2</sub>) и кремнеземные (не менее 94,5% SiO<sub>2</sub> и не менее 3,5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) материалы [3].

С целью изучения поведения термообработанных кремнеземных тканей в процессе эксплуатации при средневысоких температурах были проведены эксперименты по повторному термическому воздействию на ткань КТ-11-ТО. Исследование изменения разрывной нагрузки при термическом воздействии в кремнеземной ткани КТ-11-ТО проводилось в муфельном шкафу при температурах от 500оС до 800оС с шагом 100оС и выдержкой 60, 120 и 180 минут.

Проведенные исследования по установлению влияния повторной термообработки ткани КТ-11-ТО на ее разрывную нагрузку показали ее систематическое снижение с ростом температуры независимо от метода нагрева (монотонный нагрев или термоудар).

При монотонном нагреве ткани до 500 °С разрывная нагрузка снижается в среднем на 40% (основа) и 42% (уток), а при 800 °С – на 90% (основа) и 60% (уток). При термоударе до 600 °С снижение разрывной нагрузки незначительно, заметное снижение начинается после 700 °С (около 40% по основе и 30% по утку), достигая 70% (основа) и 42% (уток) при 800 °С. Влияние времени выдержки (60-180 мин) на снижение разрывной нагрузки в данном случае не выявлено, полученные значения разрывной нагрузки соответствуют коэффициенту вариации для кремнеземной термообработанной ткани КТ-11-ТО (около 25%).

### Список литературы

1. Тарасов В.А., Романенков В.А. Технологические основы снижения длительности цикла и повышения безопасности изготовления тепловой защиты спускаемых космических аппаратов/Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. №8. С. 35 — 43.

2. K. Keller, J. Antonenko. High-Temperature Insulations Thermal Control and Life Support Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands Deutsche Aerospace, Bremen, Germany. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet80/keller80.htm>.

3. АО «НПО Стеклопластик». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.npo-stekloplastic.ru/products/silica-fiber-materials/>.

### Е.С. Цобкалло, С.А. Попова, О.А. Москалюк

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОПОЛНИТЕЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), являясь гетерогенными структурами, позволяют создавать огромное количество комбинаций, состоящих из различных матриц (связующих) и наполнителей. Такие подходы являются основными для решения крайне востребованной задачи современного материаловедения - получения материалов с заранее заданным требуемым комплексом функциональных свойств. ПКМ по функциональному признаку можно разделить на конструкционные материалы, т.е. материалы с улучшенными механическими свойствами (прочностью, модулем жёсткости, ползучестью, релаксационными и другими свойствами) и материалы со специальными свойствами (тепловыми, оптическими, электрофизическими и другими). Одним из наиболее сложных направлений при создании полимерных композитов является создание их в виде волокон и нитей с заданным (регулируемым) уровнем свойств, что связано с выбором только определённого ограниченного числа полимерных материалов (волоконобразующих) и наполнителей, размеры которых должны быть существенно меньше размеров поперечного сечения волокон. В настоящей работе исследуются механические свойства

мононитей, полученных на основе полипропиленовой матрицы и углеродных нанонаполнителей [1,2]. Введение углеродных наночастиц различного вида (углеродные многостенные и одностенные нанотрубки, технический углерод, углеродные нановолокна) позволило получить мононити с требуемым комплексом электропроводящих свойств, которые могут быть использованы при производстве тканей для специальной одежды и СИЗ. Однако известно, что введение дисперсных наполнителей может существенно понизить прочность полученных композиционных материалов. Поэтому были проведены исследования прочностных характеристик полученных композитных волокнистых материалов. Показано, что на прочностные характеристики волокнистых композиционных материалов существенно влияет тип наполнителя, концентрация наполнителя, степень вытяжки мононити (полимерной матрицы). Проанализированы полученные закономерности и выбраны оптимальные значения концентраций углеродных нанонаполнителей для сохранения прочности и требуемых электрофизических свойств.

### **Список литературы**

1. Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A., Yudin V.E., Aleshin A.N. Influence of particle aspect ratio and ability to aggregate on electrical conductivity of fiber-forming polymer composites // *Physics of Complex Systems*. 2020. V. 1. N. 3. P. 99-107.
2. Tsobkallo E.S., Vol'nova D.V., Meshcheryakova G.P. Relationship of Mathematical and Structural Modeling of the Electrical Conducting Properties of Composite Filmfibers with Isotropic and Anisotropic Carbon Nanofillerse // *Fibre Chemistry*. 2020. V. 52. No. 3. P. 141-147.

### **А.Г. Макаров, Н.В. Переборова**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **МЕТОДОЛОГИЯ ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Решая задачу разработки методов цифрового прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов, следует учитывать, что основными деформационными процессами являются процессы релаксации и ползучести. Для определения энергии активации деформационных процессов необходима разработка математических моделей указанных процессов, параметры которых, а именно, времена релаксации и запаздывания в неявном виде содержат информацию об этой энергии [1].

Физический смысл времен релаксации и запаздывания - это минимальное время конформационного перехода - за которое условная "релаксирующая" или "запаздывающая" частица переходит из одного энергетического состояния в другое, преодолевая некоторый потенциальный энергетический барьер.

Авторами были предложены математические модели процессов релаксации и ползучести, основанные на вероятностном распределении Коши времен релаксации и запаздывания, что физически оправдано, т.к. указанное распределение обладает свойством аддитивности, т.е. сумма случайных величин, распределенных по закону Коши, также распределена по этому закону.

Для иллюстрации последнего положения, предлагается рассмотреть полимерную текстильную ткань, которая состоит из нитей, а те - из волокон. Экспериментальные исследования подтверждают, что сложные (составные) полимерные материалы в процессах релаксации и ползучести ведут себя подобным образом и указанные процессы могут быть описаны одними и теми же математическими моделями [2].

Вторым удобством вероятностного распределения Коши является его достаточно близкое сходство с нормальным распределением, на основе которого могут быть описаны многие физические закономерности [3].

И, наконец, третьим преимуществом распределения Коши является то, что его интегральная функция распределения представляет собой элементарную функцию нормированный арктангенс

$$\varphi_t = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b} \ln \frac{t}{t_1} \right), \quad (1)$$

в отличие от интеграла вероятности для нормального распределения.

Здесь в качестве аргумента выбрано безразмерное логарифмическое время  $\frac{t}{t_1}$  ( $t_1$  - некоторое значение базового времени),  $b$  - коэффициент интенсивности процесса релаксации или ползучести.

Элементарность указанной функции заметно упрощает аналитические преобразования при математическом моделировании релаксации и ползучести.

Простейшая модель процесса релаксации для случая постоянной деформации  $\varepsilon = \text{const}$  имеет вид

$$E_{ct} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \varphi_{ct}. \quad (2)$$

Здесь  $E_0$  и  $E_\infty$  - асимптотические значения модуля релаксации  $E_{ct} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon}$ ,

$\sigma_t$  - меняющееся во времени  $t$  напряжение.

Аналогично, простейшая модель процесса ползучести для случая постоянного напряжения  $\sigma = \text{const}$  имеет вид

$$D_{ct} = D_0 + (D_\infty - D_0) \varphi_{ct}, \quad (3)$$

Здесь  $D_0$  и  $D_\infty$  - асимптотические значения податливости  $D_{ct} = \frac{\varepsilon_t}{\sigma}$ .

Простейшая математическая модель релаксации (1), (2) имеет важное преимущество перед другими аналогичными моделями: она содержит наименьшее из возможных количество физически обоснованных параметров: три константы ( $E_0$ ,  $E_\infty$ ,  $b_\varepsilon$ ) и деформационно-временную функцию

$$f_{\tau_\varepsilon} = \ln \frac{t_1}{\tau_\varepsilon}, \quad (4)$$

характеризующую времена релаксации  $\tau_\varepsilon$ .

Аналогичное можно сказать и про математическую модель ползучести (1), (3). Она содержит также три физически обоснованных константы ( $D_0$ ,  $D_\infty$ ,  $b_\sigma$ ) и сило-временную функцию [14]

$$f_{\tau_{\sigma}} = \ln \frac{t_1}{\tau_{\sigma}}, \quad (5)$$

характеризующую времена запаздывания  $\tau_{\sigma}$  [4].

Из анализа применимости рассмотренных простейших математических моделей релаксации и ползучести для аналитического описания реологических свойств полимерных материалов и последующего расчетного прогнозирования нагруженных или деформируемых состояний этих материалов следует достаточная надежность и технические удобства. Благодаря наименьшему количеству параметров - характеристик, простоте их определения из кратковременных экспериментов, ясности их физической интерпретации, развиваемые методы представляются перспективными не только для полимеров, но и для ряда других твердых материалов [5].

Таким образом, были предложены методы цифрового прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов, к которым, в первую очередь относятся процессы релаксации и ползучести.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

#### **Список литературы**

1. Макаров А.Г., Егоров И.М. Применение методов качественного анализа деформационно-релаксационных свойств морских полимерных канатов при организации их производства // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2020. № 2. С. 35-44.
2. Макаров А.Г., Бусыгин К.Н. Качественная оценка эксплуатационных свойств арамидных текстильных материалов - основа улучшения их функциональности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2020. № 2. С. 133-143.
3. Макаров А.Г., Киселев С.В., Козлов А.А., Зурахов В.С. Разработка методов математического моделирования и численного прогнозирования релаксационно-деформационных процессов полимерных волокнистых материалов повышенной точности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2020. № 3. С. 19-32.
4. Макаров А.Г., Демидов А.В. Определение упругих, вязкоупругих и пластических компонент деформации полимерных волокнистых материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 37-39.
5. Демидов А.В., Макаров А.Г. Прогнозирование деформационных режимов эксплуатации полимерных волокнистых материалов в условиях переменной температуры // Химические волокна. 2022. № 2. С. 54-57.

**Е.С. Цобкалло<sup>1</sup>, А.Ф. Тихомиров<sup>2</sup>, С.В. Гладков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОМПОЗИТАХ ПОЛИМЕР-ПОЛУПРОВОДНИК**

Системы полимерный диэлектрик – электропроводящий наполнитель нашли широкое применение в различных областях техники. Однако регулирование электропроводности таких систем возможно лишь путем изменения концентрации электропроводящего наполнителя. Однако в системах диэлектрик – наполнитель с нелинейной полевой зависимостью проводимости от напряженности электрического поля может существовать две возможности порогового (скачкообразного) изменения удельного электрического сопротивления  $\rho$ . Первая - при изготовлении ПКМ – вследствие формирования в структуре материала бесконечного кластера (БК) из полупроводника; вторая – при повышении напряженности внешнего электрического поля в образце с уже сформированной структурой, т.е. постоянными концентрациями полупроводящего наполнителя ( $X_1$ ) и полимера ( $X_2$ ). Это расширяет диапазон для регулирования электрических характеристик ПКМ.

В электротехнике находят применение элементы, сопротивление которых нелинейно зависит от величины приложенного электрического напряжения – варисторы. С увеличением напряженности поля сопротивление материала варисторов на несколько десятичных порядков падает, варистор «открывается» и, таким образом, защищает цепь от перегрузки. Среди полупроводников самый высокий коэффициент нелинейности вольт-амперных характеристик (ВАХ) имеет оксид цинка ZnO, что и определило его широкое использование при изготовлении варисторов. Однако керамические варисторы обладают рядом недостатков, в частности – относительно низким удельным сопротивлением  $\rho$  в «закрытом» состоянии ( $10^9$  Ом.м), частично шунтируя вход защищаемого устройства.

Исследование ПКМ на основе фторопласта-4 и порошка оксида цинка ZnO, полученного путем размельчения керамического варистора показало [1], что в области концентраций наполнителя ниже концентрационного порога протекания ( $X_1 < 25\%$ ) ПКМ является хорошим диэлектриком с  $\rho \sim 10^{11} - 10^{12}$  Ом.м в области напряженности электрического поля  $E < 1,10^6$  Ом.м. При дальнейшем увеличении  $E$  происходит плавное снижение удельного электрического сопротивления в соответствии с теорией эффективной среды. В области концентраций выше порога протекания имеет место варисторный эффект:  $\rho$  материала в диапазоне  $E = (1,10^6 - 5 \cdot 10^6)$  Ом.м падает на 6-8 десятичных порядков в зависимости от концентрации  $X_1$  частиц наполнителя, формирующими «проводящий» кластер.

Дальнейшие исследования показали, что нелинейный характер имеют также и концентрационно-полевые зависимости диэлектрической проницаемости ПКМ, определенные на частоте  $f = 50$  Гц. Эта зависимость тем более ярко выражена, чем выше концентрация полупроводника в материале.

### **Список литературы**

1. Тихомиров А.Ф., Цобкалло Е.С. Полимерные композиционные материалы с нелинейными эффектами проводимости // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения: Материалы XX Международной научно-практической конференции. Нальчик: Издательство «Принт-Центр». 2024. С. 298.

**К.С. Кириш, П.П. Власов**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **МАГНЕЗИАЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ**

Ежегодно в мире накапливается огромное количество твердых бытовых отходов (ТБО), в одном только Санкт-Петербурге образуется около 17 млн м<sup>3</sup>, причем из них около 20 тыс. т приходится на золу, образовавшуюся при сжигании осадков сточных вод. В качестве эффективного матричного материала для иммобилизации техногенных отходов может быть применена магнезиально-минерально-солевая композиция (ММСК). ММСК иногда называемое в литературе магнезиальным цементом, представляет собой двухкомпонентное связующее, которое получают при смешении оксида магния с водным раствором хлорида или сульфата магния. Первоначально образуется неустойчивое (метастабильное) соединение  $5\text{MgO}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 13\text{H}_2\text{O}$ , постепенно переходящее в результате перекристаллизации в стабильный продукт  $3\text{MgO}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ . По сведениям А. Я. Вайвады высокий уровень активности MgO, который обожжен при 700-750 °С, достигается тем, что он имеет большое число атомных дефектов.

В качестве не меняющейся добавки в составе ММСК был использован шунгит в размере 3 % масс от массы вяжущего. При добавлении шунгита увеличиваются прочностные свойства цемента за счет мелкодисперсных частиц, которые являются центрами кристаллизации магнезиально-гидроксидных цепочек, которые укрепляют кристаллизационный каркас композиции.

Для определения влияния техногенных отходов на прочность и водопоглощение были изготовлены образцы с содержанием 20, 40 % золы или металлургического шлака. Образцы, содержащие в своем составе золу, имели наивысшие показатели прочности, превосходящие образец основного состава без наполнителей. По мере увеличения содержания металлургического шлака в композиции прочность снижалась. Высокую прочность показал образец с содержанием 40 % металлургического шлака и 20 % золы.

В качестве структурирующей добавки был исследован железный купорос, количество которого составляло 5 % от массы вяжущего. Добавка незначительно уменьшила прочность композиции, но повысила водостойкость образцов. Алюмокалиевые квасцы также, как и в предыдущем случае уменьшали прочность образцов, однако, водопоглощение значительно снизилось. Введение железоаммонийных квасцов в композицию снизило прочность аналогично предыдущим добавкам. Как и в случае с другими добавками за первые сутки происходит увеличение массы образцов на 1-3 %. Надо отметить, что образцы, содержащих золу, уменьшают водопоглощение в 3 раза.

При испытании образцов на водопоглощение в первые сутки происходит скачек массы. В результате этого образец набирает от 1 до 3 % массы, затем происходит ее некоторое уменьшение. Такой эффект происходит в результате диффузии воды в микропоры кристаллической решетки ММСК. Микропоры образуются в результате попадания воздуха при приготовлении смеси, а также в результате различной сингонии образовавшихся кристаллической структуры гидроксохлоридов магния и непрореагировавших компонентов смеси ММСК. Попавшая в пустоты вода вступает в химическую реакцию с непрореагировавшими компонентами смеси, тем самым стабилизируется система по кристаллической воде. В результате высвобождается лишняя гигроскопическая влага, а кристаллическая остается, сформировав прочную структуру кристаллогидрата, что предотвращает последующее влагопоглощение.

**А.В. Труевцев, А.Э. Стариченкова**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЕТЧАТОГО ЭНДОПРОТЕЗА, ПОЛУЧАЕМОГО НА ДВУХФОНТУРНОЙ ОСНОВОВЯЗАЛЬНОЙ МАШИНЕ**

Настоящее исследование было проведено в рамках научно-технического сотрудничества кафедры технологии и художественного проектирования трикотажа СПбГУПТД и ООО «Линтекс» (Санкт-Петербург). Основные этапы разработки включали проектирование и получение экспериментальных образцов синтетического имплантата.

Одним из перспективных направлений использования трикотажных изделий в качестве материалов специального назначения является медицина. Трикотаж успешно применяется в хирургии системы кровообращения, гинекологии, ортопедии, герниологии, пластической, кардио- и других областях хирургии, а также для лечебно-профилактических целей и переливания крови.

К текстильным изделиям, используемым в хирургии, предъявляется комплекс требований, объединяющий их механические, физические, геометрические, химические и прочие свойства. Характер конкретных требований зависит от назначения изделий и продолжительности их использования. Правильный выбор материала имеет ключевое значение для успешного исхода операции. Осложнения, связанные с низким качеством протеза, могут скомпрометировать самую совершенную хирургическую технику. В последние годы современная хирургия становится в большей степени восстановительной благодаря достижениям химии высокомолекулярных соединений. Взаимодействие и взаимореакция между живой и неживой тканями полностью зависят от возможности протекания процессов регенерации, физико-химических свойств эндопротеза и его пористости.

Соединительная ткань, равномерно прорастающая сквозь отверстия сетчатых полотен, может достаточно сильно повысить первоначальную прочность протеза. Поэтому всестороннее изучение закономерностей вживления, постоянный поиск новых полимерных соединений, трикотажных структур, а также изменение физико-химических свойств текстильных изделий необходимы для выбора подходящего полимерного сырья, материала, его способов производства и сферы применения, установления структуры и пористости аллопластического изделия. Трикотажные полотна, и изделия - в особенности, обладают необходимыми для устанавливаемого эндопротеза свойствами, такими как прочность, относительная простота изготовления, хранения и стерилизации, пористость.

Двухребеночные рисунчатые трикотажные полотна являются распространенной разновидностью рисунчатых переплетений. Двухребеночные переплетения обладают меньшей растяжимостью, чем одноребеночные, и, следовательно, подвергаются меньшей деформации. Получение сетчатой малорастяжимой структуры является основным условием проектирования трикотажного полотна для изготовления эндопротезов. По требованиям медицины вырабатываемые полотна должны быть равномерными по толщине, не закручиваться по краям и не распускаться.

Основными основовязаными переплетениями, с использованием которых изготавливаются сетчатые эндопротезы являются филейные переплетения, а также главные и производные двухребеночные переплетения.

Привычным способом получения сетчатых эндопротезов является вязание на однофонтурной двухребеночной основовязальной машине. Однако развитие вязального

оборудования не стоит на месте, и поэтому есть возможность использования двухфонтурной шестигребеночной основовязальной машины фирмы “Santoni” («Сантони»). Усовершенствованные возможности оборудования в виде дополнительных гребенок, второй игольницы, а также компьютерного программного обеспечения позволяют разработать новые структуры и виды сетчатых имплантатов, а также расширить ассортимент сеток для внутреннего протезирования. Благодаря компьютерному программированию можно проектировать переплетения, устанавливая величину оттяжки, скорость вязания для каждого ряда полотна, а также регулировать натяжение всех навоев отдельно. Данное оборудование было специально сконструировано и настроено под синтетические монопилы с меньшим диаметром, что открывает дополнительные возможности для разработки более тонкого и легкого материала для протезирования.

Для дальнейшего проектирования частично рассасывающегося эндопротеза первоначальной целью является разработка основы из комбинированного основовязаного переплетения с использованием двух гребенок, которые, благодаря своему расположению, могут прокладывать нити сразу на две игольницы. Исходя из этой особенности оборудования было решено использовать такие основовязанные переплетения как шарме, атлас и комбинированные переплетения на их основе. В результате было получено несколько образцов разной структуры с крупными и мелкими ячейками, разной растяжимостью и разными свойствами.

Полученные образцы являются подходящей основой для дальнейшего подключения дополнительных гребенок, запрограммированных на другие переплетения и добавления в структуру рассасывающихся нитей с целью получения частично рассасывающегося сетчатого имплантата для внутреннего протезирования.

**Г.Д. Раков, Р.Ф. Витковская**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ**

В процессе горения неизбежно образуется целый ряд газов, которые часто содержат разнообразные соединения, включая оксиды азота и серы различного состава, бенз(а)пирен, диоксины, галогенные углеводороды, соединения некоторых тяжелых металлов и взвешенные вещества. В случае взвешенных веществ можно использовать различные методы механической очистки, которые относительно недороги (пылеулавливающие камеры, циклоны и т.д.). Однако для оксидов азота, серы и органических веществ необходимы специализированные методы очистки. Особенно привлекательным является метод каталитического дожигания, который предполагает проведение реакций на поверхности катализатора при повышенных температурах, в результате которых исходные загрязнители превращаются в нетоксичные или менее токсичные вещества.

Для экспериментального исследования процесса дожигания была разработана и изготовлена экспериментальная установка для изучения процессов каталитического окисления газов при повышенной температуре на поверхности гетерогенных катализаторов. Поскольку предполагается проводить эксперименты при температурах,

достигающих 1000 °С, то в качестве материала было выбрано кварцевое стекло, которое сохраняет стойкость даже при высоких температурах.

Реактор имеет конструкцию типа «труба в трубе»: трубка меньшего диаметра вставлена в трубку большего. Газ подается в межтрубное пространство через впаиваемую трубку, двигаясь там, он нагревается. Далее нагретый газ попадает во внутреннюю трубку через отверстия в ней (всего 4 отверстия, которые расположены по кругу на равном друг от друга расстоянии). После попадания во внутреннюю трубку газ двигается дальше, где контактирует с катализатором. Для загрузки катализатора один из концов внутренней трубки оставлен не запаянным. После контакта с катализатором газ отводится через специальную отводную трубку и подается на детектор.

Существенным преимуществом конструкции данного реактора перед другими является наличие во внутренней трубке ещё одной трубки, в которую помещается термопара, что позволяет лучше контролировать температуру в рабочей зоне реактора. Длина реактора позволяет газу хорошо прогреться и иметь заданную температуру в момент контакта с катализатором.

Поскольку предполагается проводить исследования над системой сложного состава, которая при окислении может давать различные продукты, то для мониторинга состава окисленного газа необходим детектор, который должен давать не только качественный, но и количественный состав сложной смеси. Данному требованию отвечает хроматографические методы. Для работы был выбран модернизированный хроматограф ЛХМ-8МД с детектором по теплопроводности, при этом есть возможность установки пламенно-ионизационного детектора, что позволит существенно повысить точность определения.

## **М.П. Смирнова, Е.В. Кудрявцева**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА БИОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРУДНОРАСТВОРИМОГО ПРЕКУРСОРА**

В последние годы разработка экономически выгодных и экологически безопасных методов получения металлических наночастиц привлекает значительное внимание из-за их применения в нанотехнологии, нанобиотехнологии и медицине. Особый интерес представляют методы синтеза с использованием биологически активных веществ как альтернатива химическим и физическим методам.

В настоящей работе исследуется биохимический способ получения стабильных коллоидных растворов наночастиц серебра, с применением экологически безопасных восстановителей и стабилизаторов.

При исследовании процесса синтеза наночастиц серебра с использованием аминокислоты L-лизина, которая является основной аминокислотой и имеет свободные amino- и карбоксильные группы, способные восстанавливать ионы до наночастиц, установлена возможность исключения дополнительного введения восстановителя и щелочного агента. В результате получены сферические наночастицы серебра размером 12 нм. Для получения стабильных коллоидных растворов наночастиц серебра синтез необходимо проводить в щелочной среде (рН = 10–12) при температуре 85–90°С. Применение ультразвуковой ванны мощностью 500/600 Вт позволило снизить

температуру синтеза до 70 °С и продолжительность – до 15 мин. В результате получены сферические наночастицы серебра размером 41 нм.

Одним из перспективных и пока недостаточно изученных подходов является получение наночастиц серебра путем химического восстановления из труднорастворимых соединений, например, сульфата серебра  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ , в водных растворах. Этот метод позволяет одновременно осуществлять твердофазное восстановление ионов металла в кристаллической решетке и их восстановление в растворе после растворения. Преимущества такого подхода заключаются в узком распределении размеров частиц и повышенной стабильности образованных коллоидных растворов. Кроме того, наночастицы, полученные с использованием труднорастворимых прекурсоров, демонстрируют улучшенные антибактериальные и антиоксидантные свойства, что делает их особенно перспективными для применения в медицине и фармацевтике [1].

В ходе реакции происходит постепенное изменение цвета раствора от бесцветного до золотисто-оранжевого и затем темно-коричневого. Спектры поглощения полученных коллоидных растворов были зафиксированы с использованием спектрофотометра УФ-6700. Исследуемые растворы показали экстинкцию при длине волны  $\lambda \approx 412$  нм (L-лизин) и  $\lambda \approx 420$  нм (L-гистидин), что свидетельствует о наличии наночастиц Ag в растворе.

*Научный руководитель: проф., доц., к.т.н. Буринская А.А.*

#### **Список литературы**

1. Галашина В.Н., Ерохина Е.В., Дымникова Н.С., Морыганов А.П. // Известия ВУЗов. Химия и хим. технология. 2016. Т. 59. №6. С. 112–117.

#### **А.А. Шарапова, Е.В. Кудрявцева**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

#### **ПОЛУЧЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (I)**

Наночастицы оксида меди (I) привлекают все больше внимания в научном сообществе благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. Они обладают высокой каталитической активностью, фотопроводимостью и антибактериальными свойствами, что делает их перспективными для применения в различных областях, таких как медицина, электроника и экологическая инженерия. В частности, их использование в качестве антимикробных агентов открывает новые возможности для развития инновационных технологий в области медицины.

Медь как микроэлемент играет ключевую роль в организме человека. Она участвует в процессах кроветворения (гемопоез), синтезе коллагена и функционировании иммунной системы. Суточная норма потребления меди для взрослого человека составляет примерно 1-2 мг. Недостаток этого элемента может привести к анемии, остеопорозу и нарушению работы сердечно-сосудистой системы. В связи с этим изучение и разработка медьсодержащих препаратов имеет важное значение для медицины и фармакологии.

Существуют различные методы получения наночастиц оксида меди (I), включая физические и химические. Химический синтез с получением стабильных коллоидных растворов считается наиболее эффективным и экономичным. Стабильные коллоидные растворы содержат равномерно распределенные наночастицы и предотвращают их агрегацию, что важно для сохранения их усиленных свойств.

В данной работе исследован химический метод синтеза с применением сульфата меди (II) пентагидрата в качестве прекурсора ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). Восстановление меди осуществлялось с помощью аскорбиновой кислоты, которая является мягким и экологически безопасным восстановителем. Для стабилизации наночастиц применялись 0,1%-ные водные растворы следующих стабилизаторов: поливиниловый спирт (ПВС), поливинилпирролидон (ПВП), полиэтиленгликоль – 1500 (ПЭГ–1500), желатин и альгинат натрия. Оптимальное значение pH среды поддерживалось в диапазоне 7-8, что является критическим фактором для формирования стабильных наночастиц оксида меди (I). Спектры поглощения синтезированных коллоидных растворов были зафиксированы с использованием спектрофотометра УФ-6700.

Результаты исследования показали, что полученные наночастицы оксида меди (I) обладают высокой степенью однородности и стабильности. Экстинкция наблюдалась при длинах волн  $\lambda \approx 450\text{--}500$  нм, что соответствует характерным пикам поглощения для наночастиц оксида меди (I). Цвет растворов изменялся от ярко-желтого до красно-багрового, что свидетельствует о формировании наночастиц оксида меди (I).

Разработанный метод позволяет эффективно синтезировать стабильные коллоидные растворы наночастиц оксида меди (I). Дальнейшие исследования направлены на создание новых материалов и препаратов с улучшенными характеристиками, которые могут быть использованы в медицине и фармакологии.

*Научный руководитель: проф., доц., к.т.н. Буринская А.А.*

**С.Д. Шагров, Р.Ф. Витковская, И.Н. Худяков**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **СИНТЕЗ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ КОМПЛЕКСОВ $\text{Fe}^{3+}$ С ПОЛИАМИННЫМИ ЛИГАНДАМИ**

Супрамолекулярные полиэлектролитные комплексы представляют собой сложные системы, состоящие из заряженных полимерных молекул, способных образовывать устойчивые комплексы с ионами металлов. В работе рассматривается технология получения растворимых супрамолекулярных полиэлектролитных комплексов состава  $\text{Fe}^{3+}$  с полиаминными лигандами.

Для изучения растворимости комплекса железа была изучена серия растворов, с различным соотношением растворителей диметилсульфоксид (ДМСО), ацетонитрил (АН) и зафиксированной массой навеской  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  – 1 мг и торговым полиамином. Выбор растворителей обусловлен необходимостью растворять комплекс и полимерный эпоксидный носитель.

ДМСО – полярный апротонный растворитель, имеет большую диэлектрическую проницаемость и высокую полярность. Ацетонитрил (АН) – органический растворитель.

Оба растворителя могут выступать в качестве мостиковых лигандов.

В ходе эксперимента установлено соотношение растворителей, при котором

достигалось полное растворение навески соли металла. Ни в одном из растворителей в чистом виде ни в смеси растворителей не зафиксировано полное растворение соли, кристаллы соли меняли цвет, вероятно из-за образования комплексов металл-растворитель.

Добавление амина к указанной смеси растворителей сопровождалось растворением кристаллов комплексов ДМСО-Fe и АН-Fe, с образованием комплексного соединения состава  $Fe(trien) \cdot n(DMSO) \cdot m(AN) \cdot c(NO_3)$ . Коэффициенты  $n$ ,  $m$ ,  $c$  численно не определены, в связи с полимерной природой образующегося комплекса.

Используемый амин является тетрадентатным лигандом и занимает 4 координационных положения с образованием 3-х пятичленных циклов. Координируемые аминогруппы относятся к лигандам сильного поля, что для  $d^5$  иона комплексообразователя соответствует октаэдрической конфигурации. Величина расщепления  $\Delta q$  провоцирует образование низкоспиновых комплексов.

Получены образцы нанесённого на волокно катализатора, содержащие до  $1,3 \cdot 10^4$  моль  $Fe^{3+}$  на 1 г. волокна.

Образцы испытаны в статических условиях на наличие каталитической активности в системе Краситель-Пероксид-Катализатор. Обнаружена незначительная потеря металла и обесцвечивание тестового раствора. В системах Краситель-Пероксид скорость обесцвечивания оказалась ниже, чем в присутствии катализатора.

**И.М. Егоров, А.А. Козлов**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Особую группу среди полимерных материалов, в частности, и двойного назначения, занимают арамидные текстильные материалы, обладающие, как повышенной жесткостью, так и рядом других уникальных свойств [1].

Арамидные текстильные материалы находят широкое применение в различных областях техники. Указанные материалы, обладающие большой термостойкостью и прочностью, относятся к классу вязкоупругих твердых тел.

Большая деформационная жесткость и огнестойкость арамидных материалов выгодно отличает их от полимеров других групп. Особый интерес представляет изучение деформационных свойств указанных материалов в области действия неразрушающих нагрузок, близких к условиям их эксплуатации [2].

Применение арамидных нитей в составе таких текстильных объектов, как бронежилеты, веревки в устройствах, обеспечивающих спасение людей из высотных зданий при пожаре, горноспасательное оборудование, пожарозащитное оборудование и др., накладывает особую ответственность и требовательность к качеству при проведении исследований их деформационных свойств.

Такие исследования возможны на основе математического моделирования вязкоупругости, включающего в себя построение соответствующих моделей. Актуальными задачами являются: прогнозирование процессов деформирования и восстановления, исследования на прочность и усадку, изучение релаксации и ползучести

[3].

Разработка численных методик прогнозирования деформационных процессов арамидных материалов позволяет решать задачи по системному анализу их свойств, исследовать взаимосвязи механических свойств со структурой, проводить целенаправленное технологическое регулирование свойств при разработке и производстве новых материалов, прогнозировать кратковременные и длительные механические воздействия.

Для сравнительного анализа и прогнозирования деформационных свойств арамидных текстильных материалов необходима разработка адекватной математической модели на основе физически обоснованного аналитического описания вязкоупругости.

Особую ценность имеет решение задачи прогнозирования деформационных процессов для таких материалов, когда помимо сопоставления их механических свойств, приходится учитывать условия их эксплуатации.

В основе исследования механических свойств и прогнозирования деформационных процессов арамидных текстильных материалов лежит математическое моделирование вязкоупругости на основе данных краткосрочного эксперимента на простую релаксацию или простую ползучесть.

Математическое моделирование вязкоупругости арамидных текстильных материалов проводилось на основе нормированной функции арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), которая положительно себя зарекомендовала при моделировании вязкоупругости текстильных материалов сложной макроструктуры [4].

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} \right) - \quad (1)$$

для процесса релаксации и

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right) - \quad (2)$$

для процесса ползучести.

Обоснованность выбора функции НАЛ заключается в том, что она характеризует вероятностное распределение Коши, обладающее тем важным свойством, что распределение суммы случайных величин, подчиняющихся закону Коши, также подчинено этому закону.

Текстильные же объекты сложной макроструктуры типа тканей и шнуров можно считать условно состоящими из "суммы" объектов простой макроструктуры - нитей, моделирования релаксации и ползучести которых проводится также на основе функции НАЛ [5].

С учетом сказанного, математические модели релаксации (3) и ползучести (4) имеют вид :

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_{\infty}) \cdot \varphi_{\varepsilon t}, \quad (3)$$

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \cdot \varphi_{\sigma t}, \quad (4)$$

где

$t$  - время,

$1/b_{n\varepsilon}$  - параметр интенсивности процесса релаксации,

$1/b_{n\sigma}$  - параметр интенсивности процесса ползучести,

$\tau_{\varepsilon}$  - время релаксации (время, за которое "отрелаксирует" половина всех "релаксирующих" частиц при величине деформации  $\varepsilon$ ),

$\tau_{\sigma}$  - время запаздывания (время, за которое осуществится половина конформационных переходов "запаздывающих" частиц при величине напряжения  $\sigma$ ),

$E_{cr} = \sigma/\varepsilon$  - модуль релаксации,

$E_0$  - модуль упругости,

$E_\infty$  - модуль вязкоупругости,

$D_{cr} = \varepsilon/\sigma$  - податливость,

$D_0$  - начальная податливость,

$D_\infty$  - предельная равновесная податливость,

$\varepsilon$  - деформация,

$\sigma$  - напряжение.

Использование нормированной функции НАЛ в качестве основы математической модели вязкоупругости, позволяет с достаточной степенью точности моделировать деформационные свойства арамидных текстильных материалов.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### Список литературы

1. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Овсянников Д.А. Цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 5-10.

2. Чалова Е.И., Переборова Н.В. Математическое моделирование эксплуатационных процессов полимерных парашютных строп // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 19-26.

3. Переборова Н.В. Инновационные методы контроля качества и функциональности полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 27-32.

4. Переборова Н.В. Цифровое прогнозирование деформационных режимов эксплуатации полимерных волокнистых материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 18-21.

5. Переборова Н.В. Разработка критериев цифровой качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2. С. 93-98.

**А.С. Аветисян**

Иркутский национальный исследовательский технический университет

## **ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫЙ ALSiC: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА НАДЕЖНОСТЬ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Увеличение удельной мощности в современных IGBT-схемах приводит к уменьшению площади теплового контакта между кристаллом и излучателем, что отрицательно сказывается на тепловом сопротивлении. Стандартные медные подложки имеют кривизну и могут быть повреждены, что приводит к перегреву и выходу из строя полупроводниковых элементов. Оптимальным решением является использование AlSiC в качестве радиатора, который обладает высокой теплопроводностью, низким тепловым расширением, низкой плотностью и механической прочностью. Однако рынок AlSiC в России недостаточно развит. Текущие исследования направлены на совершенствование технологии производства подложек из AlSiC в силовой электронике и преобразовательной технике. Эффективное отведение тепла от полупроводниковых кристаллов имеет решающее значение из-за высоких рабочих скоростей и повышенных требований к энергопотреблению. Разработка материалов с высокой теплопроводностью и низкой плотностью необходима для обеспечения оптимальной производительности, поскольку эффективная теплопередача зависит от толщины материала, его сопротивления и площади контакта. Пластины DBC улучшают рассеивание тепла за счет использования керамики с низким коэффициентом теплопередачи, улучшая распределение тепла в радиаторах. Тепло от силовых полупроводниковых приборов проходит через слои и достигает охладителя с помощью термопасты, что подчеркивает необходимость тщательного выбора материалов и дизайна для обеспечения термической стабильности. Медь и ее сплавы, хотя и широко используются для отвода тепла, обладают высоким термическим контактным сопротивлением (TCLR) и значительным весом, что приводит к тепловым нагрузкам при пайке и проблемам с кривизной поверхности, которые ухудшают качество паяного соединения и эффективность отвода тепла. Это часто приводит к необходимости установки нескольких плат DBC в силовые модули. После термоциклирования ухудшение внешнего вида припоя может привести к увеличению разницы температур, что может привести к повреждению полупроводников. Лучшим решением является использование алюминиевого сплава, армированного частицами карбида кремния (AlSiC), для радиаторов. TCLR от AlSiC эффективно сочетается с обычными диэлектрическими подложками, повышая прочность соединения и долговечность устройства при минимизации тепловых нагрузок. Его теплопроводность можно регулировать за счет изменения содержания кремния, что делает его легче и экономичнее композитов CuMo и CuW, обеспечивая при этом высокую теплопроводность, низкий TCLR, низкую плотность и высокую механическую прочность. Замена меди на AlSiC улучшает тепловые характеристики, уменьшает размер модуля, повышает устойчивость к термоциклированию и в три раза легче меди.

### **Список литературы**

1. Никитин Д.С. Получение объемных изделий из металлматричного композита Cu-SiC для энергоэффективных теплопроводящих систем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 7. С. 93-101. DOI 10.18799/24131830/2023/7/4072.

2. Евдокимов С.А. Способы соединения керамических композиционных материалов на основе SiC с керамическими и металлическими материалами (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3(68). С. 75-83. DOI 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.

**Е.Д. Подкопаева, Е.А. Новожилова**

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

## **ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ЭЛЕКТРЕТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИПРОПИЛЕНОВОГО ВОЛОКНИТА С V-СОДЕРЖАЩИМИ СТРУКТУРАМИ**

Полимерные волокнистые материалы находят широкое применение в качестве электретных фильтров для очистки газов от субмикронных твердых частиц. Как известно, химическое модифицирование полимеров по методу молекулярного наслаивания (МН) позволяет повышать эффективность электретных материалов [1].

Целью работы является изучение химических превращений полипропиленового волокнита (ППВ) при взаимодействии с парами  $\text{VOCl}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$  и влияния синтезируемых наноструктур на электретные характеристики композиционных материалов.

Химическую модификацию ППВ осуществляли в установке МН проточного типа последовательной обработкой матрицы парами  $\text{VOCl}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в токе осушенного воздуха при  $80^\circ\text{C}$ . Хемосорбцию реагента на ППВ осуществляли в течение 10, 20 и 30 мин. Установлено, что после обработки ППВ парами оксохлорида ванадия в течение 10 мин содержание ванадия достигает 0,057 ммоль/г, и при последующем пропускании паров галогенида концентрация незначительно возрастает до максимального значения – 0,065 ммоль/г. Для выбора наиболее вероятных химических превращений оценивали изменение свободной энергии Гиббса ( $\Delta G$ ) в химических реакциях в зависимости от температуры с привлечением аппарата квантово-химического моделирования. Квантово-химические расчеты проводили с использованием программного пакета Gaussian®16 на уровне теории B3LYP/6-31G(d,p) [2]. Установлено, что взаимодействие паров  $\text{VOCl}_3$  с поверхностными ОН-группами на третичных атомах углерода в макромолекулах ППВ является наиболее энергетически выгодным процессом.

Электретное состояние в образцах формировали на воздухе при помощи зарядки в положительном коронном разряде в течение 30 с до начального потенциала +2000 В. Исследование электретных характеристик оценивали методом термостимулированной релаксации поверхностного потенциала (ТСРПП) с последующим моделированием энергетических спектров ловушек заряда с помощью программы «Виртуальный эксперимент 2.5» (рег. № RU 2016612794) [3]. Установлено, что химическое модифицирование ППВ парами  $\text{VOCl}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$  приводит к улучшению электретных характеристик по сравнению с немодифицированным образцом, при этом увеличение концентрации ванадия, фактически, не способствует сильному изменению стабильности электретного состояния. Исходный ППВ обладает двумя группами ловушек заряда на поверхности с энергией активации 0,75 и 0,99 эВ. Для V-содержащих образцов наблюдается формирование новой группы ловушек энергией активации 0,85 эВ, предположительно, представляющих собой V-оксидные структуры, сформированные в результате химического модифицирования ППВ.

### Список литературы

1. Новожилова Е.А., Малыгин А.А., Рычков А.А. и др. // Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94. № 6. С. 767-777.
2. Lamparska E. // ChemPhysChem. 2006. Vol. 7. No. 11. P. 2366-2376.
3. Темнов Д.Э., Кожевникова Н.О., Иванова Н.В. и др. // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2006. № 15. С. 192-201.

### О.В. Семенуха, С.Ю. Воронина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ: РОЛЬ ВЯЗКОСТИ, КОНЦЕНТРАЦИИ И СПОСОБОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ

Технологические применения электропроводящих нанокompозитов варьируются от аэрокосмической и электронной до биомедицинской [1]. На электрическое сопротивление создаваемого нанокompозиционного материала оказывает влияние способ диспергирования наполнителя в полимерной матрице. Следовательно, при помощи данного фактора можно варьировать физико-механические и другие эксплуатационные характеристики нанокompозиционного материала. Знание особенностей параметров способа диспергирования способствует управлению характеристиками композита: распределение наполнителя по объему полимерной матрицы, улучшению их смачивания и адгезии, что в свою очередь определяет электрические характеристики нанокompозиционного материала.

Целью данной работы является определение влияния технологических параметров на получение электропроводящего материала на основе полидиметилсилоксана (ПДМС) с наномодификатором. Были решены следующие задачи:

- исследование влияния концентрации наполнителя на величину электрического сопротивления материала;
- оценка реологических свойств смеси для создания материала.

Был изготовлен ряд образцов с различным содержанием электропроводящего наполнителя в нанокompозиционном материале. Композит состоял из ПДМС и проводящего наполнителя концентрата из одностенных УНТ. Образцы нанокompозита изготавливались разными способами диспергирования:

- одностадийным - ультразвуковая обработка;
- одностадийным - механическая обработка;
- двухстадийным: совместная механическая и ультразвуковая.

Выявлено, что при изготовлении образцов материала по двухстадийной технологии увеличение концентрации наполнителя от 1 до 2,5 масс.% приводит к уменьшению значения удельного электросопротивления материала от 5 до 40 Ом×м. При концентрации наполнителя 0,5 масс.% значение удельного электросопротивления разработанного материала отличалось значительно (на два порядка) от других образцов и составило 1600 Ом×м.

По результатам реологической оценки показано, что использование наполнителя для модификации ПДМС приводит к значительному увеличению вязкости при

добавлении наполнителя в количестве 2 масс. % и более.

### **Список литературы**

1. Жуков В.И. Молоканов Г.О., Кириченко С.О., Москалюк О.А. Гибкие электропроводящие системы на основе силикона и углеродных высокодисперсных наполнителей для нейроустройств // LIFT Школа молодого нейротехнолога: тезисы участников конференции (26–27 апреля 2024 г.). Общество с ограниченной ответственностью «Квант Медиа», 2024. С. 170-172.

### **В.В. Васильева, А.А. Шрайнер, Е.С. Цобкалло**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ПЛЕТЁНЫХ ЭНДОПРОТЕЗОВ**

Широко используемым материалом при создании хирургических эндопротезов является полипропилен (ПП). Применение в медицине полипропилена связано с определёнными свойствами этого материала, важнейшими из которых является не подверженность деструкции и гидролизу в физиологических активных средах в процессах жизнедеятельности организма; необходимая термостойкость для стерилизации. Несмотря на разнообразный ассортимент полипропиленовых плетёных эндопротезов, выпускаемых российскими и зарубежными производителями [1], в научной литературе существует лишь немногочисленные результаты, связанные со сравнительным анализом функциональных свойств этих материалов. Механические свойства хирургических эндопротезов являются одними из основных функциональных свойств среди которых наиболее значимыми результатами являются значения прочности и эластичности в двух режимах – в режиме активного растяжения и тест продавливания шариком материала, закреплённого по окружности. Наиболее приближенным к реальным условиям функционирования хирургических эндопротезов является определение механического поведения материала в режиме продавливания шариком.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования плетёных эндопротезов российских и зарубежных фирм в режиме продавливания шариком. Исследовались образцы материалов, различающихся поверхностной плотностью, имеющие различные плетения, однослойную (только полипропиленовая сетка) и двуслойную структуру. Проведён сравнительный анализ механических свойств материалов, имеющими как общие, так и различные структурные особенности. В работе представлен анализ значений прочности при продавливании материалов в зависимости от поверхностной плотности, типа плетения, фирмы производителя, которая является важнейшей функциональной характеристикой этих материалов. Другой важнейшей характеристикой механических свойств синтетических эндопротезов является растяжимость, которая оценивается по величине значения прогиба в режиме продавливания материала шариком, и которая была экспериментально определена для всех видов исследуемых хирургических эндопротезов. Проведен сравнительный анализ полученных результатов механических свойств полипропиленовых плетёных эндопротезов различной поверхностной плотности в режиме продавливания шариком при испытании отечественных материалов и их зарубежных аналогов. Показано, что

прочностные свойства полипропиленовых сетчатых эндопротезов, изготовленные отечественными производителями не уступают зарубежным аналогам. Полученные результаты могут быть рекомендованы специалистам при выборе наиболее подходящего материала в хирургической практике.

### Список литературы

1. Шрайнер А.А., Цобкалло Е.С., Агапов М.А., Какоткин В.В., Москалюк О.А. Плетеные хирургические сетчатые эндопротезы, представленные на российском рынке. Обзор // Известия ВУЗов. ТЛП. 2024. № 3. DOI: 10.46418/0021-3489\_2024\_67\_03\_08\_(ВАК).

**Ю.Б. Терес, Р.А. Зильберг**

Уфимский университет науки и технологий

### **КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА Ni(II) КАК ХИРАЛЬНЫЙ СЕЛЕКТОР ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОГО СЕНСОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНАНТИОМЕРОВ АТЕНОЛОЛА**

Среди популярных методов контроля качества энантиомерной чистоты лекарственных препаратов, наиболее перспективным считаются электрохимические, в частности, вольтамперометрия с применением энантиоселективных вольтамперометрических сенсоров (ЭВС). Для создания энантиочувствительного слоя сенсора применяются различные хиральные селекторы, которые должны обеспечивать достаточную селективность и чувствительность ЭВС [1]. Благодаря простоте получения и разнообразию получаемых соединений, особый интерес среди хиральных селекторов представляют комплексы переходных металлов с органическими хиральными лигандами [2].

При создании ЭВС для распознавания и определения энантиомеров атенолола (Атн) был проведен ряд экспериментов на пастовых электродах из графитированной термической сажи CarbolblackC (СВРЕ) с различными комплексными соединениями Ni(II), используемых в качестве хиральных селекторов. Сенсор СВРЕ@(S)-Ni1 показал наилучшие результаты энантиораспознавания аналитов: коэффициент энантиоселективности ( $i_{ps}/i_{pR}$ ) составил 1.60, а разность потенциалов окисления ( $\Delta E_p$ ) – 20 мВ. Регистрация вольтамперграмм проводилась в квадратно-волновом режиме (КВВ). Линейная зависимость КВВ сохраняется в концентрационном диапазоне 100-1000 мкМ с пределами обнаружения (LOD) 2.76 и 4.51 мкМ и нижними границами определяемых концентраций (LOQ) 9.23 и 15 мкМ для S- и R-Атн, соответственно. Аprobация сенсора с использованием метода «введено-найдено» в тестовых образцах и образцах с биоматериалом показала точные (правильность 98.1-102.1%) и воспроизводимые (относительное стандартное отклонение  $\leq 4.1\%$ ) результаты. При обнаружении энантиомеров Атн (1000 мкМ) в их смеси на полученных КВВ токи пика увеличиваются линейно, а потенциал окисления смещается в отрицательную область при увеличении содержания S-Атн, что свидетельствует о способности сенсора СВРЕ@(S)-Ni1 определять энантиомеры Атн как в рацемической смеси, так и в смеси с преобладанием одного из энантиомеров. Для изучения стабильности сенсор СВРЕ@(S)-Ni1 хранили на протяжении 20 суток в холодильнике (4°C) и регистрировали КВВ каждые 5 дней. По истечении 20 дней энантиоселективность сенсора снизилась на ~1.3% по сравнению с

первоначальным значением, что свидетельствует о высокой стабильности данного сенсора.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00340, <https://rscf.ru/project/23-23-00340/>**

#### **Список литературы**

1. Майстренко В.Н., Евтюгин Г.А. Энантиоселективные сенсоры. М.: Лаборатория знаний, 2023. 259 с.
2. Chiral octahedral cobalt(III) complex immobilized on Carbolblack C as a novel robust and readily available enantioselective voltammetric sensor for the recognition of tryptophan enantiomers in real samples / R.A. Zilberg [et al.] // *Electrochim. Acta*. 2024. V. 492. P. 144334.

**Е.Д. Жужа, Е.В. Дяговец, Т.В. Огнева**

Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко

### **ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ**

Для решения актуальных проблем экономики необходимо создавать новые и совершенствовать уже имеющиеся в арсенале технологии обработки различных полимерных материалов для улучшения их эксплуатационных качеств, таких как: прочность, термостойкость, эластичность и др. Кроме этого, в настоящее время важно адаптировать температурные диапазоны технологических процессов с целью экономии энергетических ресурсов. Все это становится возможным, если воздействовать на свойства полимеров ионизирующими излучениями.

При воздействии ионизирующего излучения высокой энергии в полимерах происходят глубокие структурные и химические изменения. В зависимости от интенсивности излучения, можно изменять свойства полимеров, поскольку молекулы полимера переходят в возбужденное состояние, после чего возможно: поперечное сшивание макромолекул; деструкция полимеров; изменение количества и характеристик двойных связей; окисление при наличии доступа кислорода. Такие реакции не являются цепными. Тип реакций зависит от строения вещества. Чаще всего процессы деструкции и сшивания происходят одновременно, один из них может преобладать. Действие радиации может быть более эффективно в присутствии кислорода воздуха или при повышении температуры.

Иницируемая ионизирующим излучением цепная реакция полимеризации органических мономеров (этилена, триоксана, фторолефинов, акриламида, стирола и др.), приводит к образованию разных полимеров. Многие из них обладают ценными свойствами, которые не приобретаются при других методах синтеза (большим молекулярным весом). В свою очередь, действие радиации на полимеры может приводить к улучшению их физико-химических свойств.

Изделия из политетрафторэтилена (ПТФЭ) облучали  $\gamma$ -квантами при повышенной температуре в расплаве в инертной среде [3] до поглощенной дозы 5-35 Мрад с понижением температуры изделия в процессе облучения на 0.8-1 град/Мрад, поддерживая температуру изделия ниже температуры плавления ПТФЭ, но выше температуры его кристаллизации.

Радиационно-химический способ получения люминесцирующего ПТФЭ, [2] состоит в том, что блочное или пленочное изделие из ПТФЭ подвергают обработке  $\gamma$ -лучами со средней энергией 1.25 МэВ при температуре выше температуры плавления кристаллической фазы, в присутствии паров воды с давлением 10-21 мм рт.ст. и мощности поглощенной дозы 1-5 Гр/с до поглощенной дозы 200 кГр. Данные показали качественное изменение структуры материала и, как следствие, его физико-химических свойств.

Нанокomпозиционный антифрикционный и уплотнительный материал на основе ПТФЭ с ультрадисперсным алмазосодержащим наполнителем (1-5 %), модифицировали обработкой его проникающими  $\gamma$ -лучами (поглощённая доза не более 200 кГр) в области температур выше точки плавления в подобранной газовой среде, что привело к улучшению эксплуатационных характеристик [1].

### Список литературы

1. Нанокomпозиционный антифрикционный и уплотнительный материал на основе политетрафторэтилена: пат. № 2467034 РФ, С08J7/18, С08J5/16, С08J3/28, В82В3/00, С08F2/46, С08L27/18 / С.А. Хатипов, Д.И. Селиверстов, Ю.Р. Жутаева, А.В. Терешенков, Е.М. Конова, Н.В. Садовская, А.П. Кошечев; заявитель ФГУП НИФХИ им. Л.Я. Карпова – № 2011135280/04; заявл. 24.08.2011; опубл. 20.11.2012 // Бюл. № 32 / Фед. служба по интел. собств. 2012.

2. Радиационно-химический способ получения люминесцирующего фторопласта-4: пат. № 2414488 РФ, С08J7/18, С09К11/06 / Артамонов Н.А., Хатипов С.А.; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова» – № 2006136157/05; заявл. 13.10.2006; опубл. 20.03.2011 // Был. № 12 / Фед. служба по интел. собств. 2011.

3. Способ терморadiационной обработки изделий из политетрафторэтилена: пат. № 2211228 РФ, С08J3/28, С08F2/46 / Хатипов С.А., Сичкарь В.П., Воронина Е.Н., Иванченко В.К., Соболев Г.П., Брук М.А.; заявитель Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова; заявл. 20.02.2001; опубл. 27.08.2003 / Фед. служба по интел. собств. 2003.

**К.В. Набутова, М.В. Базунова, Г.С. Яхина**

Уфимский университет науки и технологий

### **РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА И АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ МИКРОСФЕР**

На сегодняшний день одним из перспективных направлений в области технологии полимеров является создание модифицированных материалов с различными наполнителями [1]. Композиционные материалы имеют ряд свойств и особенностей, которые отличают их от традиционных материалов. Для улучшения свойств полимера используют различные наполнители, как сферы, порошки, волокна, гранулы, так и листы, распределенные различным образом и в различных соотношениях с полимерной матрицей. Выбор дисперсного наполнителя связан с размерами его частиц, а главное с их распределением по размерам (полидисперсностью). Особенно важным является форма частиц и характер их упаковки. Введение рационального количества

минеральных и других наполнителей позволяет значительно улучшить комплекс физико-механических характеристик, снизить стоимость и расширить сырьевую базу полимерных композиционных материалов. В данной работе в качестве наполнителя для композитов на основе полипропилена использованы алюмосиликатные микросферы (5-30 %).

Полипропилен- термопластичный частично кристаллизующийся полимер, который довольно часто применяется при изготовлении изделий. Его популярность в использовании обусловлена его свойствами: благодаря химическому строению полипропилена возможна различная его конформация (изотактический, атактический, синдиотактический). Включение различных наполнителей в полипропилен оказывает влияние как на его переработку, так и на свойства получаемых изделий.

Проведение испытаний над композитами на ударную вязкость, статический изгиб и сжатие для улучшения его состава позволило установить, что введением алюмосиликатных микросфер можно незначительно изменять прочность и эластичность композиции. Более сильные изменения претерпевают значения модуля упругости и ударной вязкости.

Было выявлено, что между значениями ударной вязкости и модулем упругости при статическом изгибе существует зависимость: понижение значения модуля упругости при небольшом количестве добавляемого наполнителя соответствует увеличению ударной вязкости. И напротив, при повышенном содержании неорганических компонент, для которых характерно повышенная жесткость композиции, имеет место понижение ударной вязкости.

В ходе испытания было установлено, что композиции, включающие до 10% добавки полых алюмосиликатных микросфер, характеризуются улучшенными показателями: меньшей жесткостью и лучшей эластичностью, и незначительной потерей прочности.

Таким образом, данный состав может быть признан оптимальным и может быть рекомендован для изготовления пластиковых изделий бытового и технического назначения с пониженной плотностью.

**Исследование выполнено в рамках Договор № ЦПД-РФ-Н-5/24 на выполнение научно-исследовательских работ на тему «Полимерные материалы для трубопроводов тепловых сетей»**

#### **Список литературы**

1. Ксантос М. Функциональные наполнители для пластмасс. / пер. с англ. под ред. В.Н. Кулезнева. СПб.: Научные основы и технологии. 2010. 462 с.
2. Псянчин А.А., Захарова Е.М. Абдуллин М.И., Захарова В.П. Влияние алюмосиликатных и полых стеклянных микросфер на плотность материалов на основе полипропилена // Бутлеровские сообщения. 2023. Т.75. №8. С.34-40. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/23-75-8-34.

**А.Л. Калабин**

Тверской государственной технической университет

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕКУРСОРА ПАН ВОЛОКНА ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Из полиакрилонитрильных волокон получают высокопрочные высокомодульные углеродные волокна (УВ). В данной работе рассматривается первая стадия технологического процесса получения УВ, производства прекурсора ПАН волокна, так называемого «белого» волокна. Параметры технологических процессов определяют структурные параметры волокон, которые, в свою очередь, обуславливают все их свойства [1]. Представляется актуальным исследование гелеобразования из растворов полимеров с учетом влияния фазовой диаграммы в процессе нитеобразования [2].

Для математического описания гелеобразования предложена система уравнений, описывающая элонгационное течение неизотермической струи раствора полимера при фазовом разделении в ней, позволяющая одновременно рассчитывать, как кинематику и динамику движения струи с учетом реологических свойств каждой из фаз, процессы тепломассопереноса, наличие двухфазной слоистой структуры [2].

Исследование гелеобразования при формовании химических волокон [2] из растворов полимеров позволило определить основные количественные характеристики гелеобразования: время полного гелеобразования  $t_g$ ; временные стадии гелеобразования и их продолжительность  $t_g = t_0 + t_{cr}$ , где  $t_0$  - это время необходимое для того, что бы концентрация осадителя или температура в центре струйки  $r=0$  изменилась относительно начальной примерно на 1%;  $t_{cr}$  - продолжительность изменения этих величин от начальной до необходимой для гелеобразования; изменение текущей толщины геля во времени  $R_g(t)$ ; скорость изменения толщины геля во времени  $dR_g(t)/dt$ .

Можно говорить о некоторых закономерностях связи характеристик гелеобразования и структуры волокна. Так, скорость протекания гелеобразования обуславливает его однородность. В связи с этим представление о динамике развития процесса позволяет прогнозировать макро- и микроструктуру получаемого волокна. Поэтому представляет интерес анализ  $dR_g(t)/dt$  - скорости изменения толщины геля во времени, обусловленного только диффузией, и её отличия от термотропного механизма. Можно предположить, что при термотропном гелеобразовании структура волокна более однородна в поперечном сечении волокна, и соответственно оно более подходит для преобразования его в углеродное волокно.

Для численного моделирования выбран «мягкий» режим гелеобразования в системе полиакрилонитрил (ПАН) – диметилформамид (ДМФА) – вода при начальных концентрациях раствора ПАН – 20% + ДМФА – 80% и осадительной ванны ДМФА – 80% + вода – 20%. Полный набор данных в [2].

Определен режим гелеобразования при минимальной диффузии, при которой скорость гелеобразования почти постоянна, а зависимость толщины геля  $R_g(t)$  от времени близка к линейной. Диффузия мала, т.к.  $C_0 = 2\%$  – начальная концентрация осадителя в растворе полимера примерно равна  $C_{gn}$  концентрации гелеобразования при  $T_g = -10\text{ }^\circ\text{C}$  – температуре согласно фазовой диаграммы.

В допущении, что постоянная скорость протекания гелеобразования обуславливает однородность полимера определен режим, когда скорость гелеобразования почти постоянная, а зависимость толщины геля от времени близка линейной.

## Список литературы

1. Зябицкий А. Теоретические основы формования волокон. М.: Химия, 1979. 504 с.
2. Kalabin A. L., Pakshver E.A. Effect of Phase Diagram on Spinning of Chemical Fibers from Solution // Fibre Chem. January 2017. V. 48. Issue 5. P. 371–374.

**В.А. Азаров, Е.И. Пряхин**

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СОСТАВОВ В КАЧЕСТВЕ ГЛАДКОСТНЫХ ПОКРЫТИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

На настоящий момент потребность в природном газе неуклонно растёт [1], что вызывает необходимость ввода в разработку новых месторождений природного газа, которые преимущественно располагаются в районах Крайнего Севера. Эти районы характеризуются низкими отрицательными климатическими температурами. Кроме этого, газ с данных месторождений во многих случаях содержит повышенное содержание высокоуглеродных компонентов и неуглеводородных примесей. В данных условиях возникает необходимость повышения эффективности транспортировки природного газа наряду с защитой внутренней поверхности трубопровода от коррозионных повреждений. Эффективным способом решения данных проблем является использование внутренних гладкостных полимерных покрытий газопроводов. На данный момент в качестве таких покрытий используются эпоксидные [2]. Недостатком данных покрытий является рост их твердости и охрупчивание с течением времени в результате непрерывного процесса сшивки и полимеризации при действии отвердителя. В районах Крайнего Севера на данные покрытия дополнительное воздействие оказывают низкие климатические температуры, что грозит ускорением охрупчивания и потерей адгезии с дальнейшим отслоением.

Альтернативным вариантом является применение фторопластовых покрытий, известных своими защитными, гидрофобными и антифрикционными свойствами, а также хладостойкостью. Недостатком данных покрытий являются их низкие адгезионные свойства. Для повышения их адгезии к стальной поверхности с целью перспективы дальнейшего их применения на магистральных стальных газопроводах авторами был разработан способ предварительной подготовки стальной поверхности, включающий операции лазерной обработки и холодного фосфатирования [3].

В данной работе был проведён анализ свойств известных и широко применяемых эпоксидных покрытий, нанесённых на стальную поверхность, обработанную наиболее распространённым на данный момент пескоструйным методом, и предложенных авторами фторопластовых покрытий, нанесённых на поверхность, обработанную разработанным авторами методом. Результаты показали большую ударостойкость фторопластовых покрытий при нормальной и отрицательной температуре, а также их большую эластичность по сравнению с эпоксидными покрытиями. Более высокие механические характеристики фторопластовых покрытий позволяют судить о перспективности их применения в районах Крайнего Севера.

### Список литературы

1. Tsvetkov P.S., Fedoseev S.V. Analysis of project organization specifics in small-scale LNG production // Journal of Mining Institute. 2020. Vol. 246. P. 678-686. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.10>
2. Yang X.H. et al. Aerodynamic evaluation of an internal epoxy coating in nature gas pipeline // Prog. Org. Coatings. 2005. Vol. 54. № 1. P. 73–77. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2005.04.001>
3. Pryanin E. I., Azarov V. A. Increasing the adhesion of fluoroplastic coatings to steel surfaces of pipes with a view to their use in gas transmission systems. Chernye Metally. 2024. No. 3. P. 69-75. <https://doi.org/10.17580/chm.2024.03.11>

**А.П. Михайловская, И.В. Елохин, И.К. Васильев, А.А. Кузьменко**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **ОТХОДЫ ПОЛИЭФИРНОГО ВОЛОКНА КАК СЫРЬЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРЕФТАЛЕВОЙ КИСЛОТЫ**

Полиэфирные (ПЭ) волокна широко востребованы в различных отраслях промышленности: текстильная индустрия (одежда, игрушки, интерьерный текстиль), строительство (изоляционные материалы, тенты, геотекстиль), медицина (салфетки, хирургические нити, спецодежда). По данным Российского союза химиков внутреннее производство ПЭ волокна в 2023 г. составило 110 тыс. т. Однако накопление в окружающей среде отходов материалов из этого популярного синтетического волокна представляет экологическую проблему. Самый распространенный способ утилизации полимерных материалов на сегодня – это сжигание, которое приводит к выделению токсичных отходов серы и углерода. Поэтому ученые разрабатывают химические способы переработки изделий из полиэтилентерефталата (ПЭТФ): гликолиз, гидролиз, аминолиз, метанолиз и т.д. На наш взгляд наиболее перспективным способом переработки отходов ПЭ волокна является гидролиз полимера в водной среде. Этот процесс протекает в мягких условиях, а в результате можно получить терефталевую кислоту (ТФК) высокой чистоты, которая применяется для синтеза ПЭТФ. Стоит отметить, что на сегодняшний день ТФК получают окислением *n*-ксилола, а промышленные производства испытывают дефицит как в ТФК, так и в *n*-ксилоле.

Т. к. процесс гидролиза ПЭТФ протекает на разделе водной фазы и поверхности кристаллического полимера, требуется применение катализатора межфазного перехода. В качестве межфазных катализаторов обычно используют соли аммония (хлориды бензилтриэтиламмония и тетраоктиламмония), соли фосфония (хлориды трибутилтетрадецилфосфония и тетрафенилфосфония), краун-эфиры (15-краун-5). Ранее нами было установлено, что тепловая обработка волокна из ПЭТФ водными растворами галогенидов четвертичного аммония с длинным алифатическим радикалом (количество углеродов больше 12) вызывает изменения надмолекулярной структуры полимера. Таким образом, анализ литературы в области деструкции ПЭТФ в условиях щелочного гидролиза и межфазного катализа, а также полученные собственные экспериментальные данные определили цель настоящей работы, которая заключается в оценке каталитического действия галогенидов триметилалкиламмония в процессах щелочного гидролиза ПЭ волокна.

В качестве объектов исследования использовали нетканое иглопробивное полотно из ПЭ штапельного волокна и катализаторы – разные галогениды триметилалкиламмония, отличающиеся длиной жирного радикала. Щелочной гидролиз проводили в водном растворе гидроксида натрия при различном стехиометрическом соотношении полимера и щелочи с последующей нейтрализацией полученного раствора терефталата натрия 50%-ным раствором серной кислоты. Получение ТФК контролировали по ИК спектру. Эффективность каталитического действия галогенидов триметилалкиламмония оценивали по количественным характеристикам процесса (степень конверсии, выход ТФК на пропущенное и разложенное сырье, селективность).

Экспериментально установлено, что степень конверсии ПЭ волокна в результате его щелочного гидролиза в отсутствие катализатора межфазного перехода составляет не более 7 %. Использование соли аммония определенной структуры и соотношение элементарного звена полимера к гидроксид-аниону 2:5 позволяют провести процесс со степенью конверсии 97 % ПЭТФ, при этом выход ТФК составляет более 75 %.

**Е.С. Чистякова, С.В. Киселев**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

При исследовании релаксационных процессов полимерных текстильных материалов чрезвычайно полезным является проведение их спектрального анализа.

Времена релаксации полимерных текстильных материалов характеризуют времена перехода "релаксирующих" частиц макромолекул полимера из одного устойчивого энергетического состояния в другое. Характер таких переходов может быть различным.

Он обусловлен, как реологией полимерного текстильного материала, так и величиной приложенной деформации или нагрузки. Его можно объяснить, с одной стороны, конформационными энергетическими переходами внутри макромолекул материала, когда меняется их форма при перестроении, а с другой стороны - происходят сдвиги макромолекул друг относительно друга или другие изменения, порожденные энергетическими изменениями.

Наиболее удовлетворительные результаты при рассмотрении релаксационных процессов полимерных текстильных материалов можно получить при применении физической модели Максвелла [1].

Применение модельных представлений для точного количественного описания релаксации при исследовании свойств полимеров встречает определенные затруднения.

Различное эксплуатационное поведение полимеров, структурные изменения в процессе релаксации, зависящее от предыстории образца, температуры, продолжительности действия и величины приложенной деформации, затрудняют определение точных реологических характеристик процесса. Однако, целесообразность использования модельных представлений при качественном или приближенном количественном описании механических свойств не вызывает сомнений [2].

Одним из методов описания релаксационных процессов полимерных текстильных материалов является использование механических моделей. Рассматривая соотношения между различными релаксационными функциями, часто приходится иметь

дело со спектром времен релаксации.

Достаточно точные приближения спектра релаксации можно найти по обработке экспериментального семейства кривых релаксации. Нахождение спектра релаксации означает фактически нахождение распределения времён релаксации, которые не могут быть определены экспериментально [3].

Для определения аналитической формы спектра релаксации полимерных текстильных материалов воспользуемся вариантом математической модели релаксационного процесса в виде

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_0 \varphi'_{\varepsilon t - \theta} d\theta \quad (1)$$

где

$\varepsilon_t$  - деформация, зависящая от времени  $t$ ,

$\sigma_t$  - напряжение, зависящее от времени  $t$ ,

$E_0$  - модуль упругости,

$E_\infty$  - модуль вязкоупругости,

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + th \left( \frac{A_\varepsilon}{2} \cdot \ln \left( \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \right) - \quad (2)$$

релаксационная нормированная функция - основа математической модели релаксации,

$$\begin{aligned} \varphi'_{\varepsilon t} = \bar{r}_{\varepsilon t} &= \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial (\ln t)} = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t})} = \\ &= \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot (1 - th^2(W_{\varepsilon t})) = A_\varepsilon \cdot \varphi_{\varepsilon t} \cdot (1 - \varphi_{\varepsilon t}) - \end{aligned} \quad (3)$$

интегральное ядро релаксации,

$$W_{\varepsilon t} = \frac{A_\varepsilon}{2} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{A_\varepsilon}{2} \cdot \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right). \quad (4)$$

$A_\varepsilon$  - параметр интенсивности процесса релаксации,

$$f_{\varepsilon, \tau_\varepsilon} = \ln \left( \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) - \quad (5)$$

логарифмическая функция времен релаксации [16].

Аналитическую форму спектра релаксации  $\bar{H}_{\varepsilon t}$  можно найти по известной формуле [4]

$$\int_0^\infty \bar{H}_{\varepsilon t} \cdot e^{-tx} \cdot dx = \frac{d\varphi_{\varepsilon t}}{dt} = r_{\varepsilon t}, \quad (6)$$

путем последовательных приближений.

Формула (6) представляет собой преобразование Лапласа, в котором спектр релаксации  $\bar{H}_{\varepsilon t}$  играет роль оригинала, а ядро релаксации  $r_{\varepsilon t}$  - роль изображения в терминах операционного исчисления. Данная зависимость (6) получается на основе рассмотрения свойств обобщённой модели Максвелла [5].

Таким образом, был предложен метод проведения спектрального анализа релаксационных процессов полимерных текстильных материалов.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### **Список литературы**

1. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Овсянников Д.А. Цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 5-10.
2. Чалова Е.И., Переборова Н.В. Математическое моделирование эксплуатационных процессов полимерных парашютных строп // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 19-26.
3. Переборова Н.В. Инновационные методы контроля качества и функциональности полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 27-32.
4. Переборова Н.В. Цифровое прогнозирование деформационных режимов эксплуатации полимерных волокнистых материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 18-21.
5. Переборова Н.В. Разработка критериев цифровой качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2. С. 93-98.

**М.В. Абашкин<sup>1,2</sup>, А.П. Михайловская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

<sup>2</sup>ООО «МТС»

### **ВЫБОР СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ГИБКИХ ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ РУКАВОВ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРА**

Плоскосворачиваемые рукава для мобильных трубопроводных систем (МТС) состоят из внутреннего (герметизирующего), среднего (армирующего) и наружного (защитного) слоев. Внутренний и наружный слои изготавливают из термопластов, а в качестве армирующего слоя выступает тканевый каркас. В литературных источниках мало уделяется внимание способам получения такого вида продукции, несмотря на то, что технические характеристики рукавов напрямую зависят от способа их изготовления. Поэтому анализ известных способов получения плоскосворачиваемых рукавов с целью определения наиболее перспективного является необходимой частью научно-исследовательской работы по разработке технологии получения гибкого рукава из термопластичного полимера, армированного тканевым каркасом.

На сегодняшний день существует несколько способов получения плоскосворачиваемых рукавов, которые отличаются строением экструзионной фильеры (количеством камер давления для формирования внутреннего и наружного полимерных слоев) и изготовлением армирующего тканевого каркаса (производится либо заранее на круглоткацких станках, либо на оплеточных машинах экструзионной линии).

Первый способ представляет собой экструзию расплавленного полимера через заранее изготовленный тканевый каркас. Строение экструзионной фильеры предусматривает две камеры давления – в первой камере расплав полимера проходит через ткань и образует внутренний герметизирующий слой. Во второй камере расплав полимера распределяется по диаметру каркаса, образуя наружный защитный слой. Второй способ отличается от первого тем, что фильера имеет только одну зону давления, в которой происходит одновременное формирование и внутреннего, и наружного слоев. В третьем способе изготовление каркаса происходит непосредственно перед входом в экструзионную фильеру путем оплетки продольных нитей на дорне. При таком способе плотность намотки нити каркаса невысокая, и полимер легко проходит через ткань и образует внутренний слой, поэтому фильеры включают в себя только одну зону давления, аналогичную второму способу. Четвертый способ заключается в постадийном изготовлении каждого слоя – сначала при помощи первого экструдера происходит формирование внутреннего слоя (данный процесс схож с экструзией однослойных труб), затем при помощи оплеточных машин формируется армирующий слой, и только потом он покрывается наружным слоем.

Первые два способа позволяют получать рукава с высоким разрывным давлением и высокой адгезией слоев к каркасу за счёт использования различных вариантов плетения при производстве каркаса на круглоткацком станке. Рукава, полученные по третьему и четвертому способам, уступают по эксплуатационным характеристикам из-за низкой плотности намотки нити на оплеточных машинах. Еще одним преимуществом при изготовлении плоскосворачиваемых рукавов является возможность применения различных термопластичных полимеров для формирования внутреннего и наружного слоев, что характерно для первого и четвертого способов.

Таким образом, наиболее перспективным с точки зрения технических характеристик плоскосворачиваемых рукавов является первый способ, который и будет использоваться в дальнейшей работе.

**К.А. Антонова, А.П. Михайловская**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **БРОМИД ТРИЭТИЛОКТАДЕЦИЛАММОНИЯ: ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Четвертичные аммониевые соли (ЧАС) с жирным радикалом находят широкое применение в текстильной отрасли в качестве смягчителей, смачивателей, средств для антимикробной отделки, интенсификаторов крашения. Однако ассортимент российских ЧАС ограничен двумя-тремя веществами. Поэтому на кафедре химических технологий имени проф. А. А. Хархарова СПбГУПТД была оптимизирована технология синтеза галогенидов тетраалкиаммония и получен бромид триэтилоктадециламмония (ТЭОАБ), свойства которого не описаны в литературе. Цель настоящей работы – изучить свойства бромид триэтилоктадециламмония как текстильно-вспомогательного вещества и определить возможные области его применения.

На первом этапе работы определяли ККМ по графической зависимости поверхностного натяжения раствора ТЭОАБ от его концентрации. Измерение поверхностного натяжения проводили путем взвешивания капель. Согласно полученным данным, значение ККМ для ТЭОАБ составило 0,69 ммоль/л ( $\sigma = 0,074$  Дж/м<sup>2</sup>), что

согласуется с литературными значениями ККМ КПАВ схожей структуры (например, ККМ бромида триметилгексадециламмония составляет 0,92 ммоль/л).

Как известно, ЧАС устойчивы в широком диапазоне pH. Визуальная оценка (помутнение, расслоение) растворов ТЭОАБ в присутствии кислот и щелочей показала высокую устойчивость исследуемого КПАВ в широком диапазоне pH. Далее было осуществлено крашение хлопчатобумажной пряжи активным красителем с применением ТЭОАБ периодическим способом. Цветометрические показатели полученной окраски свидетельствуют о перспективности применения ТЭОАБ в качестве интенсификатора крашения текстильных материалов. Устойчивость ТЭОАБ в кислых и щелочных средах позволяет его использовать с разными классами красителей, например, с кислотными, где процесс осуществляется в присутствии кислот, или с активными, для закрепления которых на волокне требуется применение щелочных агентов. Для определения пенообразующей способности ТЭОАБ его водный раствор гомогенизировали (3500 об/мин, 2 мин), и определяли кратность полученной пены. Стабильность пены оценивали по степени ее разрушения через 30 мин. Установлено, что ТЭОАБ не обладает ярко выраженными пенообразующими свойствами, что также делает его удобным в применении для колорирования текстиля. Оценку эффективности смягчения по сравнению с необработанной тканью проводили органолептически. В случае с тканью из хлопка ощущали существенные изменения, что нельзя было сказать о капроновой и хлопколавансановой тканях. Для определения смачиваемости были использованы материалы: стекло, полипропиленовая пленка и полиэфирная ткань. Экспериментально установлено, что ТЭОАБ обладает высокими смачивающими свойствами. Так, стекло смачивается при концентрации равной ККМ, для полного смачивания полиэфирной ткани достаточно концентрации 0,069 ммоль/л (в 10 раз меньше ККМ). В заключение, была исследована возможность применения ТЭОАБ для фунгицидной отделки материалов из натуральных волокон. Полученные результаты показывают, что ТЭОАБ не защищает хлопковое волокно от действия штаммов плесневых грибов, но хорошо биоразлагается.

Таким образом, определены возможные области применения бромида триэтилоктадециламмония в технологиях отделки текстильных материалов.

### **А.С. Власова, А.П. Михайловская**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **ВЛИЯНИЕ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ СОЛЕЙ АММОНИЯ И ПИРИДИНИЯ НА НАКРАШИВАЕМОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ВОЛОКОН**

В настоящее время сохраняется актуальность поиска новых типов химических интенсификаторов крашения текстильных материалов на основе целлюлозы активными красителями. С одной стороны, активные красители за счет образования ковалентной связи с волокном позволяют получать окраски, устойчивые к стирке, трению и другим воздействиям. С другой стороны, они гидролизуются в водной среде. На кафедре химических технологий имени проф. А.А. Хархарова СПбГУПТД в качестве таких интенсификаторов изучаются четвертичные аммониевые соли. Установлено, что определяющим фактором в интенсификации крашения хлопкового волокна активными красителями монохлортриазинового и винилсульфонового типа является строение аммониевой соли, а именно наличие длинного алифатического радикала (например,

цетильного). К сожалению, все проведенные исследования посвящены изучению влияния солей аммония на процесс крашения целлюлозных волокнистых материалов, и совсем не изучена возможность применения в качестве интенсификатора алкилзамещенных солей пиридиния.

Таким образом, цель настоящей работы – сравнить интенсифицирующее действие галогенидов аммония и пиридиния, имеющего в своей структуре цетильный радикал, в процессах крашения различных целлюлозных волокон активными красителями.

В качестве целлюлозного материала использовали волокна хлопка, льна, крапивы и конопли. Крашение осуществляли красителем Reactive Red 198 периодическим способом по традиционной технологии с первоочередным введением в красильную ванну интенсификатора – хлорида N-цетилпиридиния или бромида триметилцетиламмония. Оценку полученных окрасок проводили в системе CIELab с использованием спектроколориметра RM200QC. Устойчивость окрасок определяли в соответствии с ГОСТ 9733.4–83 (к стирке) и ГОСТ 9733.6-83 (к поту). Степень ковалентной фиксации активных красителей рассчитывали по отношению оптической плотности растворённых в концентрированной серной кислоте окрашенных образцов хлопчатобумажной пряжи до их промывки и после промывки.

Полученные результаты исследования показали возможность получения высокоинтенсивных окрасок на волокнистых материалах из целлюлозы в результате их периодического крашения активным красителем с применением и бромида триметицетиламмония и хлорида N-цетилпиридиния. Высокая интенсивность окраски достигается за счет повышения степени ковалентной фиксации активного красителя на волокнообразующем полимере. Хлорид N-цетилпиридиния увеличивает сорбцию и фиксацию активного красителя в 3 раза (по сравнению с крашением без интенсификатора), но при этом на поверхности волокна образуются агрегаты соли с молекулами красителя, что проявляется в низкой устойчивости окраски к физико-химическим воздействиям.

## **Н.Е. Серова**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **РАЗРАБОТКА ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ КРАШЕНИЯ ХЛОПКОЛАВСАНОВОЙ ТКАНИ**

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения производства текстиля из смеси натуральных и синтетических волокон. Так, выпуск хлопколавсановых тканей составляет 55–60 % от общего объема производства смесовых тканей. Проблема окрашивания таких тканей заключается в противоположности структуры и свойств целлюлозных и полиэфирных волокон. Для решения этой проблемы необходимо разрабатывать низкотемпературные (не выше 100 °С) технологии колорирования с использованием интенсификаторов, обеспечивающих качественное окрашивание как полиэфирной, так и целлюлозной составляющей хлопколавсановой ткани. Ранее проведенные исследования позволяют предположить, что интенсификаторами такого универсального действия могут являться низкотоксичные четвертичные аммониевые соли (ЧАС). Таким образом, целью данной работы является оценка интенсифицирующего действия ЧАС и оптимизация технологического режима

однованного крашения хлопколавсановой ткани смесью дисперсных и активных красителей.

В работе использовали хлопколавсановую ткань; дисперсные (синий 3 и алый ПЭ) и активные (красный 5 В, синий Р5R) красители, ЧАС (хлорид бензилдиметилцетиламмония — ХБДМЦА, бромид бензилдиметилдодециламмония — ББДМДА, бромид триметилцетиламмония — БТМЦА). Хлопколавсановую ткань окрашивали периодическими и непрерывными способами по традиционным технологиям с оптимизацией температуры и продолжительности процесса. Показатели интенсивности и координаты цвета определяли с использованием спектроколориметра «Color I5» фирмы «Gretag Macbeth» в системе *CIE Lab* при стандартном источнике света D 65. Разрывную нагрузку и удлинение при разрыве ткани определяли в соответствии с ГОСТ 6611.2-73.

В результате эксперимента установлено, что применение БТМЦА и ХБДМЦА при крашении полиэфирного волокна дисперсными красителями обеспечивает равномерную и интенсивную окраску при температуре 95 °С при последовательном введении компонентов. Использование ХБДМДА при окрашивании хлопкового волокна активными красителями повышает степень ковалентной фиксации красителя на целлюлозе и обеспечивает устойчивость окраски к различным воздействиям. Таким образом, рекомендован интенсификатор ХБДМЦА.

Испытания различных методов крашения хлопколавсановых тканей (50:50) с рекомендуемым интенсификатором подтвердили эффективность периодической технологии однованного крашения с предварительной модификацией текстильного материала ЧАС и первичным окрашиванием полиэфирной составляющей. Образцы окрашенной хлопколавсановой ткани (хлопок: полиэфир — 50:50) демонстрируют высокую интенсивность окраски и устойчивость к стирке и трению.

Реализация разработанной технологии обеспечивает возможность окрашивания текстильных изделий на предприятии бытового обслуживания и характеризуется безопасностью производства для человека и окружающей среды.

**Ю.Ю. Вилачева, В.В. Марценюк, О.В. Асташкина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **РАЗРАБОТКА УГЛЕРОД-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С ФТОРОПЛАСТОВЫМИ МАТРИЦАМИ КАК КОМПОНЕНТОВ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

В настоящее время в мировой энергетике чётко обозначился курс на снижение потребления традиционных видов топлива на основе ископаемого сырья и поиск альтернативных источников энергии, среди которых следует выделить водородную энергетику, использующую возобновляемое экологически чистое водородное топливо.

Одним из перспективных электрохимических источников тока в водородной энергетике являются низкотемпературные топливные элементы с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ) [1]. Электрохимическая реакция окисления газообразного водорода происходит в мембранно-электродном блоке (МЭБ). В свою очередь, одной из функциональных единиц МЭБ является газодиффузионный слой (ГДС). ГДС предназначен для равномерного подвода реагентов (водорода и кислорода) к катализатору; эффективной электронной проводимости, а также отведения воды как

побочного продукта протекающей электрохимической реакции [2].

К ГДС предъявляется ряд требований: удельное электрическое сопротивление поперек плоскости не более 80 мОм/см<sup>2</sup>; толщина 200-300 мкм; общая пористость 50-90 %; поверхностная и объемная гидрофобность (краевой угол смачивания не менее 110° и водоупорность не менее 200 мм. вод. ст.) [1].

В ходе исследования получены ГДС в виде углерод-полимерных композитов (УПКМ) в виде бумаг на углеродных волокнистых основах с фторопластовой матрицей Ф-4Д 10 масс. % и графенами в качестве электропроводящих наполнителей в количестве 5 масс. % относительно полимера. У композитов были исследованы основные характеристики, значения которых составили: толщина 220 мкм, общая пористость 65 %, удельное электрическое сопротивление поперек плоскости 25 мОм/см<sup>2</sup>, краевой угол смачивания 140°, водоупорность 260 мм. вод. ст. Испытания разработанных материалов в составе МЭБ показали, что по электрическим характеристикам (плотность тока, выходная мощность установки) разработанные ГДС незначительно (на 10-15 %) уступают импортному аналогу – Toray. Максимум мощности обеих ячеек при температуре испытания 30 °С находится при плотности тока 147 мА/см<sup>2</sup>. Удельная мощность разработанных ГДС составляет 48 мВт/см<sup>2</sup>, а ГДС марки Toray – 63 мВт/см<sup>2</sup>. Напряжение на МЭБ, содержащем аналог, составляет 440 мВ, а на МЭБ с разработанными ГДС – 340 мВ.

Таким образом, разрабатываемые ГДС в виде УПКМ позволяют обеспечить достаточно высокую эффективность топливного элемента, достигающую уровня зарубежных промышленных аналогов.

### Список литературы

1. Vilacheva Yu.Yu. On Hydrogen Energy, the Global Market for Fuel Cells, and the Development of Domestic Gas-Diffusion Layers / Yu.Yu Vilacheva, V.V. Martsenyuk, O.V. Astashkina, [and others] // Fibre Chemistry. 2023. Vol. 55. P. 174-182.
2. Налимова С.С. Основы водородной энергетики / С.С. Налимова, М.Е. Компан, А.И. Максимов [и др.]. Санкт Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). 2010. 288 с.

### Н.А. Воронина, О.И. Гладунова

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### СВМПЭ ВОЛОКНА КАК ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УНИКАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Повышенный интерес к волокнам из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) объясняется их уникальными свойствами, такими как высокие удельные упруго-прочностные показатели, устойчивость к истиранию, невосприимчивость к действию влаги, низких температур и солнечной радиации, химическая инертность, а также прозрачность в широком диапазоне электромагнитного излучения [1].

Такое исключительное сочетание свойств позволяет создавать особые композиты для элементов высокотехнологичной техники, к которым предъявляются требования не только конструкционной прочности, но и высоких электрофизических показателей, а также стойкости к высокоскоростным нагрузкам. В связи с высокой ударостойкостью

СВМПЭ используется в составе средств бронезащиты. Химическая и биоинертность позволяют применять композиты на основе СВМПЭ для изготовления протезов.

За рубежом композиционные материалы (КМ) различного назначения на основе СВМПЭ волокон применяются уже давно, причем рост объемов производства поддерживается за счет государства и рассматривается как одно из условий обеспечения национальной безопасности [2].

Однако СВМПЭ волокна не лишены недостатков. Низкая поверхностная энергия и отсутствие ненасыщенных химических связей у СВМПЭ волокон являются основными причинами их слабой адгезии практически ко всем терморезактивным матрицам. Разрушение образцов КМ на основе исходных СВМПЭ волокон обычно происходит по границе раздела волокно – полимерная матрица.

Поэтому приоритетной задачей при создании композитов на основе СВМПЭ волокон является разработка методов активации поверхности тканей из СВМПЭ волокна для достижения оптимального адгезионного взаимодействия на границе раздела полимер – волокно. В настоящее время известно о нескольких способах активации поверхности. Один из самых известных - плазменная обработка поверхности волокнистых материалов. Однако, эффект от плазменной обработки длится короткое время, что делает данный метод непрактичным. Перспективными и малоизученными способами активации поверхности является воздействие УФ излучения, а также обработка поверхности химическими реагентами [3].

### **Список литературы**

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России. Москва: Интеллект и технологии, 2016. №2 (14). С. 16–21.
2. Сергеева Е.А., Костина К.Д. Способы получения композитов и изделий на основе ткани из СВМПЭ и резины для производства топливных баков // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. №5. С. 101–105.
3. Беляева Е.А., Осипчук В.С., Косолапов А.Ф. Слоистые органокомпозиты и гибридные композиты на основе волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена: диссертация // Российский химико-технологический университет. 2019. №7 (8). 57с.

### **М.С. Евдокимов, Н.С. Лукичева, А.Ю. Кузнецов**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОРИСТЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

В условиях развития современных высокотемпературных технологий, курса на энергосбережение и энергоэффективность, разработка новых видов теплозащитных систем необходима не меньше, чем новые конструкции высокотемпературного оборудования. Причем одной из целей разработчиков является снижение толщины и веса теплозащиты.

Начатые ранее работы [1], [2] по разработке высокотемпературной теплоизоляции на основе углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) показали перспективность и целесообразность использования в качестве теплоизоляции многослойных УУКМ на основе углеродных аэрогелей.

Углеродные аэрогели (или их можно еще назвать — пены) представляют собой газонаполненные пористые углеродные или углерод-углеродные композиционные материалы. Так, были разработаны УУКМ, которые могут эксплуатироваться в инертной среде или вакууме при температурах выше 2000 °С и содержат один внутренний пористый углеродный слой. Теплопроводность полученных материалов составляла 0,050–0,085 Вт/(м·К). Соответственно представленному интервалу коэффициента теплопроводности интервал плотности материалов — 0,18–0,33 г/см<sup>3</sup>, а общей пористости — 78–72 % (открытых пор в общем количестве пор — 62–44 %).

Исследования данных материалов закономерно продолжились созданием УУКМ, содержащих в своей структуре не один, а более вспененных изолированных друг от друга слоев углеродных пен. Как оказалось, такие многослойные углерод-углеродные композиционные материалы при сохранении низких значений плотности ( $\approx 0,38$  г/см<sup>3</sup>) и коэффициента теплопроводности ( $\approx 0,086$  Вт/(м·К)), обладают ввиду большей толщины (не 1 см, как ранее, а 2 и более), меньшей скоростью передачи тепла, то есть дольше сохраняют теплоизоляционные свойства.

Полученные многослойные углеродные пористые УУКМ также могут быть рекомендованы для использования в качестве теплоизоляционного материала в высокотемпературных печах.

### Список литературы

1. Лукичева Н.С., Лысенко А.А., Кузнецов А.Ю., Тальвинский С.О. Многослойные углерод-углеродные композиты для теплозащиты // Сборник тезисов докладов 15-ой Международной конференции «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», 7-9 июня 2023 г. Москва, 2023. С. 139–141.
2. Лукичева Н.С., Лысенко А.А., Кузнецов А.Ю., Тальвинский С.О. Многослойные углерод-углеродные композиционные материалы для теплоизоляции // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 4(6). С. 50-58. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-4(6)-50-58.

**О.В. Кудринская, Ю.Ю. Вилачева, О.В. Асташкина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **СРАВНЕНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СРЕДСТВАХ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА**

Широкое использование сорбентов в XXI веке связано с тем, что данные материалы являются перспективными для улавливания различных веществ во всех сферах деятельности человека: медицине, химической промышленности, военно-промышленном комплексе и нефтегазовом секторе. Сорбенты необходимы для очистки различных сред и концентрирования целевых компонентов из смесей [1].

Наиболее перспективным видом сорбентов являются углеродные материалы, выпускающиеся в виде гранул (активированные угли), сеток, тканых и нетканых материалов. Каждый тип углеродных сорбентов обладает своей особой пористой структурой, благодаря которой осуществляется улавливание различных компонентов, что обуславливает их применение в конкретных отраслях [2].

При проведении экспериментов по изучению сорбционных характеристик различных типов углеродных сорбентов (активированный кокосовый уголь (АУ),

активированное углеродное волокно (АУВ), активированный углеродный нетканый материал (АУНМ)) были определены следующие показатели: сорбционная емкость по красителю метиленовому голубому (МГ) (ГОСТ 4453-74), объем сорбционного пространства по толуолу (ТУ 6-06-И160-87161), а также сорбционная активность по йоду (ГОСТ 6217-71). Результаты показали, что выбранные для исследования АУ, АУВ, АУНМ обладают достаточно высокой сорбционной емкостью по МГ 230; 350 и 440 мг/г соответственно; объемом сорбционного пространства по толуолу 0,25; 0,60 и 0,59 см<sup>3</sup>/г соответственно; сорбционной активностью по йоду 21; 149 и 134 % соответственно.

На основе полученных данных сделаны выводы о том, что АУВ имеет максимальную сорбционную емкость по МГ выше на 52%, а АУНМ – на 91 %, чем АУ. Аналогично, объем сорбционного пространства по толуолу у АУВ больше на 140 %, а у АУНМ – на 136 %. Сорбционная активность по йоду АУВ выше на 609 %, а АУНМ – на 538 %. Данные показатели свидетельствуют о том, что активированные волокнистые материалы являются наиболее эффективными. При этом, АУНМ имеет более простую технологическую цепочку получения, позволяющую сохранить максимальные сорбционные характеристики, что делает его более доступным и дешевым материалом при производстве средств индивидуальной защиты человека.

### Список литературы

1. Петров Ю.П. Совершенствование конструкции фильтров с загрузкой из углеродных волокнистых сорбентов (УВС), активированной углеродной ткани (АУТ) и волокнистого ионообменного материала ВИОН / Ю. П. Петров, А. Б. Котюков // Вестник Пермского университета. Геология. 2013. № 2(19). С. 94-101.

2. Мухина О.Ю. Получение и исследование свойств активированных углеродных волокнистых материалов с различной пористой структурой: диссертация ... кандидата химических наук: 05.17.06 / Мухина Ольга Юрьевна; [Место защиты: С.-Петербург. гос. ун-т технологий и дизайна]. Санкт-Петербург, 2003. 162 с.

### Ю.А. Лимич, Л.М. Штягина

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### ЗАГРАДИТЕЛЬНЫЕ БОНЫ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Заградительные боны не допускают разлива нефтяных продуктов по водному объекту. Они локализуют области возможного распространения разлива, обеспечивая гарантию чистоты водных пространств. Боновые заграждения, как правило, делают из полимерных материалов, свойства которых позволяют выдерживать воздействия разного рода.

Можно выделить три различных материала для изготовления боновых заграждений:

1. Пенополиэтилен;
2. Мельтблаун;
3. Поливинилхлорид.

Пенополиэтилен – популярный материал с закрыто-пористой структурой, за счет чего легко держится на воде. Он имеет малый вес, высокую влагонепроницаемость, устойчивость к фауне водоёмов и широко используется в морской промышленности.

Эластичность и гибкость позволяют пенополиэтилену без труда располагаться вокруг проливов нефтепродуктов. Боны из этого полимерного материала за счет превосходных механических характеристик, таких как прочность, износостойкость, обеспечивает длительный срок эксплуатации. К минусу данного материала можно отнести горючесть и выделение вредных веществ при горении.

Заградительный бон из нетканого материала мелтблаун (полипропиленовое микроволокно толщиной от 1 до 5 мкм) благодаря своей микропористой структуре обладает отличными сорбирующими свойствами. Мелтблаун – гидрофобный материал, поэтому легко держится на поверхности водоёмов. Однако невысокая механическая прочность ограничивает срок эксплуатации полимерного материала.

Боны из ПВХ представляют собой спектр различных износостойких заградительных конструкций, осуществляемых оперативную локализацию разлива нефти. ПВХ для бонов обладает гибкостью, позволяющей ему противостоять волновым нагрузкам, а также быть плавучим на поверхностях водных пространств. Боны из поливинилхлорида, отличающиеся разновидностями, бывают плоские, надувные, всплывающие и боны постоянной плавучести.

На основании анализа научно-технических данных, планируется создание сорбирующего бона из композиционного материала: сверхвысокомолекулярного полиэтилена и дисперсного наполнителя, который будет работать при наличии ледяного покрова и низких температур.

### **Список литературы**

1. Боновые заграждения [Электронный ресурс]. Режим доступа: Режим дотупа:

[https://www.tzik.ru/articles/bonovie\\_zagragdeniya.html?ysclid=m33jkil7fh276400348](https://www.tzik.ru/articles/bonovie_zagragdeniya.html?ysclid=m33jkil7fh276400348)  
(Дата обращения: 31.10.2024)

2. Пат. РФ 2177062 С1, МПК E02B 15/04; E02B 15/06. Бон заградительный / А.А. Андреев, А.А. Андреев, С.И. Зарецкий, заявители и патентообладатели А.А. Андреев, А.А. Андреев, С.И. Зарецкий, 2007112052; заяв 02.04.2007; опуб. 27.04.2008.

### **Е.М. Мазуркевич, Н.С. Лукичева, Н.В. Дианкина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **МОДИФИКАЦИЯ ПИГМЕНТАМИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ КОМПОЗИТОВ**

Интерес к полимерным композиционным материалам (ПКМ) и их широкое применение практически во всех отраслях промышленности обуславливаются не только возможностью заранее прогнозировать свойства композитов и создавать нужный именно в данной сфере уникальный материал, но и открывающими поистине бескрайними просторами для полета дизайнерской мысли. Изделия из композитов могут быть любой формы и размера, с простыми или сложными поверхностями, фантазия дизайнера может быть ограничена только размерами производственного оборудования и возникающими в некоторых случаях проблемами с окрашиванием.

Важно отметить, что большинство наиболее часто использующихся в качестве связующего в ПКМ эпоксидных смол имеют желтоватый оттенок, что может негативно сказаться на внешнем виде готового продукта. Этот желтый цвет может быть обусловлен

как самой смолой, так и отвердителями. К тому же, при длительном хранении или воздействии ультрафиолетовых лучей, желтый оттенок становится заметнее. Со временем и сами композиты желтеют. Для устранения данного недостатка эпоксидные смолы перед пропиткой наполнителя могут быть окрашены с помощью различных видов красителей. Это могут быть пигменты на основе порошковых (дисперсных) красителей, которые обеспечивают насыщенные и стойкие цвета, однако для равномерного распределения цвета необходимо тщательное диспергирование. Следующая группа красителей — жидкие красители, которые легко смешиваются с эпоксидной смолой. Они обеспечивают хорошее распределение цвета, что делает их удобными в работе. Жидкие красители часто имеют высокую концентрацию пигментов, позволяя достигать насыщенных оттенков с минимальным количеством добавки. Также есть и пигментные пасты, которые представляют собой полутвердые формы красителей.

Модификация, связанная с изменением цвета, необходима не только для решения эстетических и дизайнерских вопросов, но и для обозначения и распознавания составов формовочных компаундов. Так, например, предускоренные полиэфирные или винилэфирные смолы, ввиду содержания в своем составе промолтера — ускорителя распада инициатора, имеют розоватый или голубоватый оттенок, который при добавлении инициатора меняется на коричневый. Что дополнительно является индикатором начавшегося процесса отверждения матрицы.

Выбор конкретного типа модифицирующего пигмента зависит от желаемого эффекта и условий эксплуатации готового изделия. Жидкие красители и пасты обычно считаются более удобными в использовании благодаря своей легкости в смешивании и высокой степени растворимости. Однако порошковые красители могут предоставлять более широкий выбор оттенков и эффектов. В конечном итоге выбор между различными видами дисперсных красителей зависит от конкретных задач технолога.

*Научный руководитель: доцент кафедры наноструктурных, волокнистых и композиционных материалов им. А.И. Меоса СПбГУПТД, к.т.н. Хохлова В.А.*

## **И.М. Егорова, А.А. Козлов**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **ПРОВЕДЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИМЕРНЫХ НИТЕЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

При реконструктивно-восстановительных операциях, направленных на ликвидацию обширных дефектов опорных мягких тканей, возникающих в ряде хирургических вмешательств, все шире используют полимерные сетчатые имплантаты. Основной задачей сетчатых имплантантов (эндопротезов) является укрепление поврежденных тканей при хирургическом вмешательстве [1].

Для выполнения своей основной функции сетчатые эндопротезы должны обладать соответствующими деформационными и прочностными свойствами, чтобы противодействовать внутрибрюшному давлению.

На деформацию сетки влияют деформационные характеристики самих нитей, а также структурные характеристики полотен: форма элементарных ячеек, их взаимное расположение, фиксация нитей в узлах ячеек и другие параметры. Это объясняет

важность оценки характеристик ползучести самих нитей для выяснения роли свойств нитей в определении характеристик ползучести сетчатых эндопротезов [2].

Механические свойства этих материалов определяются в рамках существующих стандартов, в которых ползучесть и механическая релаксация усилий практически не принимаются во внимание, хотя у данных материалов релаксационные свойства проявляются достаточно сильно и поэтому должны учитываться при решении вопросов функционирования имплантатов.

Задачу исследования и прогнозирования ползучести изучаемых полипропиленовых и поливинилиденфторидных нитей медицинского назначения необходимо решать на основе математического моделирования вязкоупругости при использовании данных эксперимента в длительных деформационных режимах под действием постоянной нагрузки  $\sigma$  [3].

Наряду с анализом данных длительного эксперимента в режиме ползучести, представляется желательным проведение анализа данных и при кратковременной ползучести нитей, которую можно исследовать методом физической кинетики. На основе указанного метода можно определить характеристики элементарных актов ползучести нитей и возможность прогнозирования ползучести.

Физический анализ ползучести позволяет определять элементарные акты процесса ползучести нитей, которые могут послужить основой для разработки экспресс-метода прогнозирования деформационных процессов на основе кратковременных испытаний, а также провести сопоставление деформационных свойств нитей и сетчатых эндопротезов из них [4].

В элементарных актах ползучести полипропиленовых и поливинилиденфторидных нитей происходит термофлуктуационное преодоление потенциальных барьеров, снижаемых приложенным растягивающим напряжением.

Как известно, на молекулярном уровне растягивающее нагружение ориентированных полимеров вызывает в цепных молекулах переходы гош-конформеров («свернутых») в транс-конформеры («распрямленные»).

Активационный объем в элементарных актах конформационных переходов в полимерах приближенно равен объему элементарного звена (не мономерного звена, которое, как правило, состоит из нескольких элементарных звеньев) в цепной полимерной молекуле [5].

Таким образом, предложен метод проведения качественной оценки процессов ползучести полимерных нитей медицинского назначения.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### **Список литературы**

1. Буряк Е.А., Климова Н.С., Переборова Н.В. Определение компонентов деформации полимерных текстильных материалов // Химические волокна. 2021. № 2. С. 34-37.
2. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов // Химические волокна. 2021. № 2. С. 74-78.
3. Буряк Е.А., Климова Н.С., Переборова Н.В., Титова Л.В. Математическое моделирование вязкоупругих свойств швейных армированных полиэфирных нитей // Химические волокна. 2021. № 4. С. 3-7.
4. Переборова Н.В., Литвинов А.М., Овсянников Д.А., Волкова И.Н. Оптимизация выбора математической модели для прогнозирования деформационных процессов полимерных материалов // Химические волокна. 2021. № 4. С. 11-13.

5. Переборова Н.В., Климова Н.С., Малюков Ю.А., Зурахов В.С. Математическое моделирование деформационных и релаксационных процессов полимерной пряжи // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2021. № 1. С. 7-13.

### **А.С. Мусихина, В.В. Марценюк, О.В. Асташкина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ SPIN COATING**

Из большого количества способов получения полимерных плёнок, которые активно используются как на промышленных производствах, так и в лабораториях научно-исследовательских центров, большой интерес представляет метод получения тонких плёнок методом spin coating. Благодаря данному способу формования возможно получение ультратонких плёнок, толщиной до 10 нм, с очень низкой неоднородностью по толщине, а главное, что надмолекулярная структура таких плёнок значительно отличается от структуры плёнок, полученных другими способами, например, свободным литьем [1]. Микроэлектроника, оптика, пищевая промышленность и другие отрасли уже не представляют своего производства, совершенствования имеющихся и создания новых изделий без использования метода spin coating.

Формование по методу spin coating осуществляется за счёт центробежных сил, которые действуют на раствор полимера, нанесённый на подложку и способствуют упорядоченному расположению макромолекул, и получению однородного покрытия. Физико-механические характеристики и толщина такой плёнки зависят от регулируемых в процессе формования параметров, а именно концентрации раствора, скорости вращения подложки и продолжительности процесса [2].

В настоящей работе были изготовлены плёнки методом spin coating и свободного литья из растворов полимеров: поливинилового спирта (ПВС) и натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ) в воде, а также полиакрилонитрила (ПАН) в диметилформамиде, концентрацией 10, 15 и 1 масс. % соответственно. Площадь подложки и объём раствора для формования были одинаковы как для метода свободного литья, так и для метода spin coating, но сушка плёнок, полученных вторым способом проходила быстрее. Для процесса spin coating скорость формования подбирали экспериментально, а продолжительность формования составляла 60 с.

В результате проведенных исследований было установлено, что толщина плёнок, полученных методом spin coating из растворов ПВС и ПАН составила 24 и 12 мкм соответственно, при скорости формования 500 об/мин, что почти в 20 раз меньше, чем толщина плёнок, полученных литьем в форму из тех же растворов. Стоит отметить, что при скорости формования 1000 об/мин толщина плёнки из раствора ПАН составила 5,5 мкм, что меньше чем толщина филаментов в исходном ПАН волокне. При получении Na-КМЦ плёнок методом свободного литья толщина составила 25 мкм, а используя метод spin coating удалось достичь толщины в 9,5 мкм.

Можно сделать вывод о том, что метод spin coating является действительно уникальным способом формования, позволяющий получать очень тонкие и однородные плёнки даже

### Список литературы

1. Rakhimova A.K. PEDOT: PSS polymer films obtained by spin-coating method / A.K. Rakhimova, S. Ait, K.A. Urazov // National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. 2021. P. 48-52.
2. Cui L. Polymer concentration, shear and stretch field effects on the surface morphology evolution during the spin-coating / L. Cui, X. Li // Applied Surface Science. 2006. № 448. P. 8156-8162.

### **Е.А. Перфильева, В.В. Марценюк, О.В. Асташкина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ**

Кинетика отверждения – это процесс, описывающий переход реактопластичного связующего из жидкого или вязкотекучего состояния в твердое, к параметрам которого относятся следующие характеристики: время гелеобразования, время полного отверждения, степень конверсии, скорость и продолжительность отверждения, температура отверждения.

Кинетика отверждения является важным показателем при создании композиционных материалов. Например, при введении углеродных нанотрубок (УНТ) в связующее (эпоксидную смолу), происходит спад температуры отверждения по сравнению с ненаполненной (не модифицированной) эпоксидной смолой [1]. Вместе с этим, введение углеродных наночастиц оказывает влияние на физико-механические свойства полимерных композитов. Так, например, в работе [2] показано, что изменение кинетики отверждения эпоксидного связующего за счёт введения УНТ приводит к повышению прочностных свойств композита.

В настоящей работе, в качестве объектов исследования использовали эпоксидную смолу марки ЭД-20, отверждаемую аминным отвердителем (полиэтиленполиамин) в соотношении 10:1, а в качестве углеродных нанонаполнителей (0,1 масс. %) использовали: технический углерод (ТУ), УНТ и графены. Для композитов, с модифицированным связующим проводили гомогенизацию с помощью ультразвукового диспергатора.

При проведении эксперимента было выявлено, что продолжительность отверждения ненаполненной эпоксидной смолы с ультразвуковой обработкой уменьшилась на 45 минут в сравнении с ненаполненной эпоксидной смолой без ультразвуковой обработки. Следовательно, предварительная ультразвуковая обработка связующего приводит к ускорению процесса отверждения.

Для эпоксидной смолы с предварительной обработкой ультразвуком и с наполнением ТУ, УНТ, графенами были зафиксированы разные максимальные температурные пики отверждения. У ненаполненной эпоксидной смолы с ультразвуковой обработкой пик отверждения составил 120°C, а при модификации ТУ, УНТ и графенами пики отверждения составили 66, 99 и 108°C соответственно. Таким образом, введение углеродных наночастиц приводит к снижению экзотермического пика отверждения.

### Список литературы

1. Хасков М.А., Большаков В.А., Меркулова Ю.И., Гребенева Т.А. Влияние углеродных нанотрубок на кинетические аспекты отверждения термореактивных связующих на примере эпоксидных смол // Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. №7. С.58-61.
2. Крюкова А.Ю., Шумянцева А.В., Потапова К.А., Морозов А.Н., Десятов А.В. Влияние углеродных нанотрубок на прочность полимерного композита «эпоксидная смола – углеродные нанотрубки» // Успехи в химии и химической технологии. 2020. №4. С. 32-33.

### А.Е. Прохорова, Е.П. Ширшова

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### ПЕРЕРАБОТКА КОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ПОЛЫМИ СТЕКЛЯННЫМИ МИКРОСФЕРАМИ

К настоящему времени ни одна отрасль не обходится без использования композиционных материалов (КМ). Спрос рождает предложение, поэтому четко прослеживается большой рост производимых КМ на рынке, но, в связи с этим растут отходы, которые возникают как на стадии производства изделий, так и после окончания установленного срока службы. Технологии вторичной переработки и рециклинга композиционных материалов становятся всё более востребованными как с позиций охраны окружающей среды, так и в экономическом плане.

Основными технологиями вторичной переработки КМ на сегодняшний день являются пиролиз, сольволиз и механодеструкция. Данная схема характерна как для непрерывнонаполненных, так и для дисперснонаполненных материалов. Однако стоит учитывать, что для каждого класса отходов есть свои более приемлемые технологии, но в России для многих материалов механизмы переработки находятся в зачаточном состоянии, к примеру, одним из таких материалов является сферопластики.

Для работы использовались отходы высокопрочных легковесных водо- и виброударостойких сферопластиков. Предварительно измельченные отходы имели усредненный размер 2,5\*2,5\*3 см и подвергались дроблению в малой колосниковой роторной дробилке с размером ячейки решетки 1,25 мм для получения более мелких фракций.

Изучение морфологии наполнителя, т.е. его размера и формы частиц, плотности, проводимости и др. позволяет понимать будущее распределение наполнителя в полимерной матрице, спрогнозировать свойства получаемого КМ. Проведенный гравиметрический рассев показал, что до 70 % измельченного сырья имеет размер частиц 0,6 – 0,75 мм, 15 – 20 % смеси составляет размер частиц < 0,6 мм, остальная часть - > 0,75 – 1,25 мм. Микроскопический анализ проводили на оптическом микроскопе марки Saike Digital. Установлено, что форма частиц зернистая, нерегулярная, узловатая, с многократными изломами с острыми краями за счет разрушения стеклянных сфер. В поле зрения количество битых стеклянных сфер составляет ~50 %.

Для получения пилотных композитов использовали эпоксидную смолу 828CSC (ЭД) и полиэфирную смолу Attika Attshield OP 725 (ПЭФ) со степенью наполнения (СН) 10, 20, 30, 40 %, в качестве объектов сравнения были получены аналогичные материалы,

наполненные стеклянными микросферами производства ИНОТЭК. Образцы получали по холодному методу отверждения в виде брусков 10\*10 см с толщиной от 1,5 – 2 см.

Проведенные исследования показали, что введение наполнителя в виде стеклосфер или измельченного сырья приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) материалов. При СН 40% смол ЭД и ПЭф стеклосферами наблюдается снижение  $\lambda$  на 25 – 30 %, при наполнении измельченным сырьем  $\lambda$  снижается для ПЭф смолы на 10-15 %, а для ЭД смолы на 30-35 %.

**Такие результаты дают понять, что развитие направления вторичной переработки сферопластиков может быть очень актуальным и востребованным с научной точки зрения.**

*Руководитель: старший преподаватель кафедры НВКМ Дианкина Н.В.*

**А.Е. Прохорова, Е.П. Ширшова**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ПРИМЕНЕНИЕ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР В КОМПОЗИТНОЙ ОТРАСЛИ**

Стеклянные микросферы – известный материал, представляющий собой белый сыпучий порошок, состоящий из микроскопических стеклянных полых шариков диаметром в среднем 15-200 мкм и более, их размеры очень варьируются. Эти частицы могут быть либо полностью выполненными из стекла, либо иметь пустое пространство внутри, заполненное воздухом или иными газами.

В композитной отрасли стеклянные микросферы применяются как наполнители, придающие изделию улучшенные эксплуатационные характеристики. На сегодняшний день область применения данного наполнителя невероятно широка. К самым распространенным примерам можно отнести: изготовление абразивных шпаклёвок; создание легких конструкционных материалов, а также теплоизоляционных и звукоизоляционных материалов; изготовление полимерных композиций.

Основной причиной, определяющей применение полых стеклянных микросфер при формировании композитов, получивших название сферопластики, является необходимость снижения плотности материала, а, следовательно, и веса изготавливаемых из него изделий, что, например, напрямую влияет на эффективность топливопотребления и эмиссию углекислого газа в авиационной и автомобильной промышленности.

Одним из ключевых факторов, влияющих на свойства сферопластиков, является степень их наполненности микросферами. Оптимальное соотношение между полимерной матрицей и сферическими частицами может существенно изменить характеристики и свойства готового продукта.

Анализ существующих технологий получения композитов на основе полых стеклянных микросфер показал существенные отличия от технологии получения композитов, которые наполнены другими привычными нам дисперсными наполнителями, поскольку существует сложность достичь однородности распределения частиц наполнителя в объеме смолы. С этой целью обычно применяют специальные смесители-диспергаторы, однако в случае полых стеклянных микросфер данный метод считается не совсем рабочим, поскольку в процессе разбивания агломератов, возможен риск повреждения микросфер, поэтому смешение необходимо проводить мягко и

аккуратно. Один из современных методов изготовления сферопластиков принадлежит крупнейшему Российскому производителю стекловолокнистых материалов и композитов на их основе – АО «НПО Стеклопластик».

Вместе с тем до сих пор не решен вопрос утилизации и переработки изделий с использованием микросфер. С одной стороны, это связано с тем, что в качестве связующего используются терморезактивные смолы, вторичная переработка которых крайне затруднительна. С другой стороны, получаемые вторичные материалы сильно уступают по качеству исходным, ввиду трудности сохранения уникальной структуры стеклянных микросфер при переработке композитов.

На сегодняшний день в промышленном масштабе не существует эффективного решения по переработке композитов, наполненных микросферами, что делает данное направление привлекательным для исследования.

*Руководитель: старший преподаватель кафедры НВКМ Дианкина Н.В.*

**В.С. Румянцева, Л.М. Штягина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОТКАНИ И СВЕРХВЫСОКОМОДУЛЬНОГО ВОЛОКНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ В КАЧЕСТВЕ СВЯЗУЮЩЕГО**

Создание гибридных полимерных композиционных материалов, совмещающих два и более типов волокон, является перспективным направлением развития современной техники, так как позволяет расширить возможности создания материалов с заданными свойствами. Основные причины, приводящие к необходимости гибридизировать пластики – включение волокон, превосходящих их по каким-либо параметрам, что позволяет ликвидировать имеющиеся недостатки; а также снижение цены получаемого материала [1].

Были получены и исследованы композиционные материалы на основе стеклоткани и арамидного волокна – отечественного СВМ волокна.

Стекловолокно – это волокно или комплексная нить, формируемые из стекла. Оно обладает высокой прочностью и жесткостью. Композиционные материалы на основе стеклянных волокон – это родоначальники конструкционных композиционных материалов, которые используются взамен металлических конструкций в авиа-, судостроении, в строительстве, в нефтехимической промышленности, в машиностроении. К сожалению, у стеклоткани имеется ряд недостатков – это высокий расход полимера, большая масса получаемого конечного продукта, низкая прочность стеклопластика [2].

Арамидные волокна отличаются высокой стабильностью размеров, хорошими термическими характеристиками. Волокна этого типа достаточно устойчивы к воздействию различных химических веществ. Сочетание высокой прочности, вязкости разрушения, высокой термостойкости с низкой плотностью выдвигает органопластики на основе арамидных волокон в разряд материалов, эффективно работающих в конструкциях гражданского и специального назначения. Основными недостатками

арамидных композиционных материалов являются низкое сопротивление сжимающим нагрузкам и сравнительно высокое влагопоглощение [2].

Совмещение стеклянных и арамидных волокон позволяет получить материалы с более высокой прочностью при сжатии и сдвиге и повысить удельные характеристики гибридной системы при растяжении [3].

### Список литературы

1. Гибридные композиты [Электронный ресурс]. <https://studfile.net/preview/8804989/> (Дата обращения: 02.11.2024).
2. Слоистые органокомпозиты и гибридные композиты на основе волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена [Электронный ресурс]. <https://diss.muotr.ru/media/dissertations/2018/12/> (Дата обращения: 02.11.2024).
3. Определения и классификация полимерных композитов. Механизм взаимодействия компонентов полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс]. <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/3568/11/1358540> (Дата обращения: 02.11.2024).

### С.О. Тальвинский, Н.С. Лукичева, А.Ю. Кузнецов

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПОРИСТОСТЬ ВСПЕНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теплоизоляционные материалы широко используют в современной промышленности. Одной из основополагающих характеристик теплоизоляционных материалов является пористость, поэтому получение перспективных теплоизоляционных материалов связана, с получением газонаполненных или вспененных материалов с высокой пористостью и равномерным распределением пор по размерам. Общая пористая структура делится на открытую и закрытую структуру. Закрытыми называются поры, изолированные от других, и недоступные для заполнения жидкостью или газом. Поры, которые сообщаются между собой и поверхностью, считаются открытыми. Материалы с преимущественно закрытой пористой, пенопласты, обладают и лучшими теплоизоляционными свойствами.

Изучение влияние наполнителя на пористую структуру вспененных материалов проводили на образцах, наполненных техническим углеродом (ТУ), кокосовым активированным углем (КАУ), графенами и смесью графены/КАУ. Образцы получали следующим образом: фенолформальдегидная смола марки СФ-010, уротропин и гидрокарбонат натрия и углеродный наполнитель смешиваются в необходимых пропорциях. Уротропин и гидрокарбонат натрия добавляются в размере 10 и 0,1 % от массы смолы соответственно. После тщательного перемешивания всех компонентов, полученный премикс засыпается между двух слоев нетканого графитированного углеродного материала, толщина которого составляет 1,1 мм. Полученная заготовка помещается в заранее нагретый до 180 °С сушильный шкаф, где и получается газонаполненный полимерный композиционный материал (ПКМ). Таким образом получили вспененный ПКМ наполненный техническим углеродом (ТУ), кокосовым

активированным углем (КАУ), графенами и смесью графены/КАУ со степенями наполнения от 1 до 10 масс. %.

Результаты исследования пористости показали рост пористости при добавлении углеродных наполнителей. Максимальное увеличение пористости после добавления 1% углеродных наполнителей наблюдается у образца, наполненного кокосовым активированным углем, пористость которого увеличилась на 11 %, с 33 % (у ненаполненного образца) до 44 % (у образца со степенью наполнения 1%). Такой эффект получился за счет высокой пористости самого наполнителя (КАУ). Наполнение 1% технического углерода привело к увеличению пористости на 7 %, до 40 %, это обусловлено более равномерной и однородной пористой структуры. Добавление графена и смеси графена с кокосовым активированным углем в количестве 1% позволили увеличить пористость на 2 и 5 % соответственно. Это связано с тем, что графен является менее пористым относительно кокосового активированного угля, а также из-за высокой агломерации не позволил получить однородную и равномерную структуру пористой прослойки. Дальнейшее увеличение степени наполнения привело к увеличению пористости исследуемых образцов. Образцы со степенью наполнения 10 масс. % обладают следующей пористостью: 54 % (образец, наполненный ТУ), 56 % (образец, наполненный КАУ), 46 % (образец, наполненный графеном) и 50 % (образец, наполненный смесью графен/КАУ). Увеличение степени наполнения свыше 10 % не приводило к увеличению пористости материалов.

## **С.В. Киселев**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **МЕТОДЫ ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Возросшая востребованность в полимерных текстильных материалах в различных отраслях техники - от товаров бытового назначения до обшивки космических ракет и глубоководных аппаратов - диктует необходимость разработки современных методов прогнозирования повышенной точности их деформационных процессов, включая различные восстановительно-релаксационные процессы [1].

Разработка новых методов прогнозирования деформационных свойств полимерных текстильных материалов обосновывается необходимостью проектирования новых инновационных изделий на основе указанных материалов, обладающих требуемой функциональностью и повышенной конкурентоспособностью.

Основной целью прогнозирования релаксационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов является определение их функциональности. Поэтому, чем точнее будет прогноз, тем более достоверной будет информация о функциональных свойствах указанных материалов.

Прогнозирование релаксационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов традиционно проводится на основе классических определяющих интегральных соотношений типа Больцмана-Вольтерра нелинейно-наследственного типа с различными интегральными ядрами [2].

При этом основными объективными трудностями, встречающимися при таком

прогнозировании, является то, что интегральные ядра, идеально подходящие для прогнозирования релаксационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов одной макроструктуры и некоторого компонентного состава, совсем не подходят для прогнозирования релаксационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов другой макроструктуры или другого компонентного состава.

Поэтому критерием достоверности и точности указанного прогнозирования релаксационно-деформационных процессов является, в основном, выборочный эксперимент [3].

Определяющее уравнение Больцмана-Вольтерра для прогнозирования релаксационного процесса, представляющего собой временной процесс изменения напряжения в полимерном текстильном материале, вследствие приложенной к материалу деформации, имеет вид [4]

$$\sigma_t = E_0 \cdot \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{\partial \varphi_{\varepsilon s}}{\partial s} \cdot ds, \quad (1)$$

где

$\varepsilon_t$  - деформация, меняющаяся во времени  $t$ ,

$\sigma_t$  - напряжение, меняющееся во времени  $t$ ,

$E_0$  - модуль упругости,

$E_\infty$  - модуль вязкоупругости,

$\varphi_{\varepsilon t} \in (0;1)$  - релаксационная функция, составляющая основу интегрального ядра

релаксации  $\frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t}$ .

Аналогично, определяющее уравнение Больцмана-Вольтерра для прогнозирования процесса ползучести, представляющего собой временной процесс изменения деформации полимерного материала, вследствие приложенного к материалу напряжения, имеет вид

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_0} \cdot \sigma_t + \left( \frac{1}{E_\infty} - \frac{1}{E_0} \right) \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{\partial \varphi_{\sigma s}}{\partial s} \cdot ds \quad (2)$$

где

$\varphi_{\sigma t} \in (0;1)$  - функция запаздывания (ползучести), составляющая основу

интегрального ядра запаздывания  $\frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t}$ .

Развиваемое авторами научное направление по математическому моделированию, системному анализу и расчетному прогнозированию деформационно-релаксационных функциональных свойств полимерных материалов предполагает использование в качестве релаксационных функций и функций запаздывания одну из следующих нормированных функций

$$\varphi_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{a^{-1} \cdot \ln(t/\tau)} e^{-z^2/2} dz - \quad (3)$$

ИВ (интеграл вероятностей, характеризующий нормальное распределение);

$$\varphi_t = \frac{1}{2} \left( 1 + th \left( \frac{A}{2} \ln \frac{t}{\tau} \right) \right) = \left( 1 + \left( \frac{t}{\tau} \right)^{-A} \right)^{-1} - \quad (4)$$

ГТ (гиперболический тангенс);

$$\varphi_t = 1 - e^{-(t/\tau)^k} \quad (5)$$

ФК (функция Кольрауша, не обладающую центрально-симметричным графиком, в отличие от ИВ и ГТ, но имеющую относительно простой вид);

$$\varphi_t = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b} \ln \frac{t}{\tau} \right) \quad (6)$$

НАЛ (нормированный арктангенс логарифма, характеризующий вероятностное распределение Коши).

Здесь:

$a, A, k, b$  – параметры интенсивности релаксационных процессов или процессов ползучести,

$t/\tau$  – приведенное время.

Наличие нескольких различных видов релаксационных функций и функций запаздывания оправдано, так как позволяет получать результаты прогнозирования деформационных процессов, независимые друг от друга.

Прогнозируемые деформационные характеристики, получаемые усреднением характеристик, определенных с использованием разных математических моделей, обладают более высокой степенью достоверности, чем характеристики, определенные с использованием одной математической модели [5].

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### Список литературы

1. Переборова Н.В. Решение задачи управления качеством материалов текстильной и легкой промышленности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 2. С. 16-22.
2. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов // Химические волокна. 2021. № 2. С. 74-78.
3. Переборова Н.В., Климова Н.С., Малюков Ю.А., Зурахов В.С. Математическое моделирование деформационных и релаксационных процессов полимерной пряжи // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2021. № 1. С. 7-13.
4. Литвинов А.М., Козлов А.А., Климова Н.С., Переборова Н.В. Разработка методов компьютерного анализа деформационных процессов полимерных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2021. № 1. С. 82-87.
5. Климова Н.С., Литвинов А.М., Переборова Н.В., Киселев С.В. Спектральная интерпретация деформационных процессов полимерных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2021. № 1. С. 100-105.

**В.И. Игошина<sup>1</sup>, К.К. Ширшин<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

## **ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕТАКРИЛОВЫХ МИКРОСФЕР ПРИ ПОМОЩИ НОВЫХ СШИВАЮЩИХ АГЕНТОВ**

Сшивающие агенты на основе метакрилатов многоатомных спиртов имеют значительный потенциал применения в различных областях медицины, в частности, в стоматологии. В последние десятилетия стали широко исследоваться различные способы получения именно таких химических агентов для сшивания линейных макромолекул различной молекулярной массы. Так, например, высокопрочные полимерные композиции, получаемые при переработке микросфер полиметилметакрилата (ПММА) в среде мономера в присутствии определённых сшивающих агентов, весьма давно и довольно успешно применяются в стоматологии в качестве материала для производства зубных протезов, временных коронок и искусственных зубов. Получаемые полимерные композиции имеют высокую удельную площадь поверхности, высокие показатели поверхностной адсорбции и возможность проектирования структуры. Также данные полимерные композиции могут иметь различную морфологию и характеризуются простотой варьирования физико-механических свойств ещё на стадии синтеза.

Сшивающие агенты на основе олигометакрилатов, а именно триметилпропан триметакрилат (ТМПТМА) и полиэтиленгликоль диметакрилаты (ПЭГДМА) различной молекулярной массы обладают хорошей адгезией и биосовместимостью с зубной тканью, низким влагопоглощением, а также высокой устойчивостью и стойкостью к истиранию.

В данной работе исследовался синтез описанных ранее сшивающих агентов. В серии экспериментов тризамещённый эфир ТМПТМА получали как методом этерификации метакриловой кислоты (МАК), так и переэтерификацией метилметакрилата (ММА) триметилпропаном (ТМП). В ходе лабораторных исследований было выявлено, что оптимальным методом получения ТМПТМА является метод этерификации. Данным способом достигается практически количественный выход мономера на стадии синтеза. Аналогичным способом получали и ПЭГДМА. Синтез проводили в присутствии традиционных катализаторов этерификации (растворы минеральных кислот), а также ингибиторов радикальной полимеризации (гидрохинон, п-метоксифенол и их смеси) в среде растворителя (толуол, гексан, циклогексан). В большинстве случаев необходимый результат достигается путём варьирования ряда факторов, таких как температура проведения процесса, скорость перемешивания, соотношение реагентов и т.д.

Отдельно стоит отметить, что для использования ТМПТМА и ПЭГДМА в стоматологии, продукт должен соответствовать многим дополнительным требованиям (например, быть бесцветным). Поэтому подробно изучаются факторы, влияющие на цветность продукта.

Таким образом, применение олигометакрилатов ТМПТМА и ПЭГДМА в качестве сшивающих агентов в процессе получения высокопрочных полимерных композиций на основе микросфер ПММА является достаточно перспективным направлением в стоматологии и других областях медицины. Потенциальное промышленное применение метакрилатов многоатомных спиртов обуславливает дополнительный интерес к изучению особенностей синтеза соединений данного класса.

**П.Б. Гвадзабия, Е.С. Сашина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ПОЛИМЕРЫ С ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ**

Полимеры с терморегулирующими свойствами, содержат в своем составе так называемые материалы с фазовым переходом (МФП). Это вещества с высокой теплотой плавления и высокой теплоемкостью, которые накапливают скрытое тепло при плавлении и выделяют его при охлаждении. Аккумулирование скрытой теплоты МФП достигается за счет фазового перехода твердое тело – жидкость благодаря высокой плотности вещества, незначительным изменениям объема и низкому давлению пара при рабочей температуре во время фазового перехода [1, 2].

Перед использованием МФП необходимо инкапсулировать, чтобы придать материалу устойчивость к механическому, термическому и химическому воздействию, а также предотвратить их утечку с поверхности в жидком состоянии. В результате микрокапсулирования получают продукт в виде отдельных микрокапсул размером от долей микрона до сотен микрон. Существующие методы обеспечивают возможность микрокапсулирования как лиофильных, так и лиофобных материалов [3]. В качестве материала оболочек могут использоваться любые пленкообразующие вещества: высокомолекулярные соединения и низкомолекулярные плавкие или растворимые продукты синтетического или природного происхождения.

В нашей работе поставлена задача получения микрокапсул, содержащих МФП, и (температура плавления 24-27 °С). Материал ядра эмульгировали в 5%-ном водном растворе превоцелла WOF CAS № 9056-19-3 при температуре 55-60°С, скорости вращения мешалки 1200-1500 об/мин в течение 20-40 минут.

В качестве материала оболочки применяли мочевиноформальдегидную и меламиноформальдегидную смолы. Для создания полимерной оболочки к эмульсии добавляли раствор соответствующей формальдегидной смолы, доводили рН до 2 и при 70 °С продолжали реакцию в течение 1 ч после добавления раствора отвердителя. После охлаждения эмульсии микрокапсул до комнатной температуры ее фильтровали под вакуумом и сушили полученный осадок на воздухе.

### **Список литературы**

1. Khalil E. Application of phase change materials: a review // Int. J. Res. Review. 2015. 5. P. 281-294.
2. Mondal S. Phase change materials for smart textiles – An overview // Appl. Therm. Eng. 2007. 28. P. 1536-1550.
3. Солодовник В.Д. Микрокапсулирование. М.: Химия, 1980. 216 с.

**А.В. Захарова, Н.А. Тихомирова**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ INK-JET ПЕЧАТИ**

В текстильной практике модификация применяется для повышения реакционной способности субстрата при фиксации красителей на волокне, для улучшения потребительских и придания специальных свойств текстильным материалам. Развитие цифровых технологий потребовало изменения традиционного подхода в последовательности процессов печати текстильных материалов, а именно включение стадии предобработки при ink-jet печати с целью структурной модификации текстильного полотна.

С конца XX века ink-jet технология приобретает все большее распространение для узорчатой расцветки тканей, поскольку обладает рядом преимуществ в сравнении с традиционными технологиями печати, таких как оперативность, отсутствие расходов на производство промежуточных носителей, создание оригинальных узоров для эксклюзивных заказов с малыми тиражами, что особенно актуально для тонких шелковых тканей.

Применение текстильных плоттеров для узорчатой расцветки требует придания текстильным материалам ряда физико-химических свойств перед процессами прямой струйной печати, среди которых стабилизация структуры полотна и содержание веществ, обеспечивающих фиксацию красителя. Особенно важен подбор текстильно-вспомогательных веществ для печати тонких тканей с подвижной структурой, в частности шелковых тканей. Комплекс свойства достигается в результате структурной модификации, для получения некоторой «бумагаподобности», и повышая реакционной способности субстрата по отношению к красителям, включая необходимые текстильно-вспомогательные вещества в состав аппрета. Пленка, которая формируется на поверхности волокна, на стадии предобработки, не должна препятствовать диффузии красителя на стадии формирования узора на ткани капле-струйным методом и не снижать степень фиксации красителя, а также легко удаляться при промывке. В качестве структурных модификаторов в научных публикациях рекомендуются традиционные загустители на основе природных и модифицированных природных полимеров [1].

Целью данного исследования было изучение возможности применения пектина в качестве модифицирующей добавки в составе для предобработки. Пектин относится к биологически безопасным веществам, получаемым из возобновляемого отечественного сырья. В ходе исследования было установлено, что требуемые свойства на стадии предобработки достигаются при содержании пектина в составе 50 г/л, при этом в результате традиционной промывки после запаривания пектин легко удаляется, обеспечивая высокую интенсивность и устойчивость окраски, сохранение физико-механических свойств, первоначальную мягкость и драпируемость шелковой ткани.

### **Список литературы**

1. Recent developments in the preparatory processes for the digital printing of textiles // Wang H., Memon H. (ed.): Science, Technology and Markets. / Sharjeel Abid, Jawad Naeem, Amna Siddique, Sonia Javed, Sheraz Ahmad, Hanur Meku Yesuf, Elsevier, 2023. Ch 6. P. 93-118, doi:10.1016/B978-0-443-15414-0.00007-8.

**А.Б. Глазырин, Б.Р. Гильмияров**

Уфимский университет науки и технологий

## **ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЛАСТИФИКАТОРА «ОКСАНОЛ»**

Пластифицированные ПВХ-композиции находят широкое применение в различных областях техники и в строительстве для кабельной изоляции, получения пленок и покрытий, изготовления упаковочных материалов и т.д. Важным компонентом в составе таких ПВХ-композиций, наряду с полимером, является пластификатор, свойства которого во многом определяют характеристики получаемого материала.

На отечественном рынке пластификаторов для ПВХ имеется достаточно ограниченный круг продуктов, к их числу относится пластификатор «Оксанол» (ТУ 2452-015-48158319-2000; ТУ 2452-029-05766801-94), применяемый как правило в смеси с другими пластификаторами. Вместе с тем, свойства этого пластификатора изучены недостаточно, что затрудняет разработку состава ПВХ-композиций с требуемыми свойствами для промышленного применения.

Целью настоящей работы являлось изучение свойств пластификатора «Оксанол» и оценка возможности его применения в составе ПВХ-композиций различного назначения.

К числу важнейших характеристик пластификаторов, определяющих возможность их использование в композициях с полимерами, является совместимость с полимером, которая определяет оптимальное содержание пластификатора в составе ПВХ-компаунда.

Оценку совместимости оксанола с ПВХ проводили по параметру «Критическая температура растворения полимера в пластификаторе» в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 12020 2018. В качестве объекта сравнения использовали пластификатор ди-2-этилгексилфталат (ДОФ) (ГОСТ 8728-88), доминирующий в настоящее время на отечественном рынке пластификаторов. В экспериментах использовали ПВХ марки SG-5 (производства Китая).

Из полученных результатов следует, что пластификатор оксанол (101 °С) обладает более низким значением  $T_{кр}$ , по сравнению с ДОФ (118 °С), что свидетельствует о его более высокой совместимости с ПВХ-смолой.

Другим важным параметром пластификаторов, определяющим возможность переработки при повышенных температурах в составе полимерных композиций, является их термическая стабильность и летучесть.

Изучение термической характеристик пластификаторов проводили на приборе TGA-DSC-1 фирмы «Mettler Toledo». Анализ проводили в интервале температур от 25°С до 500°С при скорости нагрева (5 град/мин) в атмосфере воздуха.

Для оценки устойчивости пластификаторов при повышенных температурах использовали следующие параметры (табл. 2):

$T_n$  - соответствует температуре начала снижения массы образца (вследствие испарения или разложения);

$\Delta m_{180}$  – показывает снижение массы образца при нагреве до температуры 180°С, соответствующей температуре переработки ПВХ-композиции.

Результаты ТГ-анализа показали, что значение  $T_n$ , для образца оксалона составляет всего 55°С, а потеря массы при 180°С достигает ~46%.

Эти экспериментальные данные свидетельствуют о наличии в составе оксалона большого количества летучих (низкокипящих) соединений, которые легко удаляются при нагревании.

Также были изучены термические характеристики ПВХ-композиций, содержащих в своем составе смесь пластификаторов ДОФ - оксанол. Показано, что увеличение содержания оксанола в ПВХ-композиции до 40 м.ч./100 м.ч. ПВХ приводит (при нагреве до 180°C) к заметному снижению массы композиции (до ~18%), вследствие потерь пластификатора.

Таким образом, пластификатор оксанол обладает хорошей совместимостью с ПВХ, однако, ввиду большой потери пластификатора при температурах переработки вследствие его высокой летучести, содержание оксанола в составе ПВХ-композиции должно быть ограничено. Более целесообразно использовать его как добавку в смеси с другими более высококипящими пластификаторами, такими как ДОФ.

**Н.П. Мидуков, В.С. Куров, М.А. Зильберглейт**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И АНАЛИЗ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕЖВОЛОКОННЫХ СВЯЗЕЙ. В 2D/3D ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Доклад посвящён итогам первого года реализации совместного научно-технического проекта, в рамках которого были разработаны две методики анализа неоднородности целлюлозных композиционных материалов. Благодаря слаженной совместной работе белорусских коллег и сотрудников сектора охраны интеллектуальной собственности вуза-партнера была подана заявка на изобретение в Федеральный институт патентной собственности (Россия) и в национальной отдел интеллектуальной собственности Республики Беларусь (Способ определения неоднородности поверхности бумаги. Заявка № 2024112579 от 07.05.2024, поданная в федеральный институт патентной собственности РФ и в национальный отдел интеллектуальной собственности Республики Беларусь (Заявка № 20240104 от 02.05.2024)). Ещё одна заявка была подана в ФИПС от совместного российско-белорусского научного коллектива (Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала и устройство для его реализации. Заявка № 2024109568 от 09.04.2024).

За отчетный период проведено 3 серии испытаний в лабораториях университетов партнеров: изготовлено 80 опытных образцов одно-, двух-, четырёхслойных волокнистых композиционных материалов для разработки практических рекомендаций по повышению качества готовой продукции; проведен контроль качества опытных образцов в лабораториях вузов-партнёров и на территории ОАО «Светогорский ЦБК». Проведено более 3000 измерений широкого ряда физических и механических показателей многослойных волокнистых целлюлозных композиционных материалов для разработки практических рекомендаций по повышению качества готовой продукции, созданию базы данных для последующей цифровизации исследований по контролю качества целлюлозных композиционных материалов (ЦКМ); исследована микроструктура по графическим изображениям, полученным с помощью разработанных методик с использованием оборудования центрального научно-исследовательского

института конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Санкт-Петербург) для прогнозирования и оценки физико-механических свойств ЦКМ.

Основным положительным эффектом взаимодействия с белорусскими партнерами является взаимообмен опытом и знаниями в области исследования структуры волокнистых целлюлозных композиционных материалов. Взаимный доступ к сложному высокотехнологичному оборудованию по визуализации и анализу микроструктуры материалов на поверхности и в среде позволили разработать новую единую методику, которая вызвала интерес у ряда производителей волокнистых композиционных материалов, зарубежных исследователей. Разделение труда между БГТУ и СПбГУПТД позволило сократить время на подготовку и планирование работ по оценке неоднородности волокнистых целлюлозных композиционных материалов, интенсифицировать исследования и на основе совместного интеллектуального продукта соединить все результаты в единое целое для достижения поставленных по проекту задач.

**В.В. Хачиниколаев, В.Ю. Пириайнен**

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

## **ФТОРОПЛАСТОВОЕ ПОКРЫТИЕ АНОДИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ – КЛЮЧ К ПОВЫШЕНИЮ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности коррозия оборудования представляет собой серьезную проблему, приводящую к частым поломкам, высоким затратам на обслуживание и снижению эффективности процессов. Это подчеркивает необходимость поиска новых материалов и технологий, способных повысить устойчивость конструкций к агрессивным условиям. В качестве решения рассматривается замена традиционных стальных конструкций на алюминиевые сплавы. Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью благодаря образованию защитной оксидной пленки  $Al_2O_3$ , что делает его перспективным материалом для применения в условиях, где коррозия является критическим фактором [1].

Анодирование — это электрохимический процесс, который позволяет создавать пористую оксидную пленку на поверхности алюминия, что увеличивает коррозионную и механическую прочность, а также увеличивает адгезию полимерных покрытий.

Однако, несмотря на преимущества, анодированная оксидная пленка и алюминий имеют разные коэффициенты теплового расширения, что приводит к возникновению механических напряжений, которые могут вызывать образование микротрещин и, как следствие, ухудшение защитных свойств оксидной пленки.

Для решения проблемы механических напряжений предлагается использование фторопласта в качестве поверхностного слоя на оксидной пленке алюминия. Фторопласт обладает высокой гибкостью и эластичностью, что позволяет ему сохранять защитные свойства при изменении внешних факторов. Кроме того, фторопласт снижает адгезию загрязнений и коррозионно-активных веществ, что создает дополнительную защиту. Таким образом, мы значительно увеличиваем срок службы и надежности оборудования, используемого в агрессивных средах [2].

Полимерное покрытие наносят в 2 слоя пневмораспылением под давлением 3-5 кгс/см<sup>2</sup> политетрафторэтиленовой (ПТФЭ) водной эмульсии, содержащей ПАВ-оксиэтилированный алкилфенол. Второй слой оплавляется при 425°C. Полимерное покрытие «обволакивает» анодно-оксидный слой, заполняя его поры и создавая защитный барьер между металлом и внешней средой. Рельеф ПТФЭ полностью повторяет рельеф оксидного слоя металла, создавая эквидистантные поверхности.

### **Заключение**

Сочетание ПТФЭ с анодированной оксидной пленкой представляет собой перспективный подход к повышению устойчивости и долговечности алюминиевых изделий в тяжелых эксплуатационных условиях нефтедобычи и нефтепереработки. Такое композиционное покрытие позволяет использование поверхностей при температуре до 200°C без потери защитных функций.

### **Список литературы**

1. Применение алюминиевых сплавов в нефтегазовой промышленности // Экспозиция Нефть Газ. 2015. № 5(44). С. 60-61. EDN UILENX.
2. Азаров В.А., Пряхин Е.И. Обеспечение адгезии фторопластового покрытия к стальной подложке // Дизайн. Материалы. Технология. 2024. № 1(73). С. 160-165. DOI 10.46418/1990-8997\_2024\_1(73)\_160\_165. EDN CXHPRA.

### **А. Яркевич, В.В. Марценюк, О.В. Асташкина**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **ПОЛУЧЕНИЕ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА**

Электроспиннинг (электроформование) – способ формования нановолокон и нетканых материалов на их основе, суть которого заключается в использовании электростатических сил. Струя раствора полимера, вытекающая из фильеры малого диаметра (иглы), подвергается экстремальному удлинению и истончению, а при подаче электрического напряжения происходит образование конуса Тейлора, после чего растворитель быстро испаряется, а на противоположно заряженной подложке (коллекторе) осаждаются волокна в хаотичном или направленном порядке.

Нетканые материалы на основе нановолокон широко применяются в медицине для создания биологически-активных материалов, акустических мембран, для очистки воздуха, сточных вод, топлива, нефти. Помимо вышеперечисленного нановолокна также применяются в создании альтернативных источников энергии – водородные топливные элементы, электроды аккумуляторных батарей и др. [1].

В данной работе были получены нановолокна методом электроспиннинга из 10 % раствора полиакрилонитрила (ПАН) в диметилформамиде. Приготовленный раствор формовали из шприца с тонкой иглой, заряженной положительно от высоковольтного источника. Под действием высокого напряжения (5 кВ) между положительно заряженной иглой и отрицательно заряженным коллектором образовывалась струя, которая расщеплялась с образованием хаотично расположенных и осаждаемых на коллектор нановолокон. Таким образом, при продолжительном формовании, был получен нетканый материал.

Диаметр и морфология поверхности волокон были изучены с помощью

сканирующего электронного микроскопа. Полученные нановолокна имеют диаметр филаментов  $270 \pm 58$  нм. С помощью оптического микроскопа был определен диаметр филаментов в исходном ПАН волокне, сформованном традиционным мокрым способом. Установлено, что диаметр исходных филаментов в ПАН волокне составляет приблизительно 7,5 мкм, что практически в 28 раз больше, чем у нановолокон, полученных методом электроспиннинга.

На процесс электроформования оказывает влияние множество факторов, как свойства раствора полимера, так и технологические параметры процесса формования. Быстрое испарение растворителя сопровождается образованием дефектов, чем объясняется шероховатая поверхность полученных нановолокон [2]. В дальнейшем для образования более гладкой поверхности волокон необходимо автоматизировать процесс подачи раствора, снизить скорость формования волокон и оценить влияние концентрации полимера на поверхность сформованных волокон.

### Список литературы

1. Arinstein A. Electrospun polymer nanofibers / A. Arinstein. USA: Pan Stanford.: 2018. 537 p.
2. Huang Z.M. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites / Z.M. Huang, Y.Z. Zhangb, M. Kotakic [and et.] // Composites Science and Technology. 2003. № 63. P. 2223-2253.

### Ю.А. Петраш, А.А. Безруков, О.И. Гладунова

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### О СПОСОБЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ГРАФЕНОВ ПЕРЕД ВВЕДЕНИЕМ В ПОЛИМЕРНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ

Существуют несколько способов диспергирования графенов перед введением в полимерное связующее. Все они, как правило, основаны на физическом диспергировании агломератов графена в легколетучих жидкостях в качестве дисперсионной среды, с использованием мешалок различных типов, а также ультразвукового воздействия, высокочастотных волн и других источников, которые позволяют разрыхлять агломераты (стопки) графена на более мелкие т.д. Чаще всего диспергирование графенов проводят непосредственно перед их введением в полимерное связующее, что делает данные способы менее привлекательными, поскольку требуют введения дополнительной стадии в производственный цикл изготовления наноструктурированных композиционных материалов [1], [2].

В работе предложен метод диспергирования графенов, состоящий из нескольких стадий и позволяющий сохранять графены в диспергированном состоянии длительное время. На первом этапе графены прокаливаются при высоких температурах для удаления лишней влаги, которая удерживает слои графена вместе. Вторая стадия диспергирования состоит из ультразвуковой обработки графенов в среде легколетучего растворителя. Было показано, что использование ацетона вместо гексана не ухудшает качество диспергированного графена, при этом стоимость ацетона в несколько раз ниже. Кроме этого, было выявлено, что диспергированные в среде легколетучего растворителя графены, в дальнейшем после сушки, могут храниться без обратимого образования

агломератов в течение длительного времени. Данный факт был подтвержден с помощью седиментационного анализа, основанного на зависимости размеров частиц от скорости их оседания. Также диспергированные частицы, хранившиеся длительное время, были исследованы с помощью электронного микроскопа. Показано, что внешний вид графенов и степень диспергирования после хранения длительное время в закрытой ёмкости без доступа воздуха не изменились.

Выявленный факт имеет большое промышленное значение, поскольку исключает необходимость диспергирования графена непосредственно перед использованием и данная технологическая стадия может быть вынесена в отдельное производство.

*Научный руководитель: и.о. зав. кафедрой, доцент, к.т.н. Асташкина О.В.*

### **Список литературы**

1. Гудков М.В., Столярова Д.Ю., Шиянова К.А. [и др.] Полимерные композиты с графеном и его производными как функциональные материалы будущего // Высокомолекулярные соединения. Серия С. 2022. Т. 64. № 1. С. 45–68.
2. Патент РФ 2693755 С1, МПК С01В 32/192; В82В 3/00; В82У 40/00. Способ получения графенового материала / А.Г. Ткачев, А.В. Мележик, Н.Р. Меметов, заявитель и правообладатель ООО "НаноТехЦентр". 2018134005; заявл. 26.08.2018; опубл. 04.07.2019.

### **М.А. Егорова, И.М. Егоров**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ СИНТЕТИЧЕСКИХ ШВЕЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Одним из примеров использования синтетических швейных материалов в индивидуальных средствах защиты является их применение в качестве внутренних слоёв защитных касок для охраны головы человека от травматизма, например, при строительных работах.

Применяемые при этом швейные материалы и конструкции из них должны обладать определёнными упругими и вязкоупругими свойствами. В связи с этим, актуальной задачей является получение прогноза на ползучесть синтетического швейного материала или конструкции из него при различных режимах силового воздействия [1].

Примерами таких режимов могут служить различного рода деформационно-восстановительные процессы, как с полной разгрузкой, так и с частичной. К простейшему примеру режима нагружения можно отнести деформационный процесс с постоянной скоростью деформирования [2].

Экспериментально указанный процесс описывается с помощью диаграммы растяжения, которая может служить средством контроля за точностью прогнозирования других, более сложных режимов деформирования [3].

В основе методик определения характеристик ползучести синтетических швейных материалов лежит использование различных математических моделей, аппроксимирующих экспериментальные "семейства" ползучести посредством

нормируемых функций. Рассмотрим один из вариантов такой методики.

Напряжённо-деформированное состояние синтетического швейного материала в области неразрушающих нагрузок описывается интегральным уравнением Больцмана-Вольтерра для процесса ползучести [4]

$$\varepsilon_t = D_o \sigma_t + \int_0^t \sigma_{t-s} D'_{\sigma s} ds, \quad (1)$$

где

$D'_{\sigma s} = \frac{\partial D_{\sigma s}}{\partial s}$  - ядро ползучести, отражающее сило-временную аналогию,

$\sigma_t$  - напряжение,

$\varepsilon_t$  - деформация,

$D_o$  - начальная податливость,

$D_{\infty}$  - предельно-равновесная податливость,

$t$  - время.

Податливость  $D_{\sigma t}$  аппроксимируем с помощью нормированной функции  $\varphi_{\sigma t}$ :

$$D_{\sigma t} = D_o + (D_{\infty} - D_o) \varphi_{\sigma t}, \quad (2)$$

которую зададим в виде [20-22]

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}(W_{\sigma t}) = \Psi(W_{\sigma t}), \quad (3)$$

где

$$W_{\sigma t} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_{\sigma}} \right) \right) - \quad (4)$$

структурно-сило-временной аргумент-функционал,

$t_1$  - задаваемое базовое значение времени,

$\tau_{\sigma}$  - время запаздывания,

Нормированное логарифмическое ядро ползучести имеет вид [5]

$$\bar{r}_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial \ln t} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2}. \quad (5)$$

Таким образом, приведенная математическая модель позволяет моделировать и прогнозировать процессы ползучести синтетических швейных материалов.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

#### Список литературы

1. Переборова Н.В., Климова Н.С., Литвинов А.М., Агеева Е.А. Математическое моделирование эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета

- технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2021. № 2. С. 41-51.
2. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Химические волокна. 2020. № 3. С. 39-42.
  3. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки деформационно-функциональных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Химические волокна. 2020. № 4. С. 37-40.
  4. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационных процессов полимерных текстильных материалов с целью оценки их эксплуатационных свойств // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 80-88.
  5. Переборова Н.В. Применение критериев качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов для оценки их функциональности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2020. № 1. С. 101-110.

### **М.И. Яровой, Н.И. Свердлова, А.Ю. Кузнецов**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ВТОРИЧНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ В КАЧЕСТВЕ НАПОЛНИТЕЛЯ В СОСТАВЕ КОМПОЗИТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Производство полимеров, имеющих специальные свойства, расширяет ассортимент изделий различного назначения, что приводит к накоплению отслуживших свой срок изделий из полимеров. Большинство видов пластмасс не поддаются биологическому разложению в течение многих десятилетий и остаются в окружающей среде. Методами их переработки являются переплавка или сжигание, которые приводят к загрязнению воздуха, почвы, грунтовых вод. В связи с этим вторичная переработка и утилизация отходов пластмасс приобретает важное экономическое и экологическое значение.

Новые технологические подходы к рациональной переработке синтетических полимеров, которые имеют длительный период сохранения прочностных и физико-химических характеристик после использования по целевому назначению, определяют целесообразность их использования в качестве наполнителей в производстве композиционных материалов.

Строительный рынок нуждается в новых материалах, расширяющих возможности и повышение эффективности выполняемых работ. Использование бетона обязательно при любом строительстве, начиная от заливки фундамента, заканчивая утеплением различных конструкций. Применение полимерных компонентов в качестве наполнителя бетона позволяет получить качественно новые варианты строительного материала. Полимербетон – уникальный композит с новыми техническими и эксплуатационными характеристиками и, в зависимости от предварительной подготовки наполнителя, изменяет такие свойства, как ударная прочность, плотность, пористость, водопоглощение, обладает декоративными качествами.

Использованные бутылки для жидких пищевых продуктов из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), являются альтернативой включения их в виде полимерного материала в цементно-песочную смесь для получения бетона вместо проверенных временем наполнителей. Механическое измельчение полимерных бутылок до частиц одинакового размера, позволило

получить наполнитель, который включали в сухую бетонную смесь перед добавлением воды. Проведенные лабораторные исследования позволили рекомендовать некоторые параметры для изготовления опытных образцов полимербетона.

Экспериментально установлено, что образцы дисперсно-наполненного полимербетона, отличающиеся количеством и степенью измельчения полимерного наполнителя, имеют выраженный максимум ударной прочности при введении 15 % масс. наполнителя в цементно-песочную смесь. Установлено, что при введении наполнителя в цементно-песочную смесь в количестве от 2,5 до 25 % масс., привело к уменьшению плотности образцов от 1,96 до 1,09 г/см<sup>3</sup> и к увеличению водопоглощения от 9,3 % до 25,3 %.

Известно, что включение в состав бетона полиэфирного волокна значительно изменяет эксплуатационные свойства фиброкомпозиционных материалов основными достоинствами которых является отсутствие усадочных трещин, снижение внутренних напряжений, возникающих во время твердения бетона, а также многократное увеличение сопротивляемости ударным нагрузкам. Использование модифицирующего компонента из вторичного ПЭТФ в виде полосок подобных волокнам для получения образцов полимербетона с установленными потребительскими качествами, подтвердило улучшение их эксплуатационных характеристик.

**Е.А. Печёркина, В.В. Васильева, А.А. Шрайнер, Е.С. Цобкалло**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ХИРУРГИЧЕСКИХ ЭНДОПРОТЕЗНЫХ СЕТОК**

Хирургические эндопротезные сетки – синтетические или биосовместимые материалы, применяемые для укрепления ослабленных тканей и предотвращения их смещения. Они используются в герниологии, урогинекологии, челюстно-лицевой хирургии, стоматологии, кардиохирургии, сосудистой хирургии и других областях медицины.

В зависимости от особенностей заболевания и участка тела, используются сетки из различных материалов, имеющих как синтетическое, так и биологическое происхождение. Производители при изготовлении сеток используют различные переплетения, варьируя тем самым строение и свойства этого вида продукции.

Наиболее часто используются синтетические сетки, изготовленные из полипропилена, который отличается гидрофобностью, высокой химической стойкостью, радиационностойкостью, сравнительной дешевизной и технологичностью. Сетки также изготавливают из полиэстера или политетрафторэтилена. Эти материалы характеризуются высокой прочностью, однако у некоторых пациентов могут вызывать воспалительные реакции. Синтетические сетки могут иметь различную биодеградацию. Не рассасывающиеся сетки сохраняют свою структуру на протяжении всей жизни пациента, применяются в случаях, когда необходима долговременная поддержка. Рассасывающиеся сетки, которые со временем растворяются, что может быть полезно в случаях, когда ткань пациента восстанавливается и нуждается в временной поддержке.

Биологические сетки изготавливаются из обработанных тканей животных (например, свиней или крупного рогатого скота). Они являются биосовместимыми и постепенно замещаются собственными тканями пациента, что снижает риск отторжения и воспаления.

В последнее время некоторыми производителями предлагаются гибридные многослойные сетчатые эндопротезы, состоящие из синтетических и биологических материалов. Это позволяет улучшить биосовместимость и прочность сетки, сохраняя при этом минимальный риск отторжения и воспаления.

Кроме устойчивости к возникновению инфекции, инертности и биосовместимости, хирургические сетки должны обладать такими механическими свойствами, как прочность, эластичность, гибкость, нулевая усадка, долговременность и надежность. Вследствие того, что области применения имплантов все время расширяются, очень важно определять механические свойства этого вида продукции для правильного и более гибкого выбора тех или иных сетчатых материалов при различных заболеваниях.

В настоящее время в России нет единых методик определения механических характеристик хирургических эндопротезных сеток. Существующая нормативная документация охватывают общие требования к медицинским изделиям, но не обеспечивают оценки всех важных механических свойств. В условиях импортозамещения предприятия разрабатывают свои технические условия, что затрудняет сравнение качества продукции и усложняет её сертификацию, а также может создавать сложности при сертификации и внедрении изделий в медицинскую практику. Необходимо создание единых требований для определения параметров качества хирургических эндопротезных сеток, отличающихся областью применения, параметрами структуры, применяемыми материалами.

#### **Ч.Р. Мухаметдинов<sup>1</sup>, Р.А. Зильберг<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ООО «ИонПро»

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий

#### **ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ БУТИЛИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД**

Бутилированная минеральная вода, являясь продуктом массового потребления, нуждается в контроле качества. На данный момент для выявления отклонений от стандарта качества задействованы методы со сложной пробоподготовкой и дорогостоящим оборудованием, что отнюдь не упрощает процесс анализа. Для решения данной задачи в настоящем исследовании использовали вольтамперометрический метод. В силу своей доступности и простого анализа вольтамперометрический метод выступает в роли перспективной основы для реализации системы идентификации и контроля качества минеральных вод.

Описанная система представлена тремя основными компонентами:

- Потенциостат/гальваностат с возможностью анализа в режиме реального времени для конвертации химического сигнала в электронный;
- Мультисенсорная система [1, 2] типа «электронный язык», для регистрации химического сигнала;
- Компьютерная обработка данных с использованием элементов искусственного интеллекта для извлечения полезной информации из массива вольтамперометрических данных.

Для оценки эффективности системы были отобраны минеральные воды, отличающиеся общей минерализацией и качественным составом (гидрокарбонатные и сульфатные воды).

Для обработки вольтамперометрических данных использовали хемометрику: метод главных компонент (МГК) и ПЛС-ДА. Форма вольтамперограммы определяется качественным и количественным составом исследуемого образца и для получения полной картины анализа в качестве аналитического сигнала рассматривали всю вольтамперометрическую кривую. Таким образом, анализ смесей сложного состава представляется возможным при сочетании вольтамперометрического метода с хемометрической обработкой данных. Разработанная методика предлагает комплексный экспресс-анализ, благодаря которому представляется возможным не только определение основных характеристик образца, а также идентификация по производителю, что является важным преимуществом по сравнению с существующими аналогами.

### Список литературы

1. Зильберг Р.А., Сидельников А.В., Яркаяева Ю.А. [и др.] Идентификация лекарственных средств на основе бисопролола с использованием вольтамперометрического "электронного языка" // Вестник Башкирского университета. 2017. Т. 22. № 2. С. 356-363.
2. Voltammetric identification of multicomponent solutions using principal components analysis / A.V. Sidel'nikov, R.A. Zil'berg, F.Kh. Kudasheva [et al.] // Journal of Analytical Chemistry. 2008. Vol. 63. No. 10. P. 975-981.
3. Voltammetric Sensors and Sensor System Based on Gold Electrodes Modified with Polyarylenephthalides for Cysteine Recognition / Y.A. Yarkaeva, D.I. Dubrovskii, R.A. Zil'berg, V. N. Maistrenko // Russian Journal of Electrochemistry. 2020. Vol. 56. No. 7. P. 544-555.

**Е.О. Булышева, Г.И. Ишмакаева, Р.А. Зильберг**

Уфимский университет науки и технологий

### **МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ТИПА «ЭЛЕКТРОННЫЙ ЯЗЫК» ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ НАПРОКСЕНА**

На сегодняшний день на фармацевтическом рынке преобладает появление множества дженериков, преимуществами которых являются низкая стоимость и доступность. Поскольку дженерики должны соответствовать качественному и количественному составу оригинала, возникает необходимость в контроле качества фармацевтических препаратов [1].

В настоящей работе впервые разработана мультисенсорная система типа «электронный язык», состоящая из четырёх композитных сенсоров на основе полиэлектролитного комплекса хитозана-сукцинамида хитозана (ПЭК), модифицированного углеродными нанотрубками (ОУНТ), оксидом графена (ОГ), CarboblackC и Carborack для идентификации фармацевтических препаратов напроксена (Нап) трех производителей: «Налгезин», «Тералив» и «Нексемезин». Растворы препаратов Нап готовили путем растворения 1 таблетки (275 мг Нап) в 20 мл фосфатного буферного раствора (рН=6.86), с последующим выдерживанием в ультразвуковой ванне в течении 20 мин и фильтрованием на чёрной ленте. Композиты ПЭК@CarboblackC, ПЭК@Carborack, ПЭК@ОГ, ПЭК@ОУНТ получили с помощью методики [2].

Полученные дифференциально-импульсные вольтамперограммы незначительно отличаются по высотам пиков, потенциалам и форме всей кривой, что ограничивает возможность идентификации по производителю. Для повышения надежности вольтамперометрического распознавания применили хемометрическую обработку данных методами МГК и SIMCA. По полученным данным для односенсорных систем образуются пересекающиеся кластеры на плоскости главных компонент (ГК), что не позволяет однозначно идентифицировать препараты напроксена по производителю. В случае мультисенсорной системы, на плоскости ГК образуются кластеры, не пересекающиеся между собой. Для идентификации фармацевтических препаратов напроксена по производителю использовали метод SIMCA. Доля неверно распознанных образцов для односенсорных систем достигает 100%. Для мультисенсорной системы доля неверно распознанных образцов сводится к минимуму за счет перекрестной чувствительности, что позволяет провести идентификацию препаратов напроксена по производителю.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 23-73-00119.**

#### **Список литературы**

1. Зильберг Р.А., Сидельников А.В., Яркаяева Ю.А., Кабирова Л.Р., Майстренко В.Н. Идентификация лекарственных средств на основе бисопролола с использованием вольтамперометрического "электронного языка" // Вестник Башкирского университета. 2017. Т. 22. № 2. С. 356-363.
2. Zilberg R., Salikhov R., Mullagaliev I., Teres Yu., Bulysheva E., Salikhov T., Ostaltsova A., Vakulin I. Chitosan-based polyelectrolyte complex in combination with allotropic forms of carbon as a basis of thin-film organic electronics // *Chimica Techno Acta*. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 202411302-202411314.

#### **Н.В. Переборова, А.Г. Макаров**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

#### **МЕТОДЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Широкое применение полимерных текстильных материалов в медицине диктует необходимость проведение сравнительного анализа их эксплуатационных свойств с целью отбора наилучших образцов этих материалов.

Полипропиленовые и поливинилиденфторидные нити находят широкое применение в медицине. В частности, они используются в хирургических имплантатах для реконструктивно-восстановительной хирургии. Имплантаты, изготовленные из указанных нитей, применяются, например, для укрепления поврежденной брюшной стенки, подвергающейся действию внутрибрюшного давления. При этом, эти имплантаты в виде сетки из полимерных нитей размещаются на брюшной стенке [1].

Описанные имплантаты, применяемые для противодействия давлению, возникающему внутри определенных участков человеческого тела, являются изделиями контркомпрессионного назначения. В последнее время находят свое применение

основовязанные полимерные сетчатые эндопротезы, укрепляющие неполноценные ткани брюшной стенки [2].

Для выполнения своей функциональной задачи, сетчатые эндопротезы должны обладать соответствующими деформационными и прочностными свойствами.

Необходимым условием выполнения изделием своего функционального назначения является ограниченность растяжимости сеток, т.е. упругая составляющая деформации эндопротезов под действием внутрибрюшного давления должна быть умеренной.

Интерес к системному анализу деформационных свойств нитей медицинского назначения, а также сетчатых полотен из этих нитей, обусловлен тем, что результаты этого анализа проясняют влияние деформационных характеристик нитей на механические свойства указанных сетчатых полотен.

На механические свойства сеток влияют: структурное расположение нитей в ячейках полотна, форма петель, вид распределения внешней нагрузки по элементам структуры и другие особенности трикотажных полотен.

Выяснение степени влияния деформационных характеристик нитей на механические свойства сеток позволит системно находить пути совершенствования качества эндопротезов, находить корреляцию свойств нитей и параметров структуры сеток.

Для изучения механических свойств эндопротезов были выбраны два вида основовязанных трикотажных полотен из полипропиленовых и поливинилиденфторидных нитей [3].

При проведении системного анализа деформационных свойств изучаемых нитей и сеток необходимо учитывать, что на эндопротезы, закрепленные на стенке поврежденной брюшной полости, действует внутрибрюшное давление, имеющее характер гидростатического давления. Нагружение эндопротезов при этом подобно мембранному [4].

Для проведения системного анализа деформационных свойств эндопротезов, необходимо также провести определение механических характеристик, позволяющих рассчитать возникающие деформации в эндопротезах, при выполнении ими контркомпрессионной функции [5].

Основной результат сравнения деформационных свойств нитей и сеток состоит в том, что упругая деформация сетчатых полотен связана, главным образом, с обратимым проскальзыванием нитей в точках контакта, изменением формы элементарного звена сетки, вклад же растяжения нити мал. При этом коэффициенты упругости сетчатых полотен оказываются пропорциональными коэффициентам упругости нитей, что не позволяет полностью исключить влияние упругости нитей на упругость сетчатых полотен.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### **Список литературы**

1. Макаров А.Г., Киселев С.В., Рыбачук С.В., Зурахов В.С. Критерии надежности прогнозирования вязкоупругости полимерных материалов // Известия вузов. Технология легкой промышленности. 2011. Т. 11. №1. С. 56-60.
2. Макаров А.Г., Киселев С.В., Рыбачук С.В., Зурахов В.С. Взаимобратимость интегральных ядер релаксации и ползучести при линейности вязкоупругих свойств полимерных материалов // Вестник СПГУТД. Серия 1. Естественные и технические науки. 2011. № 1. С. 69-72.

3. Макаров А.Г., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Описание физических законов на основе нового метода усреднения физических величин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2015. № 4. С. 3-7.

4. Макаров А.Г., Шванкин А.М. Сравнительный анализ физико-механических свойств арамидных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2016. Т. 31. № 1. С. 22-27.

5. Макаров А.Г., Шванкин А.М. Математическое моделирование деформационных процессов арамидных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2016. № 1. С. 10-14.

### **Б.Ю. Прядезников, О.А. Молоканова (Москалюк)**

Балтийский федеральный университет им. И. Канта

## **ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОПИСАНИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Математическое моделирование играет ключевую роль в переработке полимерных волокнистых и композиционных материалов, находящихся широкое применение в автомобилестроении, аэрокосмической инженерии, медицине и строительстве. Эти материалы обладают разнообразными свойствами и сложными производственными процессами. Эффективное моделирование позволяет улучшать качество продукции, сокращать время технологических циклов и снижать затраты на производство. В разработке математических моделей переработки полимеров используются различные методические подходы. Статистические методы, такие как регрессионный анализ, позволяют анализировать исторические данные и устанавливать взаимосвязи между свойствами материалов и технологическими параметрами. Численные методы, включая метод конечных элементов, имеют решающее значение для изучения физических и химических процессов, воздействующих на механические свойства композитов. [1, 2].

Совсем недавно в моделировании активно стали применяться алгоритмы машинного обучения, что позволяет использовать большие объемы данных для создания предсказательных моделей. Это улучшает характеристики материалов и оптимизирует производственные процессы с высокой степенью точности. При моделировании технологий переработки полимеров необходимо учитывать множество факторов. Ключевыми являются физические свойства материалов, а также технологические параметры, такие как температура, давление и скорость потока, которые критически влияют на качество изделий. Точный контроль этих параметров позволяет повысить однородность продукции и уменьшить количество дефектов. Химические взаимодействия между компонентами полимеров и наполнителей различной формы, химической природы, а также механические свойства, также подлежат внимательному анализу. Моделирование реакций полимеризации и кристаллизации позволяет предсказать изменение свойств материалов при разных условиях. Структура композитных материалов, включая распределение и ориентацию волокон, существенно влияет на их механические характеристики. Моделирование этих аспектов помогает

глубже понять, как технологии переработки влияют на качество конечной продукции. Примеры успешного применения моделирования включают оптимизацию процессов экструзии и литья под давлением. Эти методы повышают качество и точность изделий, важные для сложных конструкций. Моделирование адгезивных соединений в композиционных материалах обеспечивают надежность в аэрокосмической и автомобильной отраслях [2, 3].

Математическое моделирование технологий переработки полимеров открывает новые горизонты для оптимизации производства и повышения свойств материалов. Углубленное понимание процессов и факторов, влияющих на характеристики, способствует созданию более эффективных и устойчивых технологий, что соответствует современным требованиям рынка и открывает перспективы для разработки новых материалов с уникальными свойствами.

### Список литературы

1. Gaspar-Cunha, A.; Covas, J.A.; Sikora, J. Optimization of Polymer Processing: A Review (Part I—Extrusion). *Materials* 2022. 15. 384. <https://doi.org/10.3390/ma15010384>.
2. Ketdee, Saraporn and Siripon Anantawaraskul. “Simulation of crystallization kinetics and morphological development during isothermal crystallization of polymers: effect of number of nuclei and growth rate.” *Chemical Engineering Communications* 195 (2008): 1315-1327.
3. Isametova, M.E.; Nussipali, R.; Martyushev, N.V.; Malozyomov, B.V.; Efremkov, E.A.; Isametov, A. Mathematical Modeling of the Reliability of Polymer Composite Materials. *Mathematics*. 2022. V. 10. 3978 p. <https://doi.org/10.3390/math10213978>.

### Б.М. Примаченко

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНОГО КОМПОНЕНТА ДЛЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАСЧЁТОМ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ГРАНИЦ ПОГРЕШНОСТЕЙ

В настоящее время широкое применение находят полимерные композиционные материалы, армированные углеродными тканями (АПКМ). Такие материалы используются в деталях механизмов, машин и различных сооружений. Определение параметров и характеристик полимерного компонента (ПК) с расчётом доверительных границ погрешности имеет важное значение при проектировании новых АПКМ.

Для получения АПКМ с оптимальной структурой и с высокими характеристиками механических свойств ПК должен удовлетворять определённым требованиям. На стадии изготовления: необходимо иметь вязкость, которая при формовании АПКМ позволяет расплаву растекаться равномерно по всей поверхности армирующего компонента (АК) и проникать во все сквозные и объёмные поры тканой структуры; технология приготовления ПК должна исключать выделение каких-либо побочных веществ. После отверждения: деформации при разрыве ПК следует статистически соответствовать деформации при разрыве АК; наличие минимально возможного количества дефектов структуры; незначительная релаксация напряжений после деформации растяжения;

значение адгезионной прочности к АК должно быть не менее 75 МПа, что гарантированно обеспечивает когезионное разрушение АПКМ при деформации растяжения; небольшая по величине объёмная усадка. Анализ различных полимеров с учетом представленных требований позволил выбрать эпоксидно-диановую смолу марки ЭД-20.

Строение образцов отверждённого ПК рассчитывалась с учетом ГОСТ 29104.4-91 и ГОСТ 32656-2014. Длина образцов ПК составляла 400 мм, ширина – 25 мм, толщина ( $h_p$ ) – 3 мм. Для исследования строения, структуры и механических свойств при растяжении ПК было отформовано по 10 образцов из двух различных партий эпоксидной смолы и отвердителя. Экспериментальные исследования строения, структуры и механических свойств ПК были выполнены по стандартным методикам. Разрывная нагрузка ( $A_p$ ) и деформация ( $\varepsilon_p$ ) находились по методике обработки результатов прямых многократных измерений при доверительной вероятности 0,95. Поверхностная и объёмная плотности ( $p_s$ ,  $p_v$ ), разрывное напряжение ( $\sigma_p$ ), модуль упругости образцов ПК ( $E_p$ ), работа разрывной нагрузки при растяжении образцов ( $\Omega_p$ ) определялась по методике получения результатов косвенных измерений при доверительной вероятности 0,95. Работа силы растяжения образцов в рабочем диапазоне абсолютной деформации ( $\Omega_p^w$ ) определялась без оценки погрешности результата измерения.

В результате исследований и расчётов параметров структуры и характеристик механических свойств ПК, выработанного из первой партии смолы и отвердителя, были получены следующие значения:

$$\begin{aligned} h_p &= (3,057 \pm 0,076) \text{ мм}, \\ p_s &= (3369 \pm 64) \text{ г/м}^2, \\ p_v &= (1,102 \pm 0,034) \text{ г/см}^3, \\ A_p &= (2318 \pm 235) \text{ Н}, \\ \varepsilon_p &= (1,085 \pm 0,102) \%, \\ \sigma_p &= (30,15 \pm 3,15) \text{ МПа}, \\ E_p &= (2,779 \pm 0,368) \text{ ГПа}, \\ \Omega_p &= (2,515 \pm 0,327) \text{ Дж}, \\ \Omega_p^w &= 0,534 \text{ Дж}; \end{aligned}$$

из второй партии:

$$\begin{aligned} h_p &= (2,954 \pm 0,087) \text{ мм}, \\ p_s &= (3477 \pm 18) \text{ г/м}^2, \\ p_v &= (1,177 \pm 0,035) \text{ г/см}^3, \\ A_p &= (5574 \pm 1035) \text{ Н}, \\ \varepsilon_p &= (1,515 \pm 0,237) \%, \\ \sigma_p &= (73,69 \pm 13,93) \text{ МПа}, \\ E_p &= (4,864 \pm 1,115) \text{ ГПа}, \\ \Omega_p &= (8,445 \pm 3,118) \text{ Дж}, \\ \Omega_p^w &= 0,920 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Оценки параметров строения и структуры ПК, выработанных из обеих партий эпоксидной смолы и отвердителя, имеют близкие величины с относительно невысокими погрешностями.

Оценки характеристик механических свойств ПК при растяжении обеих партий имеют значительно большие погрешности. Доверительные погрешности могут достигать 20-35 % от оценки характеристики. Достаточно большие погрешности наблюдаются у модулей упругости за счёт их «накапливания» при определении напряжений и относительных деформаций. Эту погрешность необходимо учитывать при использовании модуля упругости ПК в дальнейших расчётах.

**В.Р. Олексенко, А.Е. Соков, Т.Е. Горкина, Ю.А. Петрова, В.А. Липин**

Высшая школа технологии и энергетики  
Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и  
дизайна

## **ФЛОКУЛИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПОЛИАМФОЛИТОВ**

Полиамфолиты – это особый тип полиэлектролитов, в молекулах которых одновременно присутствуют как кислотные, так и основные функциональные группы. Благодаря этому они демонстрируют свойства, характерные для линейных полиэлектролитов, и обладают рядом уникальных особенностей, обусловленных наличием групп разной природы. В зависимости от кислотности среды (рН), полиамфолиты могут вести себя как поликислоты или как [1].

Несмотря на растущий спрос на полиамфолиты в различных отраслях промышленности, в России отсутствует собственное производство этих полимеров. В то же время зарубежные производители используют сложные технологии, требующие дополнительного синтеза исходных мономеров [1,2].

Полиамфолиты нашли своё применение во многих отраслях промышленности, в том числе и в целлюлозно-бумажной промышленности, на этапе очистки воды. Одна из ключевых задач в водоочистке – выбор правильных средств для очистки и определение оптимальных условий их работы. Для удаления взвешенных частиц и коллоидов чаще всего используются флокулянты. Под его действием мелкие частицы взвеси начинают слипаться друг с другом, образуя более крупные агрегаты и под действием силы тяжести начинают оседать [2,3].

Полиамфолитные флокулянты были синтезированы на основе полиакриловой кислоты, алифатических диаминов и аллилбромида, взятых в эквимолярном соотношении.

Для проверки флокулирующей способности синтезированных полиамфолитов в качестве стандартного раствора был выбран раствор глины, поскольку на его примере можно точно зафиксировать процесс флокуляции. В модельные растворы глины добавляли по 5 мл раствора полиамфолита при разных рН. Эффективность флокуляции оценивалась по изменению оптической плотности растворов до и после добавления флокулянта. Из полученных данных следует, что уже через час после добавления полиамфолита раствор становится светлее, чем раствор глины без добавления полиамфолита. Растворы полиамфолитов показали себя эффективными во всём диапазоне величины рН среды.

В результате исследования было показано, что амфотерные флокулянты обладают высокой эффективностью действия в широком диапазоне рН и могут быть применены на целлюлозно-бумажных предприятиях для очистки воды.

### **Список литературы**

1. Kathryn L. Morrissey, Chunlin He, Rebecca Z Chapman, Lucjan Żołnierowski, Mark P Stoykovich. Polyamphoteric flocculants for the enhanced separation of cellular suspensions // Acta BioMaterialia. 2016. P. 192-200.
2. Горкина Т.Е., Суставова Т.А., Липин В.А. Конформационное состояние макромолекулы амфотерного флокулянта // Химия и химическое образование 21 века. 2019. С. 28.

3. Липин В.А., Сустанов Т.А., Горкина Т.Е. Повышение эффективности действия флокулянтов в ЦБП // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологий и дизайна Серия 1. Естественные технические науки. 2017. №5. С. 135-137.

**Д.А. Прибыткова, Е.И. Пряхин**

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

## **ДВУХСЛОЙНАЯ СИСТЕМА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТРУБ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОТ КОРРОЗИИ**

В данном исследовании приводится оценка характеристик двухслойного полимерного коррозионностойкого покрытия на основе эпоксидной и полиуретановой эмалей. Область применения покрытия: для стальных труб горячего водоснабжения с негерметичным изоляционным слоем при бесканальной подземной прокладке.

Как известно, разные полимерные материалы, в зависимости от структуры связей, обладают своими специфическими свойствами, такими как химическая стойкость, антифрикционность, повышенная прочность или способность образовывать прочные связи с другими материалами, однако, стоимость покрытий из таких материалов может нивелировать положительные эффекты и заставить предприятия искать другое, более дешевое решение.

Для работы выбраны две отечественных разновидности эмалей эпоксидная и полиуретановая эмаль. Были произведены эксперименты по оценке следующих качеств этих покрытий: адгезия методом царапания, прочность на удар, прочность на изгиб, испытания на сплошность и пробой.

Свойства выбранных эмалей оценивались при различных условиях подготовки образцов. Были изучены образцы со следующими методами подготовки поверхности: пескоструйная обработка, лазерная обработка, а также образцы с промежуточным (грунтующим) слоем в виде различных фосфатных композиций и без него. По итогам экспериментов определено покрытие с лучшими показателями.

К рассмотрению предлагается двухкомпонентное покрытие с промежуточным слоем из эпоксидной эмали и внешним – с полиуретановой эмалью. Эпоксидный слой образует прочное соединение с поверхностью металла и выступает в роли грунтующего для полиуретана. Полиуретановая эмаль защищает металл от воздействия химически активных компонентов в грунте.

Комбинация двух эмалей позволила получить покрытие, со следующими параметрами:

- адгезия методом решетчатого надреза – высший балл;
- прочность при ударе – 50 см на приборе Константа У-1А;
- испытание на изгиб – выдержало изгиб вокруг прутка диаметром 1 мм;
- испытание на изгиб метолом Эриксона - образцы выдержали нагрузку выше 9,5

МПа;

- испытание на сплошность показало наличие 1 единичного дефекта на 3 тестовых образца, метод нанесения покрытия – вручную, кистью.

### Список литературы

1. Прибыткова Д.А., Пряхин Е.И., Хоришков Д.Г. Испытания коррозионностойких покрытий на образцах с предварительной лазерной обработкой // Дизайн. Материалы. Технология. 2024. № 2(74). С. 190-194.
2. Song J., Huang H. et al. Status and prospects of surface texturing: design, manufacturing and applications // Surface Science and Technology. 2023. Vol.1. No. 21.
3. Бойцов А.Ю. Новые системы защитных полиуретановых покрытий // Территория Нефтегаз. 2008. №10. С. 52-53.

### М.А. Егорова, А.М. Литвинов

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

### ЦИФРОВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В производствах текстильной и легкой промышленности используется большое число текстильных материалов различного микро и макро-строения. По типу строения текстильных материалов их можно условно разделить на две группы.

Первую группу составляют образцы, имеющие простую макроструктуру, то есть различного рода синтетические нити. Ко второй группе относятся материалы, имеющие более сложную макроструктуру, а именно, состоящие из комбинации простых материалов. К этой группе относятся всевозможные ткани, ленты, пряжа, жгуты, искусственные кожи и т.д.

Активные методы исследования физико-механических свойств полимеров начались в середине прошлого столетия [1]. Основу этих исследований составляют феноменологические теории, базирующиеся на эксперименте.

В основу одного из развиваемых направлений заложены представления об активирующем характере механических воздействий в зоне действия неразрушающих нагрузок и деформаций. Математические модели, описывающие релаксацию, базируются на учете времен релаксации и, соответственно, времен запаздывания - для описания ползучести.

В настоящее время наиболее изученной остается первая группа материалов, для которой созданы математические модели, удовлетворительно описывающие их физико-механические свойства.

Здесь, например, можно выделить модель, в основе которой лежит предположение о нормальной форме распределения релаксирующих частиц по собственным временам релаксации и запаздывания.

Данная модель, как и некоторые другие, позволяют по экспериментальным "семействам" релаксации и ползучести рассчитать основные физико-механические характеристики синтетических материалов, принадлежащих преимущественно к первой группе [2].

Однако, как показала экспериментальная проверка, при применении указанных методик к материалам второй группы точность определения физико-механических характеристик снижается. Данное обстоятельство, как и тот факт, что вторая группа материалов, представленная значительно шире, чем первая группа, в настоящее время менее изучена, породило причины поиска новых математических моделей вязкоупругих

свойств, учитывающих сложную макроструктуру изучаемых объектов [3].

Основная задача, которую необходимо решить при проектировании средств индивидуальной защиты человека от механических воздействий, заключается в определении показателей оценки физико-механических свойств ударозащитных прокладок и их количественных значений, адекватных критериям травмоопасности.

Эксперименты показали, что математическая модель вязкоупругих свойств материала сложного макро-строения должна быть построена с учетом суммирования многообразия распределений частиц по собственным временам релаксации и запаздывания, образующих материал мононитей.

Такое распределение, с одной стороны, должно быть близким к нормальному, а с другой стороны, обладать замедленной сходимостью функции распределения к своим асимптотическим значениям, что соответствует расширенному спектру релаксации. В качестве распределения указанного типа предпочтительно выбрать распределение на основе функции нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ) [4]

$$\varphi(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_n} \cdot \ln \frac{t}{t_1} \right), \quad (1)$$

где  $t$  - текущее время,  $t_1$  - базовое время,  $1/b_n$  - структурный параметр. Отличительной особенностью данного распределения является принадлежность функции НАЛ к классу элементарных функций, что значительно упрощает интегро-дифференциальные преобразования.

Методики определения вязкоупругих характеристик и дальнейшего прогнозирования вязкоупругих процессов, основанные на применении функции НАЛ, применительно к таким текстильным материалам сложного макро-строения, как пряжа, ткани, ленты, жгуты и др., как показала проверка, дают результаты близкие к экспериментальным.

Для математического моделирования процессов релаксации и ползучести полимерных текстильных материалов можно использовать математические модели с функцией НАЛ [5]

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \cdot \varphi_{\varepsilon t}, \quad \varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{ne}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right), \quad (2)$$

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \cdot \varphi_{\sigma t}, \quad \varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right), \quad (3)$$

где  $t$  - время,  $1/b_{ne}$  - параметр интенсивности процесса релаксации,  $1/b_{n\sigma}$  - параметр интенсивности процесса ползучести,  $\tau_\varepsilon$  - время релаксации,  $\tau_\sigma$  - время запаздывания,  $E_{\varepsilon t} = \sigma/\varepsilon$  - релаксирующий модуль,  $E_0$  - модуль упругости,  $E_\infty$  - модуль вязкоупругости,  $D_{\sigma t} = \varepsilon/\sigma$  - податливость,  $D_0$  - начальная податливость,  $D_\infty$  - предельно-равновесная податливость,  $\varepsilon$  - деформация,  $\sigma$  - напряжение, для определения вязкоупругих характеристик материалов технического назначения.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### Список литературы

1. Переборова Н.В. Цифровое прогнозирование деформационных режимов эксплуатации полимерных волокнистых материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 18-21.
2. Переборова Н.В. Разработка критериев цифровой качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2. С. 93-98.
3. Переборова Н.В. Управление качеством материалов текстильной и легкой промышленности // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 154-160.
4. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Овсянников Д.А. Цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 5-10.
5. Чалова Е.И., Переборова Н.В. Математическое моделирование эксплуатационных процессов полимерных парашютных строп // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 19-26.

### М.А. Сычева, Р.А. Зильберг

Уфимский университет науки и технологий

### ХИРАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НИКЕЛЯ ( II ), ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ В КАЧЕСТВЕ МОДИФИКАТОРА, ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНАНТИОМЕРОВ НАПРОКСЕНА

Наиболее популярным обезболивающим, противовоспалительным и жаропонижающим препаратом является напроксен. Напроксен существует в виде двух форм – R- и S-энантиомеры, причем фармацевтическая активность S-изомера в 28 раз сильнее, а действие R-изомера оказывает пагубное влияние на клетки печени. В связи с данными фактами на фармацевтическом рынке выпускаются препараты исключительно на основе S-энантиомера напроксена, и его энантиочистота контролируется тщательным образом [1].

Для контроля качества лекарственных препаратов существуют различные методы, такие как хиральная хроматография, круговой дихроизм, ЯМР-спектроскопия и т.д. Все они высокоэффективны, но достаточно дороги и требуют высококвалифицированного персонала. Альтернативными методами для определения энантиочистоты могут служить электрохимические методы, в частности, вольтамперометрия, так как они просты в исполнении, дешевы и обладают хорошей воспроизводимостью.

В данном исследовании был разработан новый энантиоселективный вольтамперометрический сенсор [2] на основе пастового электрода из графитированной термической сажи Carbolblack C [3] (CBPE), модифицированного хиральным комплексом никеля Ni(II)-Cl-(S). Установлено, что сенсор CBPE/Ni(II)-Cl-(S) обладает хорошей селективностью к энантиомерам напроксена ( $i_{pS1}/i_{pR1} = 1,43$ ;  $i_{pS2}/i_{pR2} = 1,27$  для первого и второго пиков соответственно). Линейный диапазон концентраций от  $5,0 \cdot 10^{-5}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$  М и от  $2,0 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$  М, с пределами обнаружения для первого и второго пиков  $5,03 \cdot 10^{-6}$  М и  $4,70 \cdot 10^{-6}$  М для S-Nap и  $7,01 \cdot 10^{-6}$  и  $6,43 \cdot 10^{-6}$  для R-Nap соответственно.

Наибольшую чувствительность (6,44 и 6,90 мкА/мм для первого и второго пиков) сенсор проявляет к S-Nar. Предложенный сенсор успешно апробирован для определения энантиомеров напроксена в смесях, в биологических жидкостях, в лекарственных формах препаратов. При этом относительное стандартное отклонение в моче колеблется в пределах 2,0–3,9 %, в плазме крови в диапазоне 1,6–4,7%, в лекарственных препаратах не превышает 2,6 %.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00340, <https://rscf.ru/project/23-23-00340/>**

#### **Список литературы**

1. Lin G-Q, You Q-D, Cheng J-F. Chiral drugs: chemistry and biological action. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey; 2011.
2. 18. Maistrenko VN, Evtyugin GA. Enantioselektivnyye sensory (Enantioselective Sensors). Moscow: Laboratoriya Znaniy: 2023.
3. Zilberg R, Teres Yu, Agliulin M, Vakulin I, Bulysheva E, Sycheva M, Maistrenko V. Chiral voltammetric sensor on the basis of nanosized MFI zeolite for recognition and determination of tryptophan enantiomers. *Electroanalysis* 2024. 36(5). e202300375.

**Д.Ю. Селякова<sup>1</sup>, О.А. Молоканова<sup>1</sup>, О.О. Бабич<sup>1</sup>, Е.В. Кудрявцева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ВОЛОКОН, ОБРАБОТАННЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ CU-AG**

Тканевые поверхности, к которым часто прикасаются, способны служить резервуаром для патогенных микроорганизмов. Также текстильные материалы могут впитывать влагу, что благоприятствует росту микробов. Этот рост приводит к неприятному запаху, кожным инфекциям, аллергическим реакциям, ухудшению состояния тканей, а также к серьезным заболеваниям. Данную проблему может решить создание текстиля с антибактериальными свойствами. Среди множества вариантов придания тканям биологической активности особенно перспективным считается использование нанометаллических частиц. Начиная с XX века интерес к наночастицам серебра и меди только возрастает, и материалы на их основе демонстрируют хорошие возможности получения текстильных материалов с биологической активностью.

В данной работе были созданы образцы синтетических волокон, обработанные металлическими наночастицами; исследована структура, биологическая активность и эксплуатационные свойства полученных материалов. Волокна были синтезированы методом экструзии из полипропилена и полиамида. Обработка производилась путем осаждения биметаллических наночастиц медь-серебро по запатентованной методике, разработанной в Санкт-Петербургском государственном университете промышленных технологий и дизайна. Преимущество данной методики заключается в введении наночастиц вглубь текстильной основы, образовании частиц *in situ* и синергии бактерицидных свойств серебра и меди.

Анализ структуры полученных образцов был проведен с использованием сканирующей электронной микроскопии и ИК-спектроскопии. Дана оценка антибактериальным свойствам полученных материалов по отношению к грамположительным и грамотрицательным бактериям, а также микроскопическим грибам по методу качественного анализа по ГОСТ ISO 20645-2014. Для образцов, показавших биологическую активность, были проведены испытания на эксплуатационные свойства – стирка по ГОСТ ISO 105-C10–2014 с дальнейшим определением остаточной биологической активности.

Результаты исследования показали, что полученные полипропиленовые волокна обладают антибактериальными свойствами по отношению к широкому спектру микроорганизмов: грамположительные и грамотрицательные бактерии, микроскопические грибы. Благодаря прочному креплению наночастиц к волокнам внутри материала наблюдается стабильный антибактериальный эффект, который дольше не вымывается в ходе стирки изделий. Таким образом, созданные в ходе исследования волокна можно использовать для получения антибактериального текстиля с пролонгированным сроком службы. Композитные волокна можно вплетать в ткани различного состава. Проведение дальнейших исследований в данной области имеет перспективу создания антибактериального текстиля, устойчивого к многократным стиркам, что несет пользу для развития здравоохранения, и, следовательно, улучшения качества жизни.

## **В.А. Лысенко**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРКОЛЯЦИИ В УГЛЕРОДНЫХ ПОЛИВИНИЛСПИРТОВЫХ ВОЛОКНАХ**

Карбонизованные поливинилспиртовые волокна обладают сверхнизким удельным объёмным электрическим сопротивлением, меньшим удельного объёмного электрического сопротивления золота.

Уменьшение удельного объёмного электрического сопротивления с увеличением температуры карбонизации до уровня не более  $0,2 \cdot 10^{-3}$  мОм·см при температурах карбонизации в диапазоне 743 – 760 °С обусловлено образованием поликумуленовых и полииновых связей в структуре углеродных волокон. При дальнейшем увеличении температуры карбонизации происходит разрушение электропроводящих связей в углеродных волокнах. Это приводит к закономерному увеличению удельного объёмного электрического сопротивления.

Количественный анализ обнаруженного явления затруднен тем, что экспериментальные зависимости измеренных значений электрического сопротивления волокон  $R(T)$  при разных температурах карбонизации вдоль волокон носят дискретный характер. Вместе с этим плотность распределения сопротивления вдоль волокна  $r(T)$  является гладкой и непрерывной функцией температуры (за исключением, быть может, перехода в состояние со сверхнизким электрическим сопротивлением), включая обратный переход в проводящее состояние при дальнейшем увеличении температуры карбонизации.

В докладе подробно рассмотрена физическая природа явления сверхнизкого

электрического сопротивления углеродных поливинилспиртовых волокон и постановка задачи математического моделирования. Разработан алгоритм перехода от экспериментальных зависимостей  $R(T)$  к зависимостям  $r(T)$ , для которых функция  $R(T)$  является первообразной. Предложен и проанализирован алгоритм линейного сглаживания зависимостей  $r(T)$  с получением сглаженных зависимостей  $rs(T)$ . Установлено, что зависимости  $rs(T)$  хорошо аппроксимируются полиномами четвертой степени.

Вместе с тем ранее было показано, что изменение электрического сопротивления вследствие образования поликумуленовых и полииновых связей в структуре углеродных волокон носит перколяционный характер, что приводит к резкому снижению электросопротивления с увеличением температуры карбонизации. На кривой зависимости  $rs(T)$  отчетливо видны три перколяционных перехода: при температурах карбонизации 619, 678 и 743 °С.

Показано, что зависимость  $rs(T)$  хорошо аппроксимируется суммой сигмоидальных функций. Найдены параметры аппроксимации. Проведено математическое моделирование влияния параметров аппроксимации на перколяционные переходы.

Таким образом в результате проведенных исследований построены математические модели, адекватно описывающие перколяционные переходы в поведении электрического сопротивления при увеличении температуры карбонизации углеродных волокон на основе поливинилового спирта.

**И.М. Егоров, А.А. Козлов**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ВЫЧИСЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Деформацию, возникающую в полимерных текстильных материалах можно условно разделить на три компонента: упругую, высокоэластическую и пластическую. Разделение величины полной деформации на компоненты считается непростой задачей, в связи с одновременным их возникновением и дальнейшим развитием. Только лишь посредством физически обоснованного аналитического описания изучаемой реологии полимерных текстильных материалов в сочетании с измерением различных деформационных процессов можно получать информацию о сложной картине распределения частиц материала по временам релаксации и по временам запаздывания [1].

Из опыта работы с полимерными текстильными материалами известно, что упругая, высокоэластическая и пластическая компоненты их деформации определенным образом зависят от уровня приложенного механического воздействия [2].

Отсюда следует, что по одной из кривых ползучести или релаксации невозможно получить какую-либо доступную информацию о временах запаздывания или релаксации [3].

Только лишь посредством физически обоснованного аналитического описания изучаемой реологии полимерных материалов в сочетании с измерением различных деформационных процессов можно получать информацию о сложной картине

распределения частиц материала по временам релаксации и по временам запаздывания [4].

Процесс деформирования полимерных текстильных материалов с постоянной скоростью  $\dot{\varepsilon}$  в начальной стадии диаграммы растяжения аналитически описывается феноменологическим интегральным уравнением нелинейно-наследственного типа, которое может быть записано в виде:

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \phi'_{\varepsilon s} ds. \quad (1)$$

В связи с тем, что все параметры и функции, входящие в (1), имеют вполне определённый физический смысл, уравнение (1) можно считать математической моделью механических свойств полимерного текстильного материала с конкретной спектральной интерпретацией.

Как в общем случае, когда  $\dot{\varepsilon} \neq const$ , так и в частном случае, когда  $\dot{\varepsilon} = const$ , упругая ( $\varepsilon_{io}$ ) и поглощаемая ( $\varepsilon_{ii}$ ) компоненты деформации могут быть определены по формулам

$$\varepsilon_{io} = E_o^{-1} \sigma_t, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ii} = \varepsilon_t - \varepsilon_{io}, \quad (3)$$

либо расчётным прогнозом исходя из (18) с учётом (19) и (20) [14-16]

$$\varepsilon_{ii} = \left(1 - E_\infty E_o^{-1}\right) \int_0^t \varepsilon_{t-s} \phi'_{\varepsilon s} ds, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{io} = \varepsilon_t - \varepsilon_{ii}. \quad (5)$$

Относительные доли упругой и поглощаемой компонент деформации соответственно равны

$$\varepsilon_{io} \varepsilon_t^{-1} = E_o^{-1} \sigma_t \varepsilon_t^{-1}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ii} \varepsilon_t^{-1} = 1 - \left(1 - E_\infty E_o^{-1}\right) \varepsilon_t^{-1} \int_0^t \varepsilon_{t-s} \phi'_{\varepsilon s} ds. \quad (7)$$

При расчётах по (2) - (7) используются соответствующие вязкоупругие параметры-характеристики  $E_o$ ,  $E_\infty$ ,  $f'_{\tau \varepsilon}$ ,  $A_\varepsilon$ .

Таким образом, разделение полной деформации  $\varepsilon_t$  на упругую  $\varepsilon_{io}$  и поглощаемую  $\varepsilon_{ii}$  компоненты можно проводить либо используя экспериментальную диаграмму растяжения (2), (3), либо расчётным прогнозом (4), (5) [5].

Таким образом, была решена задача по разложению деформации, возникающей в полимерных текстильных материалах на три компоненты: упругую, высокоэластическую и пластическую.

**Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2023-0003.**

### Список литературы

1. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Овсянников Д.А. Цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 5-10.
2. Чалова Е.И., Переборова Н.В. Математическое моделирование эксплуатационных процессов полимерных парашютных строп // Вестник Санкт-

Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 19-26.

3. Переборова Н.В. Инновационные методы контроля качества и функциональности полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 27-32.

4. Переборова Н.В. Цифровое прогнозирование деформационных режимов эксплуатации полимерных волокнистых материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 18-21.

5. Переборова Н.В. Разработка критериев цифровой качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2. С. 93-98.

**М.А. Селянкин, М.М. Ромашева, Е.Ю. Демьянцева, Р.А. Смит**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

## **ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ СТЕБЛЕЙ ТОПИНАМБУРА И СОЛОМЫ ПШЕНИЦЫ**

Данное исследование посвящено получению порошковой целлюлозы из стеблей топинамбура и соломы.

В качестве сырья были выбраны стебли топинамбура, произрастающего в черте города Санкт-Петербурга. Компонентный состав сырья: 11% водорастворимые вещества, 2,8% легкогидролизуемые, 5,3% трудногидролизуемые, 1,8% эфирорастворимые вещества, целлюлоза по Кюршнеру – 61,9%. В качестве предварительной обработки применяли предварительную экстракцию дистиллированной водой в течение 60 минут при температуре 100°C. Делигнификацию проводили в стационарном режиме при температуре 100°C 10% раствором NaOH.

Микрокристаллическая целлюлоза была получена в два этапа: 1) делигнификация исходного растительного материала, 2) гидролиз надуксусной кислотой. Степень полимеризации полученного гидролизованного продукта определена вискозиметрически [1].

При делигнификации 10% раствором NaOH (100°C) стеблей топинамбура с предварительной экстракцией был получен целлюлозный материал. После его гидролиза выход порошкового материала составил 59%, степень полимеризации - 190. При гидролизе целлюлозного материала, полученного без предварительной экстракции, выход порошковой целлюлозы составил 44%, а степень полимеризации - 320. Полученный порошковый материал соответствовал по определяемым показателям соответствовал МКЦ [2].

В качестве альтернативного сырья была выбрана солома злаковых культур. После делигнификации соломы пшеницы с предварительной экстракцией выход составил 60% при степени полимеризации 320, а без предварительной обработки - 63% и 340 соответственно. Выход порошкового материала делигнифицированной соломы составил

60% при степени полимеризации 320. Предварительная обработка соломы позволила увеличить выход порошкового материала на 3%.

Таким образом, стебли топинамбура представляют собой более перспективное сырье для получения порошковой целлюлозы.

#### **Список литературы:**

1. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учебное пособие для вузов. // М.: «Экология». 1991. 320 с.
2. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Микрористаллическая целлюлоза // Химия древесины и синтетических полимеров: учеб. для вузов. СПб., 1999. С. 578-579.

#### **Ю.А. Петраш, А.А. Безруков, О.И. Гладунова**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

#### **СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ГРАФЕНАМИ И ГРАФЕНОВЫМИ НАНОПЛАСТИНАМИ**

Существует ряд исследований, в которых говорится, что углеродные наночастицы, в том числе графены, введенные в полимерную матрицу позволяют улучшить те или иные характеристики полимерных нанокomпозитов. Однако данные о влиянии количества содержащихся графенов на свойства готовых нанокomпозитов весьма противоречивы. Вероятно, это связано с различными способами подготовки и введения графенов в полимерную матрицу [1], [2].

В работе исследовали влияние содержания наполнителя – графенов и графеновых нанопластин в композиционном материале на его прочностные свойства. Методом заливки в мягкие силиконовые формы были получены образцы полимерных нанокomпозитов с дисперсными наполнителями в виде графенов и графеновых нанопластин. В качестве матрицы в композитах использовали эпоксидную смолу. Содержание графенов и графеновых нанопластин варьировали от 1 до 5 масс. %, от массы полимерной матрицы. Перед введением в эпоксидное связующее графены и графеновые нанопластины были предварительно термообработаны, а затем перенесены в органический легколетучий растворитель (ЛОР) для диспергирования. Диспергирование графенов и графеновых нанопластин в ЛОР осуществляли с помощью ультразвукового диспергатора.

Показано, что все полученные образцы имели повышенную твердость и трещиностойкость. Максимальная ударная прочность  $13,5 \text{ Дж/см}^3$  достигалась при содержании графенов и графеновых нанопластин 4 масс. %. Дальнейшее увеличение массового содержания графенов и графеновых нанопластин не привело к увеличению ударной прочности. При содержании графенов и графеновых нанопластин 4 масс. % композиты обладают и наибольшей теплопроводностью, до  $0,359 \text{ Вт/(м*К)}$ , что практически в 2 раза выше, чем для ненаполненных графенами образцов эпоксидной смолы.

*Научный руководитель: и.о. зав. кафедрой, доцент, к.т.н. Асташкина О.В.*

### **Список литературы**

1. Гудков М.В., Столярова Д. Ю., Шиянова К. А. Полимерные композиты с графеном и его производными как функциональные материалы будущего // Высокомолекулярные соединения. Серия С. 2022. Т. 64. № 1. С. 45–68
2. Патент РФ 2744709 С2, МПК С08F 2/44; С08F 2/56; С08F 12/08; С08К 3/04; В82В 3/00. Композиция, содержащая графен и графеновые нанопластины, и способ ее получения / ФЕЛИЗАРИ Риккардо, АУТЬЕРИ Вивьяна, заявитель и правообладатель ВЕРСАЛИС С.П.А. 2018129141; заявл. 26.01.2017; опубл. 15.03.2021

**М.М. Ромашева, В.А. Панова, Е.Ю. Демьянцева, Р.А. Смит**

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая Школа Технологии и Энергетики

### **ВЫДЕЛЕНИЕ РЕДУЦИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Клубни топинамбура являются источником для получения инулина и сахарных сиропов. Однако, использование стеблей для производства продуктов с высокой добавленной стоимостью представляет перспективный подход к утилизации надземной части топинамбура, учитывая его широкий ареал произрастания и большую массу надземной части.

В качестве сырья были использованы стебли топинамбура, собранные после естественного засыхания в октябре в городе Санкт-Петербурге. Анализ показал, что содержание легко- и трудногидролизующих веществ составляет соответственно 3% и 5%, дихлорметаном экстрагируются 2% веществ, при этом содержание лигнина по методу Комарова составляет 29%, а целлюлозы по методу Кюршнеру – 62%. Экстракцию проводили дистиллированной водой при температуре 100 °С в течение 60 минут, гидромодуль составил 1:10.

Для извлечения редуцирующих веществ были выбраны 1% водные растворы неионогенных поверхностно-активных вещества: неонол АФ 9-10 и кокамидопропилбетаин. В результате было выявлено, что при экстракции с неонолом АФ 9-10 было выделено 7,8 г/л, что соответствовало 0,15% а.с.с. к стеблям, при этом при экстракции с кокамидопропилбетаином было получено на 1 г больше редуцирующих веществ. Кокамидопропилбетаин, вероятно, имеет более низкую точку помутнения системы, чем неонол. При дегидратации углеводной цепи образуется гетерогенная система ПАВ-растворитель, таким образом поверхностно-активное вещество не сорбируется в порах и способствует снижению поверхностного натяжения.

### **Список литературы**

1. Элмуродов А. А. Особенности технологии возделывания топинамбура в условиях Зарафшанской долины // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее : сборник статей VI международной научно-практической конференции, Пенза, 12 декабря 2016 года. Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2016. С. 44-50.

Научное издание

# **ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НАУКИ О ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**  
V Международной научной конференции

Оригинал-макет подготовлен В. Р. Грабской

Подписано в печать 21.11.2024 г. Формат 60×84 1/16.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,1 Тираж 500 экз. Заказ 236  
Электронный адрес: [sci\\_conf@mail.ru](mailto:sci_conf@mail.ru)

Отпечатано в типографии ФГБОУВО «СПбГУПТД»  
191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, 26