

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



Международная научно-техническая конференция
«Полимерные композиты
и трибология»

International Scientific and Technical Conference
«Polymer Composites
and Tribology»

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Государственное научное учреждение
«Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси
(ИММС НАН Беларуси)»

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ **(ПОЛИКОМТРИБ-2025)**

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
(Гомель • Беларусь, 24—27 июня 2025 г.)

Тезисы докладов



Гомель
ИММС НАН Беларуси
2025

УДК 620.2+678+621.891
П50

Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2025) : тезисы докладов международной научно-технической конференции / Национальная академия наук Беларуси; редкол.: В.Н. Адери́ха [и др.]. — Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2025. — 240 с.

ISBN 978-985-6477-69-3

В сборнике представлены тезисы докладов участников международной научно-технической конференции «**Полимерные композиты и трибология**», посвящённые современным проблемам физики и физической химии полимерных композиционных материалов, эффективных технологий получения полимерных композитов и изделий из них, оценки эксплуатационных свойств полимерных материалов и их применению в различных отраслях народного хозяйства, фундаментальным и прикладным проблемам современной трибологии, включая трибофизику, трибомеханику и трибоматериаловедение.

Редакционная коллегия: В.Н. Адери́ха, С.П. Богданович, Е.Н. Волнянко, П.Н. Гракович, А.Я. Григорьев, С.В. Зотов, Л.Ф. Иванов, В.Н. Коваль, Ю.М. Кривогуз, В.П. Селькин, В.П. Сергиенко, Е.М. Толстопятов, В.А. Шелестова, С.В. Шилько, В.М. Шаповалов, В.Ю. Шумская

Подписано в печать 20.06.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Напечатано на ризографе. Усл. печ. л. 25,5. Тираж 30 экз. Заказ № 06-25

ИММС НАН Беларуси, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32-а. Регистрация № 1/244 от 25.03.14.

© ИММС НАН Беларуси

© Редакторы-составители: Мышкин Н.К., Григорьев А.Я., Шумская В.Ю., 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	i
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	3
Biomimetics and Tribology of Biological Surfaces Feodor M. Borodich, Qian Cheng, Zhizhen Jiang, Zaida Gao, Xiaoqing Jin, and Stanislav N. Gorb	4
Metal-Polymer Research Institute: Research and Innovation Potential A.Ya. Grigoriev	5
Development of Advanced Technology and Sustainable Tribology in China V. Levchenko	6
“Green” Tribology and Polymer Composites N.K. Myshkin	7
Полимерные композиционные материалы для Арктики А.А. Охлопкова.....	8
Иерархический дизайн композитов на основе суперконструкционных термопластов С.В. Панин	9
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	
Секция 1. Физико-химические основы получения и переработки полимеров	10
Структура и свойства композиционных материалов, модифицированных частицами оксида магния и карбида бора О.А. Беляк, А.М. Ананко, А.Д. Захаров, К.А. Лещев	11
Полимерные нанокомпозиты на основе СВМПЭ, модифицированного неорганическими наночастицами и бромированным СВМПЭ Р.В. Борисова, С.Н. Данилова, Т.А. Охлопкова, Н.Н. Лазарева, А.А. Охлопкова	12
Экспериментальное и теоретическое изучение электропереноса в полиимидных пленках и композиционных материалах М.Э. Борисова, В.Е. Крафт, Б.М.Д.Н.С. Джайасингхе	13
Получение тонкопленочных композиционных мембран методом межфазной поликонденсации Е.С. Бурть, Т.В. Плиско, А.В. Бильдюкевич.....	14
Влияние углеродных наночастиц на свойства углеволокнистого композиционного материала на основе частично-кристаллического полиимида Г.В. Ваганов, Е.Н. Попова, Е.М. Ивановка, А.М. Камалов, В.В. Ваганов, В.Е. Юдин	15
Механические свойства смесей полиэтилентерефталата и поликарбоната, армированных короткими стекловолокнами В.В. Дубровский.....	16
Влияние функционализированных углеродных нанотрубок на структуру и свойства композитов на основе линейного полиэтилена низкой плотности О.В. Кропотин, Д.В. Соколов, Д.А. Ставров.....	17
Разработка оптических поляризаторов видимого спектрального диапазона на основе сенсibilизированного поливинилового спирта С.В. Лихоманова, Н.В. Каманина	18
Влияние типа технического углерода на физико-механические свойства полиамида 6 Н.А. Марусенко, С.П. Богданович.....	19

Исследование процесса образования гидроксibenзол-метанальных олигомеров С.С. Негматов, Н.С. Абед, Т.О. Камалов, Ш.А. Умаров, Р.И. Исмаилов	20
Синтез анионита на основе хлорированного полипропилена с полиэтиленполиамином С.С. Негматов, Н.С. Абед, Т.О. Камалов, О.Х. Хасанов, Р.И. Исмаилов	21
Влияние дисперсности компонентов композиционной смеси на структуру и свойства композитов на основе полиэтилена высокой плотности, наполненного техническим углеродом Е.А. Рогачев, Е.А. Дроздова, А.А. Каленчук, Е.Г. Глухова	22
Апробация методики определения трещиностойкости полимерных материалов А.П. Сазанков, Т.Ц. Дамдинова, З.Ш. Дамдинов	23
Эффективность фильтрации аминного абсорбента многослойными фильтроэлементами из полипропилена В.В. Снежков, В.Ю. Шумская, В.Ю. Гарбарук	24
Исследование сорбции α-токоферола на сверхвысокомолекулярном полиэтилене Д.Н. Сидорова, Н.А. Слепцов, А.М. Спиридонов, А.А. Охлопкина	25
Получение мономерных 1,3-дизамещенных 5-иминотетразолов Ю.М. Юркова, Ю.В. Григорьев	26
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	
Секция 2. Новые многофункциональные полимерные композиты	27
Assessment of Localization Effects Due to Inhomogeneity Based on the Numerical Equivalent Inclusion Method Xiaoqing Jin, Kuanyu Liu, Zhizhen Jiang, Pu Li, and Feodor M. Borodich	28
Sustainable Polyurethane Composites with Dynamic Bonds for Enhanced Thermal Energy Storage T. Philas, P. Zhang, P. Ying, H. Ge, C. Lin, M. Huang, T. Yang, J. Wu, T. Wang, A.Ya. Grigoriev, D. Gutsev, N.K. Myshkin, and V. Levchenko	29
Modifying Dielectric Properties Of Fluorinated Polyimide Nanocomposites With Functionalized Carbon Nanotubes Baode Zhang, Evalds Pentjuss, Juris Bitenieks, Janis Kleperis, and Andrey N. Aleshin	31
Влияния концентрации алмазных зёрен на эксплуатационные показатели алмазных отрезных кругов В.Е. Бабич	32
Влияние содержания модифицированных углеволокнистых наполнителей на вязкоупругие свойства композиционных материалов на основе ПТФЭ А.Л. Башлакова	33
Полимерно-кристаллические оптические композиты для люминесцентных светопреобразователей А.А. Бойко, Е.Н. Подденежный, Н.Е. Дробышевская	34
Легкие и термостойкие волокнистые композиционные материалы на основе пенополиимидов Г.В. Ваганов, К.С. Полотнянщиков, В.М. Светличный, Е.Н. Попова, В.Е. Юдин	35
Медико-технические аспекты создания покрытия протеза для герниопластики Н.С. Винидиктова, Е.Л. Артюшков, Е.Ю. Дорошко	36
Биоэлектретное покрытие на протез кровеносного сосуда Н.С. Винидиктова, Д.Ю. Дорошко, Е.А. Цветкова	37
Пьезоэлектрические свойства трековых мембран на основе поливинилиденфторида Е.А. Волгина, Д.Э. Темнов	38
О причине аномально быстрой лазерной абляции ПТФЭ под действием излучения CO₂-лазера в вакууме М.М. Гут	39

Расчетное определение статической и динамической грузоподъемности металлополимерных подшипников скольжения	
К.Ю. Зерщиков, А.А. Елкин	40
Разработка методов борьбы с обледенением при развитии энергетических технологий в условиях изменения климата	
И.К. Кабардин, В.О. Зуев, М.Р. Гордиенко, С.В. Какаулин, В.Г. Меледин, С.В. Двойнишников	41
Дисперсно-упрочнённые композиционные материалы системы полимер – диоксид кремния	
П.А. Костюкевич, А.М. Кузей, А.В. Францкевич	42
Электрофизические свойства композиционных полиимидных нетканых материалов с кремнийорганическими и фторсодержащими наполнителями	
В.Е. Крафт, М.Э. Борисова, А.М. Камалов.....	43
Полимерные композиты на основе политетрафторэтилена и монтмориллонитовых глин	
Н.Н. Лазарева, А.А. Охлопкова, Ю.В. Капитонова, П.Н. Тарасова.....	44
Влияние химической функционализации углеродного волокна на свойства полимерного композиционного материала	
Д.А. Негров, В.Ю. Путинцев, Е.В. Князев, А.И. Готов, Д.А. Вебер.....	45
Численное моделирование деформирования и разрушения композиционных материалов	
А.В. Омелюсик, А.В. Шмелев	46
Электрофизические свойства полиимидных материалов и композитов на их основе	
А.А. Павлов, М.Э. Борисова, А.М. Камалов, А.Л. Диденко.....	47
Получение компонентов эндопротезов суставов из СВМПЭ шаржированием в него частиц губчатого порошка титана	
В.В. Савич, Р.П. Голодок, А.М. Тарайкович.....	48
Сравнение фторопластовых композитов с разными видами углеродных волокон	
В.А. Шелестова, И.С. Шилько, В.А. Стратанович, В.А. Ломач	49
Обоснование применимости пленки на основе этилен-тетрафторэтилена для изготовления мембранных элементов конструкций	
С.В. Шилько, Т.В. Дробыш, А.П. Сазанков	50
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	
Секция 3. Трибология и трибоматериаловедение	51
Application of a Physics-Informed Neural Network to Investigate the Effect of Surface Roughness on the Pressure Distribution within a Thin Lubricant Film	
A. Kovalev, D. Yessimova, Y. Meng, N.K. Myshkin, J. Wu, and V. Levchenko.....	52
Химическая модификация индустриального масла на основе растительного сырья	
Ф.А. Григорьев, Ю.М. Юркова	53
Моделирование движения твердых тел по плоскости с ортотропным адгезионным взаимодействием	
Н.Н. Дмитриев, Е.М. Петроковец	54
Научно-технологические основы получения пластичных смазочных материалов с гибридной дисперсной фазой	
А.В. Ивахник, В.И. Жорник	55
Анализ продуктов износа пары трения спеченный фрикционный материал-стальное контртело	
А.Ф. Ильющенко, А.В. Лешок, А.Н. Роговой, А.Г. Томашевский	56
Моделирование механических и трибологических свойств композиционных покрытия TiN/a-C	
В.И. Колесников, О.А. Беляк, Д.В. Максимов, М.С. Горин, М.М. Четверик	57
Антифрикционный эвтектический силумин с мелкокристаллическим глобулярным кремнием	
Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко.....	58

Сравнительная характеристика трибологических свойств материалов полимерных вкладышей различных производителей	
Д.Н. Сидорова, А.М. Спиридонов	59
Наноструктурирование поверхностного слоя роликовых ножей для повышения их стойкости к износу и коррозии	
М.А. Скотникова, С.А. Шашерина	60
Исследование трибологических свойств СВМПЭ покрытия на морозостойкой резине	
Е.В. Торская, И.В. Шкалей, Н.Н. Петрова, А.А. Дьяконов	61
Гидроабразивный износ в процессах прецизионной обработки поверхностей	
А.Л. Худoley	62
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	
Секция 4. Рециклинг полимерных материалов и экологические аспекты производства	63
Переработка отходов обувного производства	
А.Н. Буркин, Н.С. Ковальков	64
Влияние дополнительной обработки на эффективность очистки и физико-механические свойства композиционных фильтрующих материалов на основе полифениленсульфида	
В.Ю. Гарбарук	65
Перспективы переработки швейно-трикотажных изделий («секонд-хенд») в материалы строительного назначения	
И.М. Грошев, К.И. Тарутько, А.Н. Махонь, И.С. Карпушенко	66
Экологически безопасные композиционные материалы на основе полипропиленовой матрицы	
К.В. Ефимчик, Е.Ф. Кудина	67
Влияние конструкционных особенностей оправок на структуру и свойства пневмоэкструзионных изделий	
М.А. Коваленко, К.В. Овчинников, В.М. Шаповалов	68
Экологичные полимерные композиты на основе полилактида и компонентов из растительного сырья	
О.В. Конакова, Н.С. Винидиктова, В.М. Шаповалов, М.А. Коваленко	69
Технология и оборудование для ультразвуковой сварки фильтроэлементов гидравлических систем	
В.Ф. Луцко, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., А.А. Казьмин	70
Волокнистый серосодержащий полиамфолит на основе Нитрона-Д	
В.В. Матусевич, А.П. Поликарпов, В.Ж. Ворса, А.А. Шункевич, Г.В. Медяк, З.И. Акулич, О.И. Исакович	71
Сорбенты бора на основе привитых полипропиленовых волокон	
Г.В. Медяк, З.И. Акулич, А.А. Шункевич, А.П. Поликарпов, И.В. Воронюк	72
Использование отходов пенополиуретанов для получения гранулята	
А.Н. Радюк, П.Л. Лукатенок	73
Создание высокотехнологичных композиционных материалов на основе полимерных отходов и продуктов рециклинга шин для изготовления изделий строительного назначения	
В.Н. Усова, В.Н. Коваль, С.А. Герасименко	74
Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии и материалы в задачах устойчивого развития Республики Беларусь	
В.М. Шаповалов	75
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	76
Temperature-Sensitive Membranes Functionalized with Pegylated Poly(n-isopropylacrylamide)-Based Microgels for Protein Filtration	
А.А. Fedorenko, Т.У. Plisko, S.V. Kostjuk, K.S. Burts, and A.V. Bilydukevich	77

New Method of Production of Solid Lubricant Coatings with Dense Structure of WS₂ for the Space Industry	
V. Levchenko, J. Yu, P. Zhang, P. Ying, J. Wu, A. Grigoriev, D. Gutsev, N.K. Myshkin, and T. Yang	78
Thermal Stability and Properties of (Al, Cr,Ti, Si, Y)N Multielement Nitride Coatings After High-Temperature Treatment	
J. Wu, P. Zhang, and V. Levchenko	79
Tribological Properties of Multilayer MoN/TiN Composite Coatings Prepared by HIPIMS	
J. Xu, P. Zhang, J. Wu, and V. Levchenko	80
Study on the Tribological Properties of Dense and Hard TiB₂ Thin Films Prepared Using HIPIMS	
J. Yu, P. Zhang, J. Wu, and V. Levchenko	81
Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of Cu₄₀Zn-Ti₃AlC₂ Composites by Powder Metallurgy	
S. Zhou, F. Peng, T. Yang, L. Wu, J. Wu, P. Ying, P. Zhang, Ch. Lin, Y. Fu, Z. Tu, T. Wang, X. Zhang, N.K. Myshkin, and V. Levchenko	82
Улучшение механических свойств и абразивостойкости резин на основе натурального каучука и полиоксадиазольных волокон силаном и низкомолекулярными каучуками	
В.Н. Адериха, Н.А. Марусенко, В.Н. Коваль	83
Леофобный материал на основе продуктов лазерной переработки политетрафторэтилена	
Д.В. Брель, В.Ю. Шумская, А.З. Скороход	84
Свойства полиэфирэфиркетона и стеклонанополненных композитов на его основе, полученных методом холодного прессования с последующим свободным спеканием	
А.С. Брундуков, П.Н. Гракович, И.В. Коваль	85
Влияние наноразмерных наполнителей силикатного и углеродного типа на динамические механические характеристики эпоксидных компаундов	
С.Н. Бухаров, В.П. Сергиенко, В.К. Меринов, А.Р. Алексиев	86
Применение спектроскопических методов для оценки коллоидной стабильности масляных лиозолей наноразмерных частиц	
Е.Н. Волнянко, К.А. Вислоух, Е.В. Воробьева	87
Влияние пластичных смазочных материалов на бактериальные культуры <i>Azotobacter Chroococcum</i> и <i>Escherichia Coli</i> M-17	
Ф.А. Григорьев, Д.И. Мисюля, Ю.М. Юркова	88
Применение метода фокус-стекинга для получения супермакрофотографий поверхностей трения, волокнисто-пористых материалов и изломов композитов	
М.М. Гут, И.С. Шилько	89
Трибометр для исследования трения материалов по снегу	
Д.М. Гуцев, В.Г. Кудрицкий	90
Реологические и механические свойства полиамида 6, содержащего антипирирующие добавки	
А.А. Давыдов, С.П. Богданович	91
Опыт, тенденции и перспективы пневмоэкструзии полимерных композитов и смесей	
С.В. Зотов, В.А. Гольдаде, М.А. Коваленко, К.В. Овчинников, В.М. Шаповалов	92
Реализация научно-технологических основ получения пластичных смазок с гибридной дисперсной фазой	
А.В. Ивахник, В.И. Жорник	93
Антибактериальные покрытия Ti-Cu на поверхности уретральных катетеров	
А.Ф. Ильющенко, Р.П. Голодок, А.М. Тарайкович, В.В. Савич, М.А. Андреев, О.О. Кузнечик	94
Триботехнические свойства фрикционного материала на основе волокон различной природы для узлов трения, работающих со смазочным материалом	
А.Ф. Ильющенко, А.В. Лешок, А.Н. Роговой	95

Улучшение специализированного проктологического инструмента с использованием возможностей трехмерных технологий Ж.В. Кадолич, С.В. Зотов, А.А. Кашперов, Д.С. Чувашов, И.А. Галушкин	96
Полимерные нанокompозитные материалы, содержащие комплексы редких земель, для применения в оптоэлектронике и солнечной энергетике Д.Л. Коваленко, А.В. Семченко, В.В. Сидский, В.Е. Гайшун, В.В. Васькевич, А.А. Маевский, К.Д. Данильченко	97
Электрические свойства смесей полипропилен-полифениленсульфид М.А. Коваленко, С.В. Зотов, А.А. Павлов, В.А. Гольдаде, М.Э. Борисова	98
Влияние эпоксидированного соевого масла на механические и электрофизические свойства композитов на основе полисульфона, наполненного сажей И.Н. Ковалёва, В.В. Дубровский, Н.А. Марусенко	99
Особенности формирования структуры порошков механоактивированных композитов на основе полиэтилена высокого давления и карбида бора С.А. Ковалёва, И.С. Веремей, В.И. Жорник, И.И. Таран, М.А. Белоцерковский	100
Изучение кратера политетрафторэтилена посредством 3D-сканирования при различном времени обработки излучением CO₂-лазера Я.А. Ковалёва, П.Н. Гракович, А.В. Шаповалов	101
Моделирование эксплуатационных упругих характеристик полимерных композитов на основе связующих с высоким содержанием эпоксидных групп, армированных хаотически ориентированными стеклянными волокнами и дисперсными добавками политетрафторэтилена В.И. Колесников, В.В. Бардушкин, И.В. Лавров, А.П. Сычев, А.А. Сычев, В.Б. Яковлев	102
Влияние азотфосфорсодержащего антипирена на стойкость к термоокислительной деструкции и горению полиэтилена Ю.М. Кривогуз, А.А. Давыдов, В.В. Шевченко, О.А. Макаренко	103
Влияние лазерной закалки на триботехнические свойства стали 45 В.Г. Кудрицкий, Д.М. Гуцев, Е.Г. Акунец, А.В. Максименко, И.В. Царенко	104
Термостимулированная релаксация поверхностного потенциала в композитных пленках на основе полилактида С.М. Кулемина, Д.Э. Темнов	105
Микроструктура и свойства покрытий Al-Cr-B-N В.А. Лапицкая, Т.А. Кузнецова, Б. Вархолински, А.В. Хабарова, Т.В. Гамзелева, А. Гилевич, С.А. Чижик	106
Об оптимизации выбора базовых масел для разработки смазочных материалов методом нечеткого TOPSIS Л.Н. Марченко, В.В. Подгорная, У.А. Зиямухамедова, И.Н. Ковалёва	107
Получение ультрафильтрационных ПАН мембран с добавкой нерастворителей в формовочный раствор Е.А. Назаров, Т.А. Глевицкая, Е.С. Бурть, А.В. Бильдюкевич	108
Роль и оптимизация структуры трибослоя в формировании антифрикционных свойств суперконструкционных термопластов при линейном контакте С.В. Панин, Л.А. Корниенко, Д.Г. Буслович, В.О. Алексенко, Д.Ю. Степанов, С.А. Бочкарева, Чаньцзюнь Хе, Юань Шень, С.В. Шилько	108
Биоразлагаемые композиты на основе полилактида Е.Н. Подденежный, А.А. Бойко, Н.Е. Дробышевская, В.М. Шаповалов	110
Применение одностенных углеродных нанотрубок для получения антистатических и электропроводящих фторполимеров В.П. Селькин, О.С. Стерехов, М.В. Карсакова	111

Изменение вязкоупругих характеристик герметизирующих компаундов на основе эпоксидной смолы при гигротермическом старении В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, В.К. Меринов, А.С. Тулейко	112
Исследование влияния температурных факторов на акустические характеристики композитов, содержащих волокнистые компоненты природного происхождения В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, А.С. Тулейко, Н.С. Абед	113
Модификация композиционных мембран для нанофильтрации с использованием γ-циклодекстрина для извлечения солей лития из его смесей с солями магния А.А. Степанюк, Т.В. Плиско, Е.С. Бурть, А.В. Бильдюкевич	114
Направленное регулирование поверхностных свойств синтетических и углеродных волокон методом обработки в разрядной плазме в среде октафторциклобутана В.А. Стратанович, Л.Ф. Иванов, В.А. Шелестова, В.М. Макаренко, Д.В. Брель, В.А. Ломач	115
Влияние природы допанта на динамику лазерной абляции политетрафторэтилена Е.М. Толстомятов, Л.А. Калинин	116
Трение и износ модифицированных МДО покрытий на алюминиевых сплавах Е.В. Торская, А.А. Хади, П.О. Буковский, В.Н. Малышев	117
Влияние технологических факторов на динамические механические свойства полиамида 6, модифицированного алифатическим поликетонам в двухшнековом экструдере В.Н. Усова, Ю.М. Кривогуз	118
Определение коэффициента трения покрытий AlN и TiN методом наноскретч-теста А.В. Хабарова, В.А. Лапицкая, С.А. Чижик, А.Л. Николаев, Е.В. Садырин, С.С. Волков, С.М. Айзикович	119
Влияние гибридного наполнителя на основе талька и эпоксидированного соевого масла на теплофизические и релаксационные свойства L-полилактида В.В. Шевченко, Ю.М. Кривогуз, О.А. Макаренко	120
Прогнозирование механических характеристик синтактных пен на полимерной матрице С.В. Шилько, Д.А. Черноус, Цян Чжан, Кай Сунь	121
Влияние полипараксилиленового покрытия на поверхностные, физико-механические свойства волокнисто-пористых материалов В.Ю. Шумская, Д.В. Брель, Л.Ф. Иванов, В.А. Стратанович, Е.М. Толстомятов, Л.А. Калинин	122
ЗАОЧНЫЕ ДОКЛАДЫ	123
Study of the Antibacterial Properties of the Composition Material Based on Copolymer of Salicylic Acid Allyl Ether with Maleic Anhydride and ABS L.Sh. Abbasova and B.A. Mammadov	124
Interfacial Bonding Mechanism of Hazelnut Shell Filled Polypropylene Composites N.B. Arzumanova, I.A. Ismayilov, and R.N. Lalayeva	125
Investigation of PVC Degradation Mechanisms through TGA-DTA Techniques R. Hasanov, R. Mammadova, S. Amirov, and Z. Aliyeva Hasanova	126
Effect of Composition on Melt Flow Index of Polypropylene Random Copolymer / Compatibilizer / Aluminum Hydroxide / Clinoptilolite Based Composites F. Mustafayeva, N. Kakhramanov, and Z. Huseynova	127
Macrokinetics Study of Frontal Copolymerization of Acrylamide and N-isopropylacrylamide M.B. Shuliakouskaia, L.A. Sokal, and E.V. Gryniuk	128
Synthesis of Selenophenol and p-Aminophenylcyclopropyl Methacrylate V.A. Vahabova and K.G. Guliev	129
Получение и свойства соолигомеров 1-нафтиламина с 2-нафтолом Г.Н. Абасзаде, Р.А. Ахмедова, Д.Н. Алиева, Б.А. Мамедов, Ч.О. Исмаилова	130

Экологический фактор экономики устойчивого социально-экономического развития Беларуси О.В. Авдейчик, П.В. Ключко	131
Огнестойкая полиэтиленовая композиция на основе ангидридо-п-фенилимида 1,4,11,12-тетрахлортрицикло [6.2.1.0^{5,10}]-додец-11-ен-4,5,9,10-тетракарбоновой кислоты А.И. Алиханова	132
Процесс кристаллизации нанокомпозитов на основе полиэтилена высокой плотности и технического углерода Х.В. Аллахвердиева, Н.Т. Кахраманов, С.Р. Абдалова	133
Методология создания нанокомпозиционных материалов на основе промышленно выпускаемых полимерных матриц А.С. Антонов.....	134
Принципы реализации наносостояния в материаловедении полимерных нанокомпозитов А.С. Антонов, В.А. Струк, Н.Р. Прокопчук, В.И. Кравченко	135
Производство древесно-полимерных композитов с улучшенными параметрами огнестойкости А.Л. Антонова, В.Е. Сыцко, В.М. Шаповалов	136
Термостойкие композиционные материалы на основе кремнийорганических диоксиранов О.В. Аскеров, А.Ф. Мамедова, А.О. Алиева, Е.А. Азизов	137
Эпоксикомпозиция на основе смолы ЭД-20 и триглицерид-1,2,3-тригидроксиэтилимида сахарин-6-карбоновой кислоты Э.Т. Асланова, А.А. Гараева, В.О. Атакишиева	138
Закономерности синтеза и свойства бинарных соолигомеров изомерных аминифенолов с 1-нафтолом Р.А. Ахмедова, Д.Н. Алиева, Г.Н. Абасзаде, Ч.О. Исмаилова, Б.А. Мамедов	139
Локальные механические свойства поверхности ПЭТФ трековых мембран, модифицированных двухслойными покрытиями полиэтиленмин/поливинилкарбазол А.С. Баранова, Г.Б. Мельникова, Д.В. Сапсалёв, Т.Н. Толстая, С.А. Чижик, И.В. Корольков, Н.Н. Жуманазар, М.В. Здоровец	140
Влияние молекулярной характеристики аппрета на физико-механические свойства композита на основе наполненного полиэтилена С.А. Бекташи, М.А. Манафов, Н.А. Алимierzоева, Э.Г. Искендерова, С.Б. Мамедли, Н.Р. Бекташи, В.Д. Джафаров.....	141
Технологические решения снижения материалоемкости при производстве обуви В.Д. Борозна	142
Разработка полимерных композитов на основе политетрафторэтилена с углеродными волокнами и наночастицами диоксида циркония А.П. Васильев, Т.С. Стручкова, А.Г. Алексеев, А.А. Охлопкова.....	143
Влияние дисперсного селена на термоокислительную стойкость полиэтиленовых пленок Е.В. Воробьева, В.Е. Агабеков, Л.И. Южик	144
Влияние вакуумного отжига на механические свойства высоколегированных хромом углеродных покрытий Янг Гао, Сяохун Цзян, Д.Г. Пилипцов, А.В. Рогачев.....	145
Защитные твердые никелевые покрытия для деталей пожарной аварийно-спасательной техники Т.А. Говор, О.В. Рева.....	146
Металлосодержащие нанокомпозиты на основе изотактического полипропилена и бутадиен-нитрильного каучука Т.М. Гулиева, Н.И. Курбанова, М.Н. Байрамов, В.М. Сафарова	147
Постобработка полимерных пластин медицинского назначения, полученных 3D-печатью В. Гупта, Дж. Сингх, Д. Мудгал, М.Л. Хейфец, Н.Л. Грецкий, Д.Н. Хилько	148

Синтез непределных эпоксикетонов и изучение их влияния на свойства эпоксидных композиций	
Н.Х. Гусиев, С.Н. Аллахвердиева, Х.А. Мамедова, Г.И. Новрузова, Т.Г. Вердиева	149
Выбор полимерных материалов для уплотнительных узлов и оценка их совместимости со средой	
А.Х. Джанахмедов, М.Я. Джавадов	150
Полимерные композиты на основе природных минеральных пород и их эксплуатационные свойства	
В.Дж. Джафаров, Н.А. Алимierzоева, С.А. Бекташи, М.Дж. Раджабова, Н.Н. Каримова	151
Получение и исследование антибактериального полипропиленового композиционного материала	
В.М. Достуева, Б.А. Мамедов	152
Композиты на основе полианилина и полипиррола с наночастицами оксидов кобальта и железа	
Ж.В. Игнатович, Л.Н. Филиппович, С.Н. Лемешонок, А.А. Рогачев	153
Полимерный композиционный материал на основе полиэфирсульфона и углеродных волокон	
А.М. Казанин, И.Н. Фомичева	154
Улиточная оснастка для испытания филаментов на растяжение, изготавливаемая методом FDM-печати	
П.Э. Калиш	155
Влияние палыгорскита на свойства политетрафторэтилена	
Ю.В. Капитонова, П.Н. Тарасова, Н.Н. Лазарева, А.А. Охлопкова	156
Изучение физико-химических процессов в зоне трения полимерных материалов	
А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян	157
Термомеханические свойства композитных материалов на основе сополимера этилена с гексенем и волокнистым базальтом	
Н.Т. Кахраманов, О.М. Гулиева	158
Физико-механические свойства базальтопластиков на основе полипропилена	
Н.Т. Кахраманов, Г.Х. Нуралиева	159
1,3-диоксоланпроизводные N,N-диэтилдитиокарбаминовой кислоты – пластификаторы, термостабилизаторы поливинилхлоридной композиции	
А.Х. Керимов, А.Т. Оруджева, Х.А. Мамедова, И.А. Исмаилов	160
Полевая зависимость электрической долговечности полимерных диэлектриков	
В.В. Киселевич	161
Температурная зависимость пробивной напряжённости полимерных диэлектриков	
В.В. Киселевич	162
Композиционные материалы, для изготовления филаментов, используемых в технологии 3D-прототипирования	
П.В. Ключко	163
Применение электроискрового легирования для повышения износостойкости высоконагруженных узлов трения	
Д.А. Козлов	164
Механизмы износа и методы регулирования износостойкости нанокomпозиционных покрытий трибологического назначения	
В.И. Колесников, О.В. Кудряков, Д.С. Мантуров, В.Н. Варавка, И.В. Колесников, Е.С. Новиков	165
Исследование износостойкости покрытий TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN	
С.В. Константинов, Ф.Ф. Комаров, И.В. Чижов, В.А. Зайков	166
Физические основы теории изнашивания эластомеров	
В.Г. Копченков, А.А. Порохня	167

Оценка возможности применения 1-(2-(диметиламино)этил)-1H-тетразол-5-тиола в качестве стабилизатора золей серебра	
Е.П. Кот, М.Н. Ничик, Вит.Э. Матулис, С.В. Войтехович	168
Оценка ресурса битумных покрытий газопроводов низкого давления	
А.П. Крень, Т.А. Протасеня, М.Н. Делендик	169
Многофункциональный управляющий контроллер роботизированного оборудования для производства изделий из полимерных композитов	
М.А. Ксенофонтов, С.В. Выдумчик, О.О. Гавриленко, С.Л. Горохов, А.С. Калашников, Т.Г. Павлюкевич.....	170
Материаловедческая оценка эффективности состава поверхностно-активной смазочной среды при трении в условиях граничной смазки	
Л.И. Куксенова, В.И. Савенко	171
Влияние низкотемпературной выдержки в ходе синтеза на свойства полиэфиркетонкетона	
А.П. Куликов, О.П. Папета, А.Н. Салиев, В.Г. Миронов.....	172
Особенности температурных полей при лазерном электрохимическом осаждении	
А.Н. Купо, Н.Н. Федосенко, В.А. Емельянов	173
Методологические подходы к созданию функциональных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками на основе политетрафторэтилена	
А.Н. Лесун	174
Набухание композиционных материалов на основе гидрогелей и металл-органических координационных полимеров	
К.С. Ливонович, Э.С. Ливонович, Т.Г. Шутова.....	175
Получение триамидотрисульфоида сахарин-5-карбоновой кислоты	
Ф.М. Мамедалиева, Э.Т. Асланова, Б.А. Мамедов	176
Галогенсодержащие кремнийорганические термостойкие материалы	
А.Ф. Мамедова, О.В. Аскеров, Е.А. Ибадов, Г.Дж. Ханбабаева, Н.Т. Ширалиева	177
Состав и свойства полимерных композиционных материалов	
М.А. Манафов, С.М. Халилова, Г.Д. Исмаилова, С.А. Салахова, К.Г. Амирасланова	178
Получение композиционных материалов на основе модифицированных анилиноформальдегидных смол и изучение их свойств	
С.С. Машаева, Ф.М. Мамедова, С.А. Гаджиева, Т.Б. Мададова, Н.А. Мамедова	179
Оценка термодинамической активности продуктов износа высокотемпературного трения тормозных фрикционных материалов	
Н.Г. Меликсетян	180
Получение композитов на основе соолигомера п-бензохинона с 4-винилпиридином и эпоксидиановой смолы ЭД-20	
М.К. Мирмехтиева, Г.С. Ахмедова, Б.А. Мамедов, М.Р. Рагимова, М.М. Ибрагимова, С.М. Мамедова.....	181
Синтез и свойств малеинат-метакрилатных олигоэфиров полиоксихлорпропилена	
А.М. Мустафаев, Р.И. Исмаилова, У.К. Исмаилова, Ф.Х. Шахгелдиев, Б.А. Мамедов	182
Разработка и исследование свойств антибактериальных нанокompозитных материалов на основе ПЭВД и пара-ди-(2-этоксикарбонилциклопропил)бензола	
Х.Г. Назаралиев, Р.З. Шахназарли, Э.А. Рамазанов	183
Выбор абразивного материала и контрольной резины для исследования износостойкости подошв обуви	
М.А. Нейфельд, А.Н. Буркин, Ю.В. Дойлин	184

Триботехнические свойства смазочных композиций с мезогенными молекулярными комплексами	
В.В. Новиков, С.А. Сырбу	185
Исследование влияния ширины линии экструзии на физико-механические свойства изделий, изготовленных методом FGF печати	
П.Н. Осипов	186
Синтез полипиррола химическим осаждением из газовой фазы при атмосферном давлении и комнатной температуре	
Е.Г. Петрова, М.Д. Сушкевич, А.А. Рогачев	187
Методика исследования адгезии примерзания материалов и покрытий к влажному грунту	
С.Н. Попов, А.В. Андреева, М.Е. Саввинова	188
Устройство для исследования изнашивания материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии	
С.Н. Попов, Т.М. Соловьев	189
Физико-механические свойства изделий, полученных методом FDM-печати, при различных степенях заполнения внутреннего объема	
А.А. Потапов, И.С. Говоров, В.П. Красильников	190
Огнестойкие теплоотражающие композитные слои на текстильной основе	
О.В. Рева, Д.В. Криваль, А.В. Врублевский	191
Электронно-лучевое формирование гемостатических покрытий, их молекулярная структура и свойства	
А.В. Рогачев, Д.Л. Горбачев, А.А. Рогачев, М.А. Ярмоленко	192
Влияние термообработки на фазовый состав и механические свойства кремний-углеродных покрытий, легированных хромом	
А.С. Руденков	193
Морфология и молекулярная структура покрытий на основе поликарбоната	
А.С. Руденков, С.А. Фролов	194
Оценка долговечности полиэтиленовых газотрубопроводов подземного залегания	
А.Т. Рудковский, Н.Р. Прокопчук	195
Механические свойства тонкопленочных покрытий состава поливинилкарбазол – полиметилметакрилат	
Д.В. Сапсалёв, Г.Б. Мельникова, Т.Н. Толстая, С.А. Чижик	196
Структура и свойства а-С:Ті покрытий, осажденных из сепарированных потоков плазмы	
К.А. Саховский, Д.Г. Пилипцов	197
Применение метода размерностей для целей машинного обучения в трибологии	
Н.С. Скобелева, А.С. Парфенов, А.В. Волков, Е.В. Березина	198
Полимер-силикатные композиты на основе политетрафторэтилена и минералов подгруппы каолинита	
П.Н. Тарасова, Ю.В. Капитонова, Н.Н. Лазарева, А.А. Охлопкова	199
Получение гидрогелей на основе привитых сополимеров хитозана с акриламидом и малеиновой кислотой	
Е.К. Фомина, Е.В. Гринюк, И.А. Климовцова, Ю.О. Кокошко, Д.Л. Кудрявский	200
Получение термочувствительных гидрогелей на основе привитых сополимеров хитозана с N-изопропилакриламидом	
Е.К. Фомина, Е.В. Гринюк, И.А. Климовцова, Т.Ю. Лесько, Д.Л. Кудрявский	201
Влияние функционализированных алкинов и их производных на физико-механические свойства полиэтиленовых композиционных материалов	
М.И. Шатинова, В.Д. Джафаров, М.А. Манафов, Н.А. Алимурзоева	202

Влияние аминопроизводных модификаторов на свойства эпоксидной композиции ЭД-20 М.И. Шатинова, У.Ш. Джафарова, А.Р. Караева, Ш.Ф. Нагиева, Ш.К. Шейдаева	203
Влияние температуры и давления на реологические характеристики дисперсий пластичный смазочный материал – углеродная наноструктура М.А. Шилов, Н.В. Усольцева	204
Макрокинетические параметры непрерывной фронтальной полимеризации акриламида в растворах диметилформамида М.Б. Шуляковская, Е.С. Карасевич, Е.В. Гринюк	205
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	206

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2025)

24—27 июня 2025 г., Гомель, Беларусь

BIOMIMETICS AND TRIBOLOGY OF BIOLOGICAL SURFACES

Feodor M. Borodich^{1*}, Qian Cheng², Zhizhen Jiang¹,
Zaida Gao¹, Xiaoqing Jin¹, and Stanislav N. Gorb²¹College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing, China; * borodichfm@cqu.edu.cn²Department of Functional Morphology and Biomechanics, Zoological Institute, University of Kiel, Kiel, Germany

It is known that during evolution of the Nature, bi-systems developed various solutions to problems that have recently arisen in precision engineering practice [1, 2]. Living creatures have already developed fascinating systems for decreasing/increasing contact forces and for proper maintaining of friction, and for increasing of adhesion (e.g. attachment devices of insects and lizards [3], as shown in Fig. 1) and decreasing it (e.g. specific roughness of plants [4], as illustrated in Fig. 2). Solutions that were found by the Nature for living micromechanical systems, can give new ideas for design of engineering systems. Hence, the employment of biomimetic solutions may be a key factor for successful component performance, particularly in tribological applications.

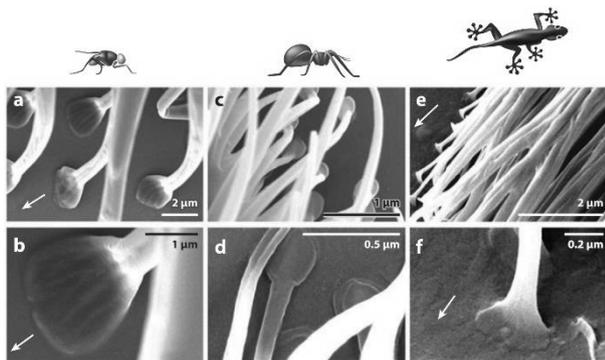


Fig. 1. Scanning electron micrographs of terminal contact elements, as found in the hairy attachment pads of the (a, b) fly (*Calliphora vicina*), (c, d) spider (*Cupiennius salei*), and (e, f) tokay gecko (*Gekko gekko*). Arrows point in the distal direction

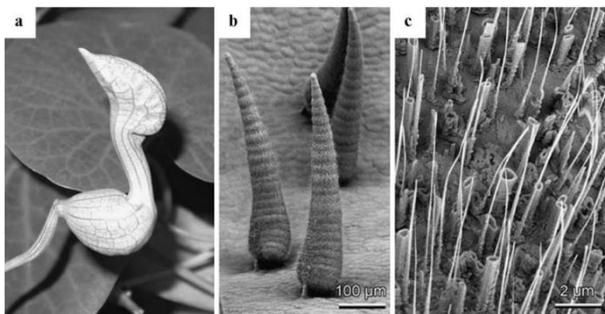


Fig. 2. (a) White-veined dutchman's pipe (*Aristolochia fimbriata*) flower. (b) SEM micrographs of trichomes on the inner surface of the flower trap. (c) Wax crystals covering the trichome surface

The rapid advancement in the design and application of biomimetic artificial adhesives has been promoted by the increasing understanding of the mechanisms of

multiscale hierarchical adhesion systems and continual improvement of theoretical modelling over the past few decades. The modelling of biomimetic artificial adhesives has been developed from simple structures to complex constructions having multilevel hierarchical properties [1, 5]. Adhesion and friction models considering multiscale hierarchical structural forms are discussed, with a focus on multiscale hierarchical models based on development of the Cantor-Borodich profiles [6, 7] (Fig. 3).

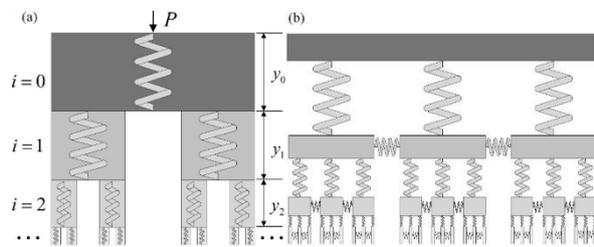


Fig. 3. Two kinds of hierarchical spring models as modifications of Cantor-Borodich profiles: (a) Plesha and Ni hierarchical spring model; (b) Schmittbuhl hierarchical model

Acknowledgements. The research was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. HWG2022001).

References

- Borodich F.M. and Savencu O. Hierarchical models of engineering rough surfaces and bioinspired adhesives // in *Bioinspired Structured Adhesives: Biological Prototypes, Fabrication, Tribological Properties, Contact Mechanics, and Novel Concepts*. — New York: Springer. — 2017, 179—219
- Cheng Q., Borodich F.M., Gao Z., Gorb S.N., and Jin X. Advances in the contact mechanics theory and applications of biomimetic artificial adhesives inspired by biological multi-scale hierarchical structures // *Friction*. — vol. 13, p. 9441016-2
- Heepe L. and Gorb S.N., Biologically inspired mushroom-shaped adhesive microstructures // *Annu. Rev. Mater. Res.* — vol. 44, 173—203
- Borodich F.M., Gao Z., Gorb E.V., Gorb S.N., and Jin X. Wax protrusions on anti-adhesive plant surfaces and their interactions with insect adhesive pads: A mechanical interpretation // *Biomimetics*. — 2024 (9), p. 442
- Cheng Q., Jiang Z., Borodich F.M., Gorb S.N., and Jin X. Interaction of a non-axisymmetric artificial single spatula with rough surfaces // *Interface Focus*. — 2024 (14), p. 20230081.
- Borodich F.M. and Onishchenko D.A. Fractal roughness for problem of contact and friction (the simplest models) // *J. Friction Wear*. — 1993 (14), 452—459
- Borodich F.M. and Onishchenko D.A. Similarity and fractality in the modelling of roughness by a multilevel profile with hierarchical structure // *Int. J. Solids Struct.* — 1999 (36), 2585—2612

METAL-POLYMER RESEARCH INSTITUTE: RESEARCH AND INNOVATION POTENTIAL

A.Ya. Grigoriev

V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of NASB, Gomel, Belarus; <aygri@tut.by>

The V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus (MPRI NAS Belarus) is a unique research center specializing in the study of polymer material technology, the physics and mechanics of friction, wear, and lubrication [1]. Founded in 1969 by Academician V.A. Belyi [2], the institute has developed a wide range of directions covering fundamental and applied research, the development of innovative technologies, international cooperation, and the training of scientific personnel.

Scientific Directions and Institute Structure. The institute's research activities are organized into five specialized scientific departments, covering virtually all scientific and practical aspects of materials science, mechanics, and polymer tribology. A crucial part of the institute is the Laboratory-Technological Department with an experimental production unit, ensuring the implementation of developments in industry. As of today, the institute employs about 110 staff members, 70 of whom are directly engaged in scientific research, including 5 doctors of science (one academician and one corresponding member) and 20 candidates of science.

The institute houses laboratories equipped with modern facilities for material structure analysis, mechanical testing, and the study of friction and wear mechanisms. A system of support for young scientists is actively developing, fostering scientific creativity, and providing doctoral students and postgraduates with access to international grant programs. This allows the institute to cultivate a new generation of specialists capable of addressing the current challenges of science and industry.

Major Research Areas. The institute's scientific activities span a wide spectrum of studies, including the development of new methods for analyzing tribological processes, modeling mechanical interactions of materials, and creating environmentally friendly polymer formulations with improved operational characteristics. In recent years, special attention has been given to research in nanomaterials and intelligent coatings, which are applied in aerospace technology, medical equipment, and mechanisms operating under extreme conditions.

One of the key research areas of the institute involves the development of new composite polymer materials, their production, and processing. Another direction focuses on studying the mechanisms of solid-state interaction, friction, wear, and lubrication processes, enabling the creation of effective tribological solutions for

mechanical engineering, energy, medicine, and other industries.

Over the years, the institute's researchers have developed and introduced numerous scientific solutions, documented in more than 140 monographs, 200 doctoral and candidate dissertations, as well as over 2,500 patents and authorship certificates.

Contribution to Industry. The institute actively collaborates with various industrial enterprises in mechanical engineering, architecture and construction, transport, energy, and housing and communal services. This cooperation facilitates the implementation of new materials and technologies, increasing the competitiveness of Belarusian products in the global market.

International Cooperation. IMMS NAS Belarus plays a significant role in international scientific projects. Partnerships have been established with leading research centers in Europe and Asia. In collaboration with the Rocket and Space Corporation "Energia," the institute has developed equipment for studying friction processes in outer space. Joint projects with China have resulted in the creation of modern polymer composites, including ultra-impact-resistant materials.

Scientific Personnel Training and Publications. The institute actively participates in the training of high-level specialists, offering postgraduate and doctoral programs along with dissertation defense opportunities. Two international scientific journals are published: "*Friction and Wear*" (indexed in Scopus and WoS) and "*Polymer Materials and Technologies*". The institute also hosts major scientific events, including the International Scientific and Technical Conference "*Policomtrib*" and the Chinese-Belarusian seminar "*Silk Road Tribology*".

Currently, the Metal-Polymer Research Institute is a modern research center promoting the development of advanced technologies, the training of specialists, and international cooperation in materials science and tribology. Its activities contribute to strengthening Belarus's scientific and technical potential and implementing innovative solutions in industry.

1. V.A. Bely Metal-Polymer Research Institute: 50 Years of Development / Compiled by A.Ya. Grigoriev, N.K. Myshkin, V.V. Konchits. — Minsk: Belarusian Science. — 2020
2. Academician V.A. Bely: Scientist. Teacher. Organizer. On the Occasion of the 100th Anniversary of His Birth / Compiled by A.Ya. Grigoriev, N.K. Myshkin, V.V. Konchits; Editorial Board: A.Ya. Grigoriev [et al.]. — Minsk: Belarusian Science. — 2022

DEVELOPMENT OF ADVANCED TECHNOLOGY AND SUSTAINABLE TRIBOLOGY IN CHINA

V. Levchenko^{1,2,3,4}

¹School of Materials Science and Engineering, Taizhou University, Taizhou, China

²International Joint Institute of Advanced Coating Technology, Taizhou University, Taizhou, P. R. China

³Wenling Research Institute of Taizhou University, Taizhou, P. R. China

⁴Zhejiang Provincial Key Laboratory for Cutting Tools, Taizhou University, Taizhou, P. R. China;
vladlev@yahoo.com/vladlev@tzc.edu.cn

Purpose. This study demonstrates that advanced technologies and sustainable tribology are thriving in China, emerging as a crucial field in global tribological research.

Introduction. Tribology- the science of friction, wear, and lubrication-plays a crucial role in industrial efficiency, energy conservation, and environmental sustainability. China has made significant progress in advanced tribology research and sustainable lubrication technologies, aligning with its national goals of technological innovation, carbon neutrality, and green manufacturing [1].

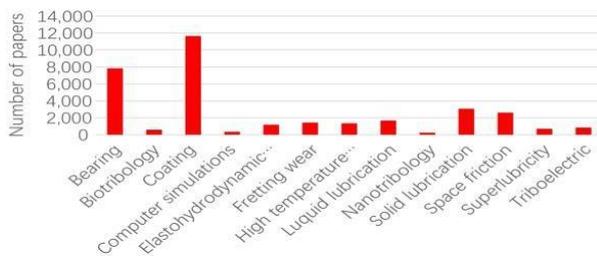


Fig. 1. Number of papers for different keywords except for tribology, friction, wear, and lubrication words

Government Support and Initiatives. The Chinese government has been actively supporting the development of advanced technologies and sustainable tribology through various initiatives. These include: •*Investment in Research and Development (R&D)*: the government has allocated significant funds for R&D in tribology, particularly in universities and research institutes. This has led to the establishment of specialized research centers and laboratories focused on tribological studies.

•*Collaboration with International Institutions*: China has collaborated with international organizations and institutions, such as the International Organization for Standardization (ISO) and the Tribology Society of China (TSC), to promote the exchange of knowledge and best practices in tribology.

•*Policy Framework*: the government has implemented policies and regulations to encourage the adoption of sustainable tribological solutions in various industries. This includes the promotion of eco-friendly lubricants and the development of standards for sustainable manufacturing processes.

Key Areas of Development. Several key areas of development have emerged in advanced technologies and sustainable tribology in China:

1. *Nano-tribology*: researchers in China are exploring the use of nanomaterials and nanotechnology in

tribological applications. This includes the development of nanocoatings and nanostructures that can reduce friction and wear, improve lubrication, and enhance the performance of mechanical systems.

2. *Smart Lubricants*: there is a growing interest in the development of smart lubricants that can adapt to different operating conditions and provide optimal performance. These lubricants can incorporate sensors and intelligent algorithms to monitor and adjust their properties in real-time.

3. *Sustainable Lubricants*: with a focus on environmental sustainability, Chinese researchers are developing eco-friendly lubricants that minimize the impact on the environment. This includes the use of renewable resources and the reduction of volatile organic compounds (VOCs) in lubricant formulations.

4. *Wear-resistant Coatings & Materials*: the development of wear-resistant coatings and materials is a crucial aspect of sustainable tribology. Chinese scientists are working on the creation of advanced coatings and materials that can withstand high loads and harsh conditions, reducing the need for frequent replacements and minimizing waste.

5. *Digital Twin Technologies*: the application of digital twin technologies in tribology allows for the simulation and optimization of tribological systems. This enables engineers to predict and mitigate friction and wear issues before they occur, leading to more efficient and sustainable designs.

6. *Artificial intelligence*: AI can help optimize the processing of materials used in tribological systems to achieve the desired properties and characteristics [2].

Conclusion. The development of advanced technologies and sustainable tribology in China is a testament to the country's commitment to innovation and environmental sustainability. With continued government support, collaboration with international institutions, and investment in R&D, China is well-positioned to lead in the field of tribology and contribute to the global transition towards a more sustainable future.

Acknowledgements. The research was financially supported by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LQ22E010007 and No. LTZ20E020001), Wenling Key Research and Development Project (No. 2023G00007).

- Zhou ZR. Tribology in China. *Friction* 2025, 13(1): 9440994
- Ying P., Lin Ch., Zhang P., Wu J., Yang T., Kovalev A., Mishkin N., and Levchenko V. Effect of Artificial Intelligence on Obtaining Coatings and Materials with Specified Properties // In: Book of abstract IEEE 14th International Conference "Nano-materials: Applications & Properties" Riga, Latvia. — 2024, 43

“GREEN” TRIBOLOGY AND POLYMER COMPOSITES

N.K. Myshkin

¹V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of NASB, Gomel, Belarus; nkmyshkin@mail.ru

Background. The definition “tribology” was given in 1966 by Professor Peter Jost as “the science and technology of interacting surfaces in relative motion...” [1]. It has ancient roots started from using friction for making fire, cloth and shoes. The ancient engineers invented sledges, ski, wheels, and hoisting mechanisms.

Sustainable Development Goals of UN include topic of industry and innovation (Goal 9) where tribology plays very important role. The efficient way to decrease losses in energy and materials is to replace the heavy parts of machinery with more light parts made of polymers. It makes friction and wear lower due to self-lubricity and less corrosion of parts [2—4].

Until the last century, vegetable oils and animal fat were most common lubricants. Petroleum refinery and development of additives in the last century has made the mineral oils dominant in industry. Approval of the international directives and road maps in “green technology” has initiated the promotion of vegetable oils. Nowadays many brands of lubricating oils and working fluids are produced on the base of vegetable raw materials [2].

Results and Discussion. Growing production and availability of polymer-based materials replace the metals and alloys in many areas of life due to multi-functionality of polymers and easy changing their composition and properties [4]. The main reason for importance of polymers in tribology is the low mass density of polymers meaning the decrease in friction and energy losses of machines due to decrease of their mass. The other reasons are low friction and self-lubrication capacity of polymer-based materials, as well as their resistance to oxidation and corrosion.

The composites with polymer matrix have a versatility of properties due to various fillers, additives, and reinforcing components. Polymer films and coatings were applied efficiently for prevention of sticking and severe wear of components in micromechanical systems and memory storage devices. By introduction of dispersed fillers, it is possible to vary their physical-mechanical properties, as well as reduce or increase the friction coefficient.

Great interest is attracted nowadays to polymer nanocomposites. Polymer composites with nanofillers are taking over the areas traditionally occupied by other polymer-based materials. The preparation of polymer composites by nanofiller dispersion in molten thermoplastics is one of the advanced and fast-developing methods. Polymer-clay nano-composites are prospective due

to availability of their mass-production [3]. There are some interesting data on the synergic effect of combination of macro- and micro-scale fillers on polymer composite tribological performance [5]. This effect should be investigated carefully in future research.

Modern “green” tribology has initiated the use of biodegradable lubricants based on plant oils instead of the mineral ones. They are used, first, in forestry, agriculture, protected natural areas with future expansion to transportation, industry, and other segments of human activities. The development of lubricating oils based on plant raw materials has open the possibility to create the ecologically friendly greases. They have become the prospective objects of research due to synergetic effects of oil, soap carcass, and fillers, e.g. nano-additives.

Conclusions. Tribology has passed the half-century way from separated research directions to multidisciplinary scientific and engineering area of knowledge combining mechanical engineering, material science, and surface engineering. It has done the remarkable results in materials, coatings, lubricants, and design of tribosystems. It can save great economy losses due to reduction in energy, materials, as well as decrease in harmful effect to ecology.

Henceforth in future, we need to use more intensively the efficient and light composite materials based on polymers, lubricants based on plant components; surface engineering, and design, saving energy losses at lower negative effects for ecology.

Acknowledgements. The authors thank the State Belarus Program of Research GPNI GPNI 8. “Materials science, new materials and technologies”, subprogram 8.4; Belarus-PRC BRFFI project T20KITG-004 and Belarus-Vietnam BRFFI project T22BA-003 for support in funding the current research.

1. Jost P. Brief notes // International Conference “50th Anniversary of the Jost Report”. — London: IMechE. — 2016, 1—2
2. Myshkin N.K. and Grigoriev F.A. Green tribology for sustainable development goals // Proceedings of I4SDG Workshop2021. — 2021, 421—437. — Springer, 021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87383-7_37
3. Myshkin N.K., Pesetskii S.S., and Grigoriev A.Ya. Polymer tribology: Current State and Applications // Tribology in Industry. — 2015 (37), no. 2, 284—290
4. Friedrich, K., Breuer, U. (eds.) Multifunctionality of Polymer Composites. — Elsevier. — 2015
5. Myshkin N.K., Zhang G. et al, Performance of PEEK-Based Nanocomposites at Dry Friction Against Steel // Journal of Friction and Wear. — 2021 (42), no. 3, 225. <https://doi.org/10.3103/S1068366621030120>

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АРКТИКИ

А.А. Охлопкова

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия; okhlopkova@yandex.ru

Освоение Арктики является приоритетной задачей на ближайшее будущее, что предопределяет повышенный интерес к материалам, обеспечивающим надёжность технических средств при эксплуатации в регионах холодного климата. Научным направлением СВФУ является разработка новых материалов для техники, технологии в промышленности, энергетике, строительстве и на транспорте в условиях Севера. В рамках направления сформулированы и обоснованы физико-химические принципы создания полимерных композитов, разработаны триботехнические материалы для узлов трения техники, эксплуатируемой в экстремальных условиях, в том числе при низких температурах, установлены закономерности поведения материалов в условиях холодного климата, созданы морозостойкие (до -60 С) композиционные материалы на основе смесей термопластов и новых видов каучуков, в том числе, разной полярности и непердельности, обеспечивающих комплексное повышение низкотемпературных, агрессивностойких характеристик и износостойкости. Это внесло вклад в решение важной научно-технической проблемы, связанной с повышением надёжности техники и ее безопасности, эксплуатируемой в условиях холодного климата. Инновационные разработки внедрены практически во все добывающие компании и хозяйствующие структуры Республики Саха (Якутия): ОАО АК «АЛРОСА», АК «Алмазы Анабара», АК «Саха-Даймонд», Якутская ГРЭС, ОАО «ДСК», АО «Водоканал», АО «Сахатранснефтегаз», ПАО «Якутэнерго», ООО «УК Колмар», АО ХК «Якутголь». Это позволило увеличить ресурс работы техники на 40-50% и решить проблему импортозамещения.

Другим перспективным направлением является разработка материалов биомедицинского назначения. В связи с этим разрабатываются полимерные композиционные материалы (ПКМ) медицинского назначения: дермальные эквиваленты и имплантаты.

Целью работы является изучение механизмов формирования, функционирования и адаптации полимерных композитов к воздействию внешних факторов.

Материалы и методы исследования

В качестве полимерных матриц использовали морозостойкие термопласты: ПТФЭ, СВМПЭ, а

также ПЛА марки Nature Works 4043D (США), БНКС-18, изопреновый каучук СКИ-3, бутадиен-стирольный каучук СКС-30. В качестве наполнителей - наноразмерные оксиды, нитриды, карбиды, силициды, оксинитриды, шпинели металлов, природные слоистые и каркасные силикаты, гибридные модификаторы (волокнистые+дисперсные), антиоксиданты (ацетаты токоферола и усниновая кислота).

Результаты и их обсуждение. Разработана гамма триботехнических ПКМ, характеризующихся улучшенным комплексом свойств: повышенные износостойкость в 1000–1500 раз, эластичность – на 20–30 %, снижение коэффициента трения в 1.5–2 раза.

Разработаны технологии совмещения компонентов ПКМ, включающие механическую активацию, УЗ, СВЧ воздействие, введение ПАВ, компатибилизаторов, прекурсоров.

Разработаны новые эластомерные материалы повышенной морозостойкости на основе смесей каучуков разной химической природы: бутадиен-нитрильного каучука, полидиена и 1,4-цис-полиизопрена. Для выяснения возможности применения данных материалов в реальных климатических условиях Крайнего Севера образцы резин были выставлены на натурную экспозицию в условиях атмосферного старения в п. Тикси (побережье Северного Ледовитого океана).

Из биорезорбируемых материалов синтетического происхождения в качестве подложки для эквивалентов кожи использовали полилактид (ПЛА), характеризующийся биоразлагаемостью, биосовместимостью, экологичностью. Исследования композитов методом *in vivo* свидетельствуют, что разработанные материалы после имплантации на лабораторных крысах линии “Wistar” не претерпевают изменений, что доказывает отсутствие протекания химических реакций.

Разработанные материалы предназначены в качестве импортозамещающих материалов в области машиностроения, химической, нефтехимической и медицинской промышленности.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-13-20061 (в части ПТФЭ композитов) и МНиВО РФ НИР № FSRG–2023–0026 (в части других полимерных матриц).

ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ДИЗАЙН КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СУПЕРКОНСТРУКЦИОННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

С.В. Панин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия; svp@ispms.ru

Проблема создания материалов с заранее заданными свойствами всегда являлась актуальной задачей. Полимерные композиционные материалы по определению являются материалами, для которых характерна сложная многоуровневая структура. Так, армирующие включения, независимо от их геометрии (волоконистые или дисперсные наполнители различной формы и размеров) и расположения, определяют верхний масштаб гетерогенности. На меньших пространственных масштабах проводится учёт межфазных слоёв на контакте матрицы и включений. Неоднородность полимерной матрицы определяется её кристаллическим/аморфным строением. Учёт данных особенностей строения материалов на разных масштабах привёл к введению понятия о многоуровневости структуры, и, соответственно, деформационного поведения [1].

При анализе физико-механических свойств композитов возникает два класса задач. Задачи моделирования, когда заданы свойства и геометрия расположения фаз, характер их взаимодействия (т.н. управляющие параметры); определению подлежат эффективные свойства [2, 3]. В последнее время для расчёта эффективных свойств интенсивно используются численные методы. Они основаны на вариационных принципах с последующим осреднением свойств по репрезентативному объёму различными способами. Задачи конструирования в известном смысле обратны по отношению к задачам моделирования – эффективные свойства заданы, определить нужно набор управляющих параметров, придающих эти свойства материалу [4]. Задание свойств может быть проведено как в виде односторонних или двусторонних ограничений [5].

В докладе рассмотрены аспекты экспериментально-теоретических основ разработки полимерных композиционных материалов (ПКМ) с улучшенными/новыми свойствами, а также подходы и результаты их компьютерного дизайна (проектирования). С использованием развитого подхода проведено экспериментально-теоретическое исследование ПКМ на основе суперконструкционных термопластов (СКТП). Решались задачи численного моделирования и анализа деформационного поведения с явным и неявным учётом структуры следующих типов композитов: а) волоконно-армированные антифрикционные; б) слоистые (ламинаты); в) дисперсно-наполненные с повышенным сопротивлением усталости; г) сегментированные, получаемые методом 3D-печати; д) неразъёмные соединения, формируемые

методом УЗ-сварки [6, 7]. Рассмотрены примеры практического использования результатов исследований в части компьютерного дизайна и контроля состояния ПКМ [8].

Предложен, иллюстрируется и обсуждается Иерархический подход к разработке композитов на основе суперконструкционных термопластов (СКТП) [9].

Благодарности. Исследование поддержано проектом FWRW-2021-0010.

1. Panin Sergey V., Lyukshin Boris A., Grishaeva Nataliya Y., Bochkareva Svetlana A., Panov Iliya L. Computer-Aided Design of Polymer-based Composites Using Multiscale Models // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. — 2024 (17), no. 1, 65—74
2. Люкшин П.А., Люкшин Б.А., Панин С.В., Бочкарева С.А. Вычисление параметров напряженно-деформированного состояния полимерного композита в поле постоянного электрического тока. Известия Российской академии наук // Механика твердого тела. — 2023, № 1, 142—155. DOI: 10.31857/S0572329922600232
3. Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю., Панин С.В., Реутов Ю. А. Единый подход к определению эффективных физико-механических характеристик наполненных полимерных композиций на основе вариационных принципов // Механика композитных материалов. — 2018 (54), № 6, 1—18
4. Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин Б.А., Панов И.Л., Панин С.В. Получение композиций с заданным набором физико-механических свойств с использованием трех управляющих параметров // Физическая мезомеханика. — 2020 (23), № 4, 43—50. DOI 10.24411/1683-805X-2020-14006
5. Панин С.В., Люкшин Б.А., Бочкарева С.А. Проблемы, практика и перспективы компьютерного конструирования новых композиционных материалов // ПМТФ. — 2020 (61), № 5, 168—174. DOI: 10.15372/PMTF20200518
6. Панин С.В., Ло Цзянкунь, Буслович Д.Г., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Бочкарева С.А. Разработка оптимального состава трехкомпонентных высокопрочных износостойких композитов на основе полиимида // ПМТФ. — 2021, № 6, 162—171
7. Бочкарева С.А., Алексенко В.О., Люкшин Б.А., Буслович Д.Г., Панин С.В. Влияние теплопроводности сопрягаемых материалов на интенсивность изнашивания полимер-полимерной пары трения // Механика композитных материалов. — 2022 (58), № 3, 1—18. DOI: 10.22364/mkm.58.3.0x
8. Бочкарева С.А., Гришаева Н.Ю., Буслович Д.Г., Корниенко Л.А., Люкшин Б.А., Панин С.В., Панов И.Л., Донцов Ю.В. Разработка износостойкого экструдированного композиционного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с заранее заданными свойствами // Механика композитных материалов. — 2020 (56), № 1, 1—16
9. Panin Sergey V., Lyukshin Boris A., Bochkareva Svetlana A., Kornienko Lyudmila A., Nguyen Duc Anh, Le Thi My Hiep, Panov Iliya L., and Grishaeva Nataliya Yu. Material Design Methodology for Optimized Wear-Resistant Thermoplastic-Matrix Composites Based on Polyetheretherketone and Polyphenylene Sulfide // Materials. — 2020, no. 13, 524

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 1

Физико-химические основы получения и переработки полимеров

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2025)
24—27 июня 2025 г., Гомель, Беларусь

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ ОКСИДА МАГНИЯ И КАРБИДА БОРА

О.А. Беляк¹, А.М. Ананко², А.Д. Захаров³, К.А. Лещев³

¹Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия; belyak.o.a@gmail.com

²Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

³ООО «Фианум Лаб», Москва, Россия

Широкое распространение для узлов и деталей триботехнического назначения получили самосмазывающиеся композиционные материалы. При этом базовая матрица композиционного материала модифицируется гибридным наполнителем [1], содержащим армирующие матрицу частицы и смазочные материалы, например, инкапсулированное масло, порошок политетрафторэтилена [2]. Эксплуатационный ресурс таких композиционных материалов существенным образом зависит от оптимального сочетания армирующих и смазывающих компонент, а также учёта реологии матрицы. **Цель** настоящего исследования – изучение реологических свойств модифицированного композита в зависимости от состава и концентрации гибридного наполнителя, влияние наполнителя на трибологические характеристики такого материала.

Материалы

В настоящей работе исследуются модифицированные композиционные материалы, в качестве матрицы композита использовалась эпоксидная диановая смола ЭД-20, продукт реакции бисфенола А и эпихлоргидрина. Для отверждения смолы был использован технический полиэтиленполиамин (ПЭПА). Экспериментальные образцы, полученные с использованием отвердителя ПЭПА обладали наибольшей твёрдостью и модулем упругости. В составе гибридного наполнителя – частицы V_4C_3 , SiC, MgO, шпинель (Fe), размолотыми при помощи планетарной мельницы до размеров 20–60 мкм, порошок ПТФЭ. Образцы эпоксидно-диановых композитов были изготовлены с различным массовым содержанием наполнителя (до 12 %).

Экспериментальные исследования и их результаты

Свойства вязкоупругих материалов являются достаточно сложными, характеризуются несколькими релаксационными механизмами. Однако, в подавляющем большинстве, один из них является преобладающим. В настоящей работе была рассмотрена модель стандартного вязкоупругого тела. Идентификация всех параметров, входящих в рассматриваемую модель вязкоупругого материала, была осуществлена на основе проведенных лабораторных экспериментов.

Методом микроиндентирования проведены исследования вязкоупругих свойств композитов при

постоянной температуре 297 ± 2 К сферическим индентором радиуса $R = 100$ мкм. Анализировались диаграммы « $P-h$ » при различных значениях времени выдержки при постоянной нагрузке. Основываясь на решении вязкоупругого аналога упругой задачи Герца для сферического контакта, в котором вязкоупругие операторы заменяют упругие постоянные в соотношении между нормальным контактным давлением и поверхностным смещением, были определены три искомого параметра модели стандартного вязкоупругого тела.

Проведенные исследования показали, что все композиты, представленные в данной работе, имеют равномерное распределение частиц модификатора в матрице эпоксидной смолы, при этом MgO повышает твёрдость материала, V_4C_3 при низкой массовой доле (менее 3 %) снижает твёрдость. Вязкоупругие свойства материалов зависят от микроструктуры модифицирующих частиц, так частицы V_4C_3 карбида бора (1 мас. %, 3 мас. %) увеличивают вязкостные свойства материала за счёт создания «свободных» межфазных областей, в отличие от MgO, который связывает межфазные области благодаря своей разветвлённой структуре. Увеличение массовой доли карбида бора уменьшало свободные объёмы межфазных областей, уменьшая при этом параметр вязкости материала.

Проведенные трибологические испытания, при которых оценивалась износостойкость, позволили установить, что наличие MgO в составе гибридного наполнителя в концентрации 1 мас. % оптимально, при больших концентрациях армирующего компонента возрастает дисперсия механических свойств и увеличивается интенсивность изнашивания, гибридный наполнитель, содержащий ПТФЭ (6 мас. %) и шпинель (6 мас. %) при модификации базовой матрицы позволил получить композиты с высокими прочностными и трибологическими свойствами.

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № гр. 125011200153-3.

1. Мышкин Н. К. Об эффекте масштабного синергизма дисперсного наполнения в улучшении триботехнических характеристик полимерных композитов // Полимерные материалы и технологии. — 2023 (9), № 2, 5
2. Belyak O., Suvorova T. Predicting the mechanical properties of antifriction composite materials // Mech. Comp. Mater. — 2021 (57), № 5, 647–656

ПОЛИМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ СВМПЭ, МОДИФИЦИРОВАННОГО НЕОРГАНИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ И БРОМИРОВАННЫМ СВМПЭ

Р.В. Борисова, С.Н. Данилова, Т.А. Охлопкова, Н.Н. Лазарева, А.А. Охлопкова

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия; brv0901@yandex.ru

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) – один из перспективных конструкционных и функциональных полимеров благодаря высокой коррозионной стойкости и износостойкости представляет огромный интерес для исследователей [1]. Перспективными считаются композиты на основе СВМПЭ, модифицированного наноразмерными наполнителями [2]. Однако актуальной остается проблема совмещения СВМПЭ с наполнителями из-за недостаточно эффективного взаимодействия между неполярной полимерной матрицей и полярным наполнителем, что является ключевым фактором, определяющим физико-механические свойства композита в целом [3].

Целью работы является создание полимерных нанокompозитов (ПНК) на основе СВМПЭ, гибридного модификатора, состоящего из бромированного СВМПЭ и наночастиц неорганической природы, с повышенными физико-механическими и трибологическими характеристиками и установление влияния технологических, рецептурных факторов на свойства композитов и межфазные взаимодействия наполнителя и полимера

Материалы и методы. Для изучения состава и структуры разработанных ПНК использованы физико-химические методы, характеризующие структуру (рентгенофазовый анализ, растровая электронная микроскопия, Фурье ИК-спектроскопия, ДСК, АСМ). Выбраны стандартизованные методы определения физико-механических и триботехнических характеристик полимерных нанокompозитов, а также РФЭС, вибровискозиметр для исследования изменений в СВМПЭ при бромировании.

Результаты и их обсуждение. Объектами исследований являлись двухкомпонентные «СВМПЭ + НЧ» и трехкомпонентные «СВМПЭ + бромированный СВМПЭ (БСВМПЭ) + НЧ» ПНК. В качестве полимерной матрицы выбран СВМПЭ марки GUR 4022. В качестве наноразмерных наполнителей были изучены наночастицы: нитриды алюминия и кремния (AlN, Si₃N₄), карбиды кремния и бора (SiC, B₄C) благодаря их твёрдости, химической инертности к агрессивным средам, высокой термостойкости. Для обеспечения более высокого уровня межфазного взаимодействия между полимером и нанонаполнителем и получения ПНК с улучшенными эксплуатационными свойствами в настоящей работе разработан

способ химической модификации поверхности порошка СВМПЭ (патент РФ № 2633523), заключающийся в проведении реакции бромирования под воздействием УФ-облучения в жидкой среде (CCl₄). Полученный Б-СВМПЭ, использовали в составе концентрата с НЧ для создания ПНК на основе СВМПЭ. Образцы для исследований, в виде концентрата и его смешивания с полимерной матрицей, получали согласно разработанному способу получения композиционных материалов на основе СВМПЭ и нанокерамики (Патент РФ № 2586979). Основные этапы включали: смешение компонентов в УЗ-ванне (Laborette-17 фирмы Fritsch), частота УЗ колебаний 35 кГц, время обработки – 1,5 ч, дисперсионная среда – этиловый спирт. Установлено, что введение гибридного модификатора «Б-СВМПЭ и НЧ» способствует значительному повышению механических характеристик ПНК по сравнению как с композитами, полученными без применения Б-СВМПЭ, так и с исходным СВМПЭ, что может быть обусловлено усилением адгезионного взаимодействия между компонентами ПНК. Отмечено увеличение прочности при растяжении композитов при введении Б-СВМПЭ на 35 % в сравнении с исходным СВМПЭ, 12 % относительно ПНК без добавления Б-СВМПЭ. Зарегистрировано снижение скорости массового изнашивания ПНК на основе СВМПЭ, модифицированных Б-СВМПЭ и НЧ в 7 раз, скорости линейного изнашивания в 3,5 раза по сравнению с исходным СВМПЭ. Коэффициент трения остаётся на уровне исходного СВМПЭ или же немного повышается. Разработаны новые составы композиционных материалов на основе СВМПЭ и гибридного модификатора (Б-СВМПЭ+НЧ), характеризующиеся повышенной износостойкостью.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSRG-2024-0004).

1. Галибева С.С., Хайруллин Р.З., Архиреев В.П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы // Вестник Казанского технологического университета. — 2008, № 2, 50—55
2. Kurtz S.M. The UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices. — Burlington: Academic Press. — 2009
3. Borisova R.V., Spiridonov A.M., Okhlopko T.A., et al. Bromination of UHMWPE surface as a method of changing adhesion to nanoparticles // Materials Today Communications. — 2018, № 14, 65—71

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА В ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНКАХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

М.Э. Борисова, В.Е. Крафт, Б.М.Д.Н.С. Джайасингхе

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург;
Sparta3006@inbox.ru

Полиимиды – класс материалов, обладающих высокой электрической прочностью, термической, химической и радиационной стойкостью. Эти материалы используются в электроизоляции кабелей, электрических машин, гибких печатных схем и т.д. Электрофизические свойства в значительной степени зависят от технологии производства и структуры материала. Процессы накопления заряда оказывают существенное влияние на ресурс работы изоляционных конструкций.

Цель. В работе рассмотрены и теоретически проанализированы методы, позволяющие получить информацию о процессах релаксационных явлений в диэлектриках. Это обеспечивает возможность контролировать влияние объёмного заряда на ресурс работы изоляции в различных конструкциях.

Материалы и методы. Работа посвящена экспериментальному изучению и физико-математическому моделированию электрофизических процессов в полимерных плёнках и композиционных материалах в условиях накопления и релаксации заряда.

Объектами исследования являются полиимидные плёнки, полученные методами расплава и раствора (Р-СОД, Р-ОДФО), и нетканые материалы, изготовленные электроформованием (ПМ-ДАДФЭ).

При исследовании был использован ряд методов. Измерение и теоретический анализ абсорбционных характеристик были проведены на основе объединённой эквивалентной схемы Фойгта и Максвелла. Диэлектрическая спектроскопия измерена в широком интервале частот и температур. Релаксационные процессы изучены методами термоактивационной спектроскопии [1].

В данной работе изучалось влияние природы и процентного содержания наполнителя на величину диэлектрической проницаемости композиционного нетканого материала. В качестве наполнителя использовались нанодисперсный кремнийорганический SiO₂ (Аэросил) и фторсодержащая водная суспензия Ф4-МБ-Д.

Исследуемые в работе материалы изготавливались в филиале НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС.

Характеристикой электретного состояния является электретная разность потенциала (U_3). При изучении стабильности накопленного в материалах заряда использовались изотермический ($U_3 = f(t)$) и термоактивационный ($U_3 = f(T)$) режимы.

Результаты и их обсуждение. Получены зависимости абсорбционных токов от времени в

изотермическом режиме в широком интервале температур. Предложены методики расчёта напряжения саморазряда, восстановленного напряжения, коэффициентов абсорбции и низкочастотных диэлектрических характеристик плёнок Р-СОД и Р-ОДФО с использованием разработанной нами обобщённой схемы Фойгта и Максвелла-Вагнера.

Путём экспериментального исследования и теоретического анализа на основе измеренных зависимостей тока от времени получена вся совокупность абсорбционных характеристик. Установлено, что величина K_a растёт с увеличением температуры от 25 °С до 200 °С. Значения K_a близки у плёнок Р-ОДФО, Р-СОД, ПМ.

Измерены токи термостимулированной деполяризации (ТСД) и получены значения энергий активации собственной проводимости диэлектриков с использованием ранее нами полученного соотношения.

Показано, что накопление и релаксация заряда в исследованных образцах обусловлены поляризацией Максвелла-Вагнера. Релаксация заряда происходит за счет собственной проводимости диэлектрика γ .

Установлено, что с увеличением концентрации наполнителя (от 0 до 7 %) диэлектрическая проницаемость нетканых полиимидных материалов снижается от $\epsilon = 1,75$ до $\epsilon = 1,35$ как при введении SiO₂, так и при введении суспензии Ф4-МБ-Д (рис. 1).

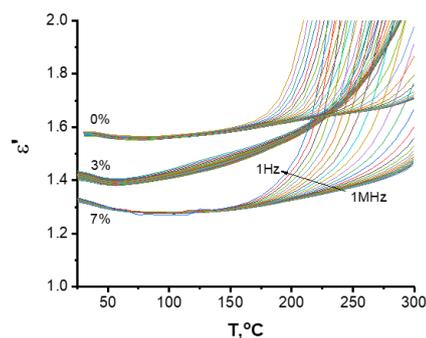


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости нетканого композита ПИ с ПТФЭ при различных частотах электрического поля (1 Гц–1 МГц)

Таким образом использованная нами совокупность экспериментальных методов позволила определить механизм накопления и релаксации заряда и рассчитать энергии активации данных процессов.

1. Гороховатский Ю.А., Термоактивационная спектроскопия (феноменологическая теория, экспериментальная методика, примеры применения) // 2023, С. 160

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕМБРАН МЕТОДОМ МЕЖФАЗНОЙ ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ

Е.С. Бурть, Т.В. Плиско, А.В. Бильдюкевич

Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;
katyaburt@gmail.com

Достижение баланса между высокой удельной производительностью и высокой селективностью мембран является одной из основных проблем в области мембранных технологий. Формирование тонкого селективного слоя на поверхности мембраны-подложки — один из способов повысить удельную производительность мембран при сохранении высокой селективности. Метод межфазной поликонденсации используется для получения тонкого полиамидного селективного слоя на поверхности ультра- или микрофильтрационной мембраны при взаимодействии аминов в водном растворе и ацилхлоридов в органическом растворителе, не смешивающемся с водой, на границе раздела фаз.

Цель данной работы заключалась в разработке методов получения тонкопленочных композиционных мембран (ТКМ) для нанофильтрации (НФ) и первапорации при формировании селективного слоя методом межфазной поликонденсации.

Материалы и методы. В качестве мембран-подложек, используемых для формирования селективного слоя методом межфазной поликонденсации, использовали ультрафильтрационные мембраны на основе полиакрилонитрила (ПАН, $\langle M_n \rangle = 150000\text{--}200000$ г/моль, ООО «АЛАБУГА-ВОЛОКНО») и полисульфона (ПСФ, Ultrason S 6010, $\langle M_n \rangle = 55000$ г/моль), полученные методом инверсии фаз способом мокрого формования с использованием воды в качестве осадительной ванны. Селективный слой из полиамида получали при использовании в качестве аминного компонента пиперазина (ПИП), диэтилентриамина (ДЭТА) или этилендиамина (ЭДА), а в качестве ацилхлоридного компонента — тримезоилхлорид (ТМХ). Для получения нанофильтрационных мембран также использовали анилин (АНИ, SRL Pvt. Ltd.) для формирования промежуточного слоя методом окислительной полимеризации с последующей адсорбцией.

Результаты и их обсуждение. Исследована взаимосвязь условий формирования промежуточного слоя на основе полианилина (ПАНИ) на поверхности ПСФ мембраны-подложки со структурой и свойствами ТКМ для нанофильтрации. Показано, что нанесение слоя ПАНИ существенно повышает гидрофильность поверхности (угол смачивания по воде уменьшается с $55 \pm 2^\circ$ до $26\text{--}49 \pm 2^\circ$), уменьшает размер пор и степень пористости, а также увеличивает шероховатость поверхности селективного слоя ультрафильтрационных мембран за счёт образования более крупных глобул ПАНИ, которые влияют на формирование ПА слоя. Показано, что нанесение

промежуточного слоя ПАНИ приводит к формированию более тонкого селективного слоя ПА, снижению шероховатости поверхности, повышению степени гидрофильности (угол смачивания по воде снизился с 28° до $< 10^\circ$) и степени сшивки селективного слоя нанофильтрационных ТКМ. Разработанный подход позволяет увеличить удельную производительность по воде до $45\text{--}64$ л/($\text{м}^2\text{ч}$) при $\Delta P = 0,5$ МПа и повысить селективность мембран (коэффициент задерживания MgSO_4 — $> 99,99\%$; LiCl — $5\text{--}25\%$; сульфадиметоксина — $80\text{--}95\%$). При этом установлено, что значения фактора разделения $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ увеличиваются до 37 и 58 для мембран, модифицированных ПАНИ, по сравнению с 9 и 8 для исходных немодифицированных ТКМ для НФ.

Установлено, что увеличение концентрации ДЭТА с 0,5 до 1,0 % при формировании селективного ПА слоя ТКМ для первапорации приводит к снижению удельной производительности, повышению селективности мембран в процессе разделения смеси 88%изопропанола/12% воды, что, вероятно, является результатом уплотнения селективного ПА слоя.

Установлено, что для повышения селективности композиционных мембран для первапорации необходимо использовать добавку триэтиламина (ТЭА) к водному раствору амина в процессе МП, который выполняет роль акцептора образующегося в процессе МП хлороводорода и тем самым препятствует образованию пор в селективном ПА слое. Установлено, что для повышения селективности необходимо увеличить степень сшивки ПА слоя путём повышения концентрации тримезоилхлорида (ТМХ) в растворе нефраса С2 до 0,24 %.

Показано, что замена ДЭТА на этилендиамин (ЭДА) в качестве мономера привела к небольшому росту удельной производительности композиционных мембран для первапорации при концентрации 1 % со 104 до 111 г/($\text{м}^2\text{ч}$).

Установлено, что формирование ПА слоя из 1 % ЭДА с добавкой 0,5 % ТЭА и при реакции 0,24 % ТМХ привело к получению первапорационных мембран с высокой удельной производительностью (163 г/($\text{м}^2\text{ч}$)), селективностью (90 % воды в пермеате), высоким фактором разделения, а также индексом эффективности первапорационного разделения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта № X24M-003).

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА СВОЙСТВА УГЛЕВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЧАСТИЧНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОЛИИМИДА

Г.В. Ваганов¹, Е.Н. Попова¹, Е.М. Иванькова¹, А.М. Камалов¹, В.В. Ваганов², В.Е. Юдин¹

¹Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – Институт высокомолекулярных соединений, Санкт-Петербург, Россия; glebvaganov@mail.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время актуальной задачей в области современных композиционных материалов является разработка теплостойких углеволокнистых композитов с повышенной сопротивляемостью к расслоению. Для достижения этой цели перспективным направлением является создание композиционных материалов комбинированного наполнения на основе полиимидной матрицы. В таких композиционных материалах непрерывное армирующее волокно сочетается с полиимидным связующим, модифицированным наночастицами.

Цель. Исследование влияния углеродных наночастиц на свойства углепластиков из частично-кристаллического полиамидного связующего. Предполагается, что такой подход позволит достичь высокой теплостойкости и трещиностойкости в одном материале.

Материалы и методы. В представленной работе был синтезирован частично-кристаллический полиимидное связующее Р-ОДФО (поли- $\{[4,4'$ -бис(4''-N-феноксидифенил)имид 1,3-бис(3',4'-дикарбоксифеноксид)бензол $\}$) в форме порошка. Армирующим наполнителем выступала углеродная лента Элур П-0,08. Для улучшения свойств углепластиков в полиимидную матрицу вводили одностенные углеродные нанотрубки (ОСУНТ) фирмы OCSIAL (Россия) в количестве до 0,2 мас. %. Углеволокнистые композиционные материалы были получены методом электростатического распыления, порошкового связующего на однонаправленную углеродную ленту с последующим каландрированием и прессованием при температуре (см рис. 1).

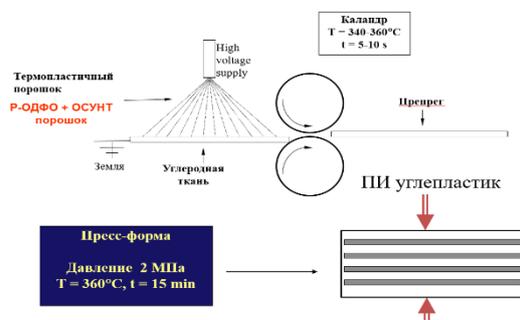


Рис. 1. Технология получения углепластиков на основе наномодифицированной термопластичной матрицы Р-ОДФО

Получение пенокомпозитного материала осуществляли в два этапа: на первом этапе получали препрег путём распределения форполимерной композиции в виде тонкодисперсного порошка на полиимидной нетканке с последующим каландрированием при температуре 80–130 °С; на втором этапе формировали непосредственно пенокомпозит путём горячего прессования сложенных в форму препрегов при температуре 220 °С.

В настоящей работе проведено исследование структуры, термических и механических свойств полиимидных молдингов и углепластиков на их основе с учётом введения углеродных наночастиц (ОСУНТ).

Результаты и их обсуждение. Анализ углепластиков выявил, что переход от аморфного к кристаллическому состоянию обуславливает снижение межслоевой вязкости разрушения из-за усиления хрупкости. Благодаря наличию кристаллической фазы углепластики на основе полиимида Р-ОДФО могут эксплуатироваться вплоть до температуры $\approx 300^\circ\text{C}$. Введение углеродных наночастиц в полиимидную матрицу способствует значительному увеличению ($\approx 40\%$) межслоевой вязкости разрушения углепластика в широком интервале температур ($-70^\circ\text{C} \div 250^\circ\text{C}$). Вероятно, это явление обусловлено ростом диссипативных свойств в трёхфазовом композите. Кроме того, установлено, что наибольшими значениями прочности и модуля при изгибе при температуре 250 °С обладают образцы углепластика содержащие частицы ОСУНТ.

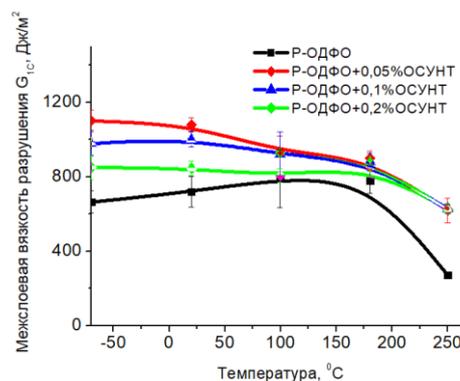


Рис. 2. Межслоевая вязкость разрушения (трещиностойкость) УП от температуры

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА И ПОЛИКАРБОНАТА, АРМИРОВАННЫХ КОРОТКИМИ СТЕКЛОВОЛОКНАМИ

В.В. Дубровский

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь, vlad.mpri@gmail.com

Введение. Композиционные материалы на основе стеклоармированного полиэтилентерефталата (ПЭТ) обладают рядом технически ценных свойств: высокая прочность и жёсткость, низкое водопоглощение, химическая стойкость, устойчивость к атмосферным воздействиям, электрическая прочность и работоспособность при высоких температурах. Однако их ударная вязкость относительно невысока. Одним из способов увеличения ударной вязкости композиционных материалов на базе ПЭТ может быть модифицирование его добавкой эластомеров и полиолефинов [1], однако, в результате такой модификации неизбежно снижаются прочность и жёсткость полимерной матрицы и, как следствие, композита на ее основе. Одним из вариантов повышения ударной вязкости композитов на основе ПЭТ может быть введение в состав матрицы поликарбоната (ПК) [2].

Цель работы – изучить механические свойства композитов на основе смеси ПЭТ и ПК, армированных стекловолокном (СВ).

Материалы и методы. В качестве базового полимера использовали полиэтилентерефталат 8200 (ОАО «Могилевхимволокно»), который модифицировали поликарбонатом Infino SC1220UR (Samsung Cheil Industries). В качестве армирующего наполнителя использовали рубленое стекловолокно ЕС13-4.5-30А (ОАО «Полоцк-Стекловолокно»).

Были разработаны следующие составы:

1. Серия 1: Смеси ПЭТ/ПК, армированные 20 мас. % СВ относительно общей массы полимерной матрицы (ПЭТ/ПК/20СВ). Массовая доля ПК в полимерной фазе варьировалась в диапазоне 0–50 %.

2. Серия 2: Смеси ПЭТ/ПК с фиксированным содержанием ПК 15 мас. % в полимерной матрице, армированные СВ в диапазоне 10–50 мас. % относительно массы полимеров (ПЭТ/15ПК/СВ).

3. Серия 3: Составы на основе ПЭТ, армированные СВ (0–50 мас. %), не содержащие ПК (ПЭТ/СВ).

Составы смешивали в расплаве при температуре 270 °С при помощи двухшнекового экструдера TSSK-35/40. Образцы типа 1А (ГОСТ 11262-2017) изготавливали литьём под давлением на термопластавтомате EN-30 (Cheng Heng Industrial Co.). Испытания на прочность проводили по ГОСТ 11262-2017 на разрывной машине AGS-X (Shimadzu Corporation), ударную вязкость по Шарпи по ГОСТ 4647-2014 (ISO 179/1 eU) на маятниковом копре РИТ 550J (Wance).

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 приведена зависимость свойств композитов

ПЭТ/ПК/20СВ от концентрации поликарбоната. Модуль упругости и прочность композитов растут с увеличением содержания ПК свыше 20 %, что можно объяснить влиянием более прочной фазы ПК. В то же время ударная вязкость этих композитов снижается в следствие выделения ПК в дискретные домены, через которые происходит прорастание трещин при ударном разрушении материала.

В композитах серий 2 и 3 (рис. 2) наблюдается рост модуля упругости и прочности при растяжении пропорционально содержанию СВ, причём величины показателей достаточно близки для обеих серий. Ударная вязкость композитов ПЭТ/СВ снижается с ростом содержания СВ, что объясняется увеличением количества дефектов в структуре материала.

Материалы ПЭТ/15ПК/СВ демонстрируют приблизительно одинаковый уровень ударной вязкости при всех концентрациях СВ, что говорит о лучшей способности смесевой матрицы рассеивать энергию удара.

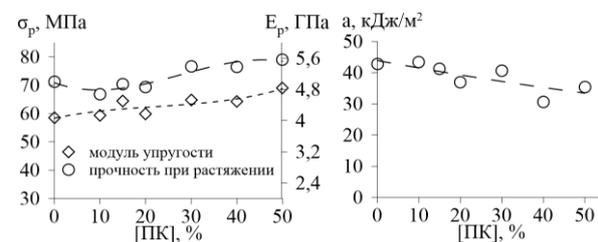


Рис. 1. Зависимость прочности (σ_p), модуля (E_p) при растяжении и ударной вязкости (a) композитов на основе ПЭТ/ПК/20СВ от содержания поликарбоната

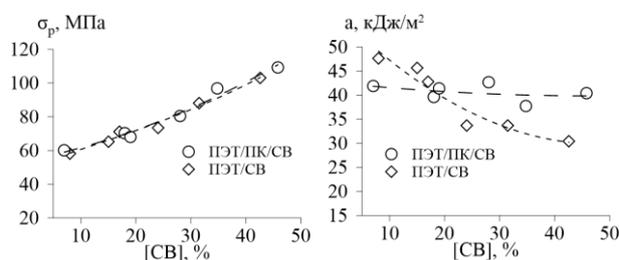


Рис. 2. Зависимость прочности (σ_p), модуля (E_p) при растяжении и ударной вязкости (a) композитов на основе ПЭТ/15ПК/СВ и ПЭТ/СВ от содержания стекловолокна

1. Poly(Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites. — Elsevier. — 2015
2. Kong, Y. Miscibility and crystallisation behaviour of poly(ethylene terephthalate)/polycarbonate blends / Y. Kong, J. N. Hay // Polymer. — 2002 (43), no. 6, 1805—1811

ВЛИЯНИЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

О.В. Кропотин¹, Д.В. Соколов², Д.А. Ставров¹

¹Омский государственный технический университет, Омск, Россия; kropotin@mail.ru

²Омский научный центр СО РАН, Омск, Россия

Введение

Электропроводные полимерные композиционные материалы (композиты) находят широкое применение в различных технических устройствах и системах [1, 2]. Одним из наполнителей, обеспечивающих высокую электропроводность композитов, являются углеродные нанотрубки (УНТ) [3, 4]. В качестве полимерной матрицы часто используются различные виды полиэтилена, в том числе линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП), который характеризуется сравнительно небольшим значением модуля упругости и высоким показателем текучести расплава. УНТ используются в полимерных композитах как в исходном виде, так и после функционализации [5]. Одним из самых распространённых методов функционализации УНТ является окисление, которое обеспечивает их очистку от примесей и аморфного углерода, повышает диспергируемость в матрице.

Целью работы является изучение влияния мягкого окисления различной интенсивности на структуру, электрофизические и механические свойства композитов на основе ЛПЭНП.

Материалы и методы

Объектами исследования в работе являлись исходные и обработанные в течение 0,5 часа и 24 часов многослойные углеродные нанотрубки МУНТ-1 (Институт катализа СО РАН, Россия), а также композиты на основе ЛПЭНП RM3845UV (Казаньоргсинтез, Россия), содержащие 5 мас. % МУНТ-1.

Для индивидуальных УНТ определяли работу выхода электронов, электрическое сопротивление в атмосфере различных газов для установления типа проводимости исходных нанотрубок, удельное электрическое сопротивление.

Для ансамбля УНТ проводили рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию, ИК-Фурье спектроскопию, просвечивающую электронную микроскопию, измеряли удельное сопротивление.

Для полимерных композитов проводили исследование механических свойств, растровую электронную микроскопию, измеряли удельное сопротивление.

Результаты

В ходе проведенных исследований определён тип проводимости исходных УНТ и влияние степени

окисления на работу выхода электронов [6]. Установлено, что при окислении изменяется тип проводимости УНТ, их удельное сопротивление увеличивается. Окисление УНТ изменяет физико-химическое состояние их поверхности, обеспечивает очистку поверхности от аморфного углерода, удельное сопротивление ансамблей УНТ увеличивается [6]. Характер распределения УНТ в полимерной матрице изменяется при их окислении от преимущественного распределения агломератов УНТ к преимущественному распределению индивидуальных УНТ и тяжелей из них с образованием цепочечных структур. Удельное сопротивление композитов, наполненных окисленными УНТ, увеличивается относительно композита с исходными УНТ [6]. Использование в композите УНТ с окисленной поверхностью приводит к увеличению его модуля упругости. Несмотря на увеличение удельного сопротивления композитов с функционализированными УНТ, исследованные материалы относятся к классу проводников и имеют потенциально широкую область применения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (код проекта FSGF-2024-0003).

1. Pang H., Xu L., Yan D.-X., and Li Z.-M. Conductive polymer composites with segregated structures // *Progress in polymer science*. — 2014 (39), 1908—1933
2. Рагушина М.Д., Евсеева К.А., Калугина Е.В., Ушакова О.Б. Полимерные композиционные материалы с антистатическими и электропроводящими свойствами // *Пластические массы*. — 2021, № 3–4, 6—9
3. Kanoun O., Bouhamed A., Ramalingame R., Bautista-Quijano J.R., Rajendran D., and Al-Hamry A. Review on conductive polymer/CNTs nanocomposites based flexible and stretchable strain and pressure sensors // *Sensors*. — 2021 (21), 341
4. Hu Z. and Hong H., Review on material performance of carbon nanotube-modified polymeric nanocomposites // *Recent progress in materials*. — 2023, no. 5, 1—20
5. Rathinavel S., Priyadharshini K., and Panda D. A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application // *Materials science and engineering: B*. — 2021 (268), 115095
6. Rogachev E., Kropotin O., Nesov S., Sokolov D., Trenikhin M., Danshina V., Stavrov D., Egorova V., and Russkikh G. Influence of multi-walled carbon nanotubes oxidation on the electrophysical properties of composites based on linear low-density polyethylene at different structural levels // *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. — 2025, 1—9

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЯРИЗАТОРОВ ВИДИМОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

С.В. Лихоманова^{1,2,3}, Н.В. Каманина^{1,3,4}

¹Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

²ГУАП, Санкт-Петербург, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Санкт-Петербург, Гатчина

⁴Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Введение. Поливиниловый спирт (ПВС) известный синтетический полимерный материал, обладающий рядом физических и химических преимуществ, среди которых можно выделить способность к пленкообразованию и экологическую безопасность. Получаемые из ПВС плёнки обладают высокой механической прочностью, гибкостью и оптически прозрачны. Дополнительная пластификация поливинилового спирта увеличивает его эластичность и делает возможным изготавливать из полимера плёнки, листы и др. [1]. Широкое применение ПВС нашёл в оптических технологиях [2]. На основе поливинилспиртовых плёнок изготавливают поляризаторы оптического излучения [3]. Спектральная рабочая область которых определяется введёнными в матрицу ПВС-плёнки красителями (йод, красители, наночастицы и др.). Отметим и современную тенденцию материаловедения, заключающуюся в сенсбилизации широко изученных веществ различными наночастицами (металлическими, углеродными и т.д.), что приводит в результате к получению материалов со свойствами отличными от свойств базовой матрицы [4].

Цель работы – проведение анализа спектральных и поляризационных характеристик йодно-поливинилспиртовых поляризаторов, сенсбилизированных углеродными наночастицами (оксид графена, фуллерен C_{70} , углеродные нанотрубки).

Материалы и методы. Оптические поляризаторы были изготовлены из водного 8%-го раствора поливинилового спирта. Как было сказано выше, ПВС-плёнки прозрачны в оптическом спектральном диапазоне, поэтому для создания эффективных поляризаторов в видимой области спектра плёнки были окрашены молекулами йода. С целью улучшения спектральных и поляризационных характеристик поляризаторов водный раствор ПВС был сенсбилизирован оксидом графена, фуллереном C_{70} , одностенными и двустенными углеродными нанотрубками (УНТ) в концентрации 0,1 вес. %. Анизотропная поглощающая среда была реализована растяжением увлажнённых йодно-поливинилспиртовых плёнок до 3–4 раз относительно первоначальной длины. Для определения поляризующей способности изготовленных поляризаторов на спектрофотометре СФ-26 было измерено пропускание параллельной и ортогональной компонент светового потока. Поляризация

падающего потока была получена с помощью призмы Глана, установленной в кюветном отделении спектрофотометра.

Результаты и их обсуждения. На рис. 1 представлены спектры пропускания параллельной световой компоненты изученных поляризаторов. Анализ данных показывает, что несенсбилизированная ПВС-матрица (кр.1) и ПВС с добавлением УНТ (кр.2, 3) в диапазоне длин волн 600–650 нм имеют область уменьшения пропускания на 10–15 %. Сенсбилизация оксидом графена (кр.4) или фуллереном C_{70} (кр.5) нивелирует указанное падение за счёт изменения ориентации молекулярных плоскостей, и поляризаторы обладают стабильным значением пропускания параллельной световой компоненты.

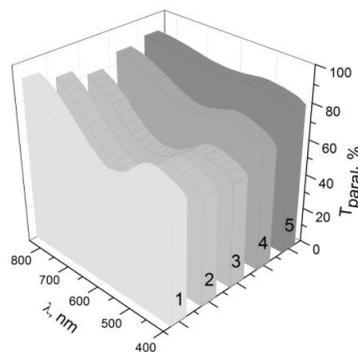


Рис. 1. Пропускание параллельной компоненты света T_{parallel} ПВС-йодными поляризаторами несенсбилизированными (1) и сенсбилизированными одностенными (2) и двустенными (3) УНТ, оксидом графена (4), фуллереном C_{70} (5)

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-23-00021 (https://rscf.ru/prjcard_int?24-23-00021).

1. Махачей М.В., Филиппович Л.Н., Игнатович Ж.В. и др. Плёнки на основе поливинилового спирта и куркумина // *Материалы 22-й Международной научной конференции.* — 2022, 279–282
2. Li Y., Xie J., Cheng H., Wei X etc. Polyvinyl alcohol-based polarizers for new displays: molecules, processing and properties // *Soft Matter.* — 2025, no. 21, 3148
3. Kamanina N., Fedorova L., Likhomanova S., etc Impact of Carbon-Based Nanoparticles on Polyvinyl Alcohol Polarizer Features: Photonics Applications // *Nanomaterials.* — 2024 (14), 737
4. Фарус О.А. Биоразлагаемые пленочные материалы на основе гидрогелей полимеров и наночастиц серебра // *Наноиндустрия.* — 2022, № 15(3–4(114)), 196–203

ВЛИЯНИЕ ТИПА ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИАМИДА 6

Н.А. Марусенко, С.П. Богданович

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; Sennatar@mail.ru

Введение. Активное развитие и распространение аддитивных технологий как для прототипирования, так и для получения готовых изделий, привело к необходимости создания композитов, не только пригодных для качественной 3D-печати, но и обладающих хорошими специальными свойствами, например, высокими модулем упругости, электро- и теплопроводностью и др., которые достигаются за счёт введения в полимерную матрицу наполнителей. Однако, 3D-печать композитов может представлять значительные трудности в связи с существенным изменением модификаторами реологических свойств полимерной матрицы.

Цель работы. Изучение влияния концентрации и типа технического углерода на физико-механические характеристики ПА6.

Материалы и методы исследований. В качестве полимерной матрицы использовали алифатический полиамид (ПА 6) марки гроднамид 27 ТУ ВУ 500048054.009-2001, а в качестве модификатора технический углерод (ТУ, сажа) марок N 339, N 650, СН 85 ГОСТ 7885.

Композиты получали экструзионным компаундированием, а образцы – литём под давлением.

По действующим стандартам определяли следующие показатели свойств: модуль упругости (E_p) и предел текучести ($\sigma_{рт}$) при растяжении, прочность при разрыве ($\sigma_{рр}$), максимальное относительное удлинение при разрыве ($\epsilon_{рр}$), ударную вязкость по Шарпи с надрезом ($a_{отр}$), объёмное (ρ_v) и поверхностное (ρ_s) электрические сопротивления, показатель текучести расплава (ПТР).

Результаты и их обсуждение.

Установлено, что введение технического углерода в ПА6 приводит к повышению его E_p и $\sigma_{рр}$, причем указанные показатели растут с увеличением концентрации сажи. Показано, что армирующий эффект зависит от типа ТУ, а наибольший прирост наблюдается при использовании ТУ N 339 и достигает 36 % (E_p), 47 % ($\sigma_{рр(спай)}$), 54 % ($\sigma_{рр(без\ спая)}$) табл. 1.

Потенциальную применимость композиционных материалов для 3D-печати оценивали по следующим показателям: $\sigma_{рр}$ образцов со спаем и ПТР, табл. 1. Указанные характеристики позволяют осуществить предварительный выбор наиболее подходящего для 3D-печати композита с точки зрения технологичности полученных композиционных

материалов и прочности получаемого из них изделия [1].

Таблица 1. Показатели свойств полученных материалов

Концентрация и марка ТУ	E_p , ГПа	$\sigma_{рр}$ (спай), МПа	$\sigma_{рр}$ (без спая), МПа	$\epsilon_{рр}$, % (без спая)
Без ТУ	2,1	40,9	42,2	175,9
10% N 339	2,1	50,6	53,3	166,3
20% N 339	2,1	53,5	55,0	92,3
40% N 339	2,9	60,3	65,1	25,4
10% N 650	2,2	49,3	49,8	60,0
20% N 650	2,6	52,9	52,0	43,9
40% N 650	2,5	49,9	50,9	37,3
10% СН 85	2,2	51,9	50,4	158,0
20% СН 85	2,3	50,5	51,2	53,6
40% СН 85	2,3	50,5	50,8	50,8

Выявлено, что ТУ, независимо от его типа, существенно повышает $\sigma_{рр}$ для образцов со спаем: причем наибольшее увеличение $\sigma_{рр}$ достигается для композиции, содержащей 40 % ТУ N 339, и составляет 48,7 %.

С ростом концентрации ТУ величина ПТР существенно снижается. Так, у состава без ТУ значение составляет 58,8 г/10 мин. В то же время, при концентрации сажи 40 мас. % (при которой достигаются высокие антистатические свойства) величина ПТР падает до 16,5 г/10 мин (ТУ N650), 7,7 г/10 мин (СН 85) и 0,8 г/10 мин (ТУ N339).

Установлено, что удельные сопротивления композиционных материалов незначительно и практически линейно снижаются с ростом содержания ТУ, достигая перколяционного перехода, а затем резко падают. При этом, наименьшие величины ρ_v и ρ_s составили, соответственно, $5,16 \cdot 10^1$ Ом·см и $1,75 \cdot 10^1$ Ом/□ при использовании ТУ N 339.

Таким образом, установлено, что исследованные марки ТУ позволяют в широком диапазоне регулировать механические, электрофизические и реологические показатели ПА6, позволяя получать композиции, пригодные для переработки в изделия 3D-печати. Глубина модифицирования указанных свойств может контролироваться как концентрацией наполнителя, так и его типом.

1. Богданович, С.П., Марусенко Н.А. Игнатович С.В., Рогачев А.А. Перспективные композиционные материалы на основе полиамида 6 и технического углерода для технологии послойного наплавления // Полимерные материалы и технологии. — 2024 (10), № 2, 40—48

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРОКСИБЕНЗОЛ-МЕТАНАЛЬНЫХ ОЛИГОМЕРОВ

С.С. Негматов¹, Н.С. Абед¹, Т.О. Камалов¹, Ш.А. Умаров², Р.И. Исмаилов²

¹Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиет» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

²Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

Фенолформальдегидные олигомеры, являющиеся первыми представителями термореактивных полимеров, остаются востребованными различными отраслями промышленности и по сей день. В последние годы, принимая во внимание вредное воздействие свободного фенола и свободного формальдегида при синтезе фенолформальдегидных олигомеров, исследования были сосредоточены на модификации фенолформальдегидных олигомеров с целью улучшения их физико-химических свойств [1, 2].

В то же время в большинстве публикаций описывается получение фенолформальдегидных олигомеров с более низкой молекулярной массой. В этой связи большое значение приобретает разработка новых высокоэффективных, экологически чистых, экономически выгодных и инновационных технологий модификации олигомерных материалов, используемых в бытовой технике и химической промышленности. Для решения данной задачи нами были синтезированы термореактивные олигомеры. В последние годы наблюдается интерес к изучению и разработке безвредных в окружающей среде, экологически и пожаробезопасных олигомерных и полимерных веществ и именно гидроксибензол-метанальных смол, производимых в республике. Эти соединения представляют собой значительный интерес для широкого спектра промышленных приложений, пластических масс, синтетических клеев, лаков, герметиков, выключателей, тормозных накладок и подшипников. Используются для получения в качестве связующего компонента в производстве наполненных пресс-композиций с различными наполнителями, древесно-волоконистых и древесно-стружечных плит, пропиточных и заливочных композиций [3, 4].

Изучено изменение величины рН в процессе синтеза. В предварительных опытах изменения величины рН синтез проводился при рН = 4 при соотношении полиэфирполиол: гидроксиметил гидроксибензол 1:100 моль/моль и температуре 95 °С, но оптимальным выявлено значение рН = 3. Величину изменения рН определяли на приборе рН-150МИ. Ниже представлены значения изменения рН при синтезе модифицированного гидроксибензол-метанального олигомера, синтезированного при различной температуре.

Синтез модифицированного гидроксибензол-метанального олигомера при $t = 95$ °С в соотношении полиэфирполиол: гидроксиметил гидроксибензол (1:1)=1:100 моль/моль. Смесь имеет рН = 7,62.

Добавляли 6,39 г (1,57 моля) 2,5-фурандиона до рН = 4,04. Общее время синтеза составляет 3,5 часа. Залито воды 29 мл, слито 7 мл (табл.).

Таблица. Изменение рН при синтезе модифицированного гидроксибензол-метанального олигомера

Время, мин.	В смеси	20	40	60	80	100
рН	7,62	4,20	4,25	4,30	4,32	4,39
Время, мин.	110	130	150	170	190	210
рН	4,38	4,43	4,42	4,43	4,44	4,40

Анализ изменения рН во всех трех процессах синтеза показал, что во всех случаях величина рН увеличивалась в последние минуты синтеза. Можно предположить, что основной причиной этого является влияние воды, выделяющейся в процессе поликонденсации, или наличие двойной связи и карбоксильной группы в цис-бутендиновой кислоте, а это означает, что цис-бутендиновая кислота добавляется в необходимом количестве до рН = 3.

Кинетические параметры модифицированных гидроксибензол-метанальных олигомеров рассчитаны на основе продолжительности (времени) реакции, измеренные при различных температурах в процессе синтеза. Оптимальными условиями синтеза являются температура 95 °С, рН = 3. Установлена реакция второго порядка, оценены энергия активации которая равна $E_a = 43,5$ кДж/моль и термодинамические параметры (энтальпия $\Delta H = 39,74$ кДж/моль и энтропия $\Delta S = -222,84$ кДж/моль·К). На основании полученных результатов проанализирован синтез гидроксибензол-метанальных олигомеров и определен механизм.

1. Абдуллаева Н.Р., Амирасланова М.Н., Алиева Л.И., Мустафаев А.М., Рустамов Р.А., Алиева Н.М. Исследование физико-химических и термических свойств фенолформальдегидных олигомеров, модифицированных имидазолинами // Пластические массы. — 2018, № 9, 7—9
2. Мачуленко Л.Н., Донецкая С.А., Бузин М.И. Фенолформальдегидные сополимеры, содержащие кардовые группировки // Пластические массы. — 2019, № 11, 10—16
3. Сутягин В.М., Ляпков А.А. Физико-химические методы исследования полимеров. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета. — 2010
4. Умаров Ш.А., Исмаилов Р.И. Изучение кинетики образования гидроксибензол-метанальных смол // Universum: химия и биология. Москва. — 2025, № 3, 22—28
5. Умаров Ш.А., Исмаилов Р.И. Анализ ИК-спектроскопии модифицированных фенолформальдегидных олигомеров, синтезированных в различных соотношениях // Коллоидная химия: инновации и решения для химической технологии, экологии и промышленности. — Термез. — 2025, 7—8

СИНТЕЗ АНИОНИТА НА ОСНОВЕ ХЛОРИРОВАННОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА С ПОЛИЭТИЛЕНПОЛИАМИНОМ

С.С. Негматов¹, Н.С. Абед¹, Т.О. Камалов¹, О.Х. Хасанов², Р.И. Исмаилов³

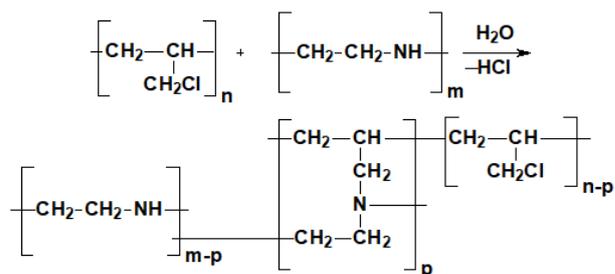
¹Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиет» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

²Международный Университет Кимё, Ташкент, Узбекистан

³Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

На сегодняшний день совершенствование промышленности, применение современных технологий, также в решении экологических проблем, производства конкурентоспособных и экологически чистых веществ превращается в актуальную и востребованную проблему. В последние годы на основе новых инновационных решений происходит рост производства необходимых продуктов. Для технологий с применением активных химических веществ для очистки сточных вод, разработка получения анионитов и катионитов, улучшение их физико-химических, адсорбционных свойств имеет важное научно-практическое значение. В мире задачи получения ионообменных полимеров, в том числе анионитов для разделения ионов благородных и драгоценных металлов из технологических сточных вод, определение научно-обоснованных решений по расширению их сырьевой базы, в частности химического состава, физико-химических и адсорбирующих свойств первичного сырья; получение анионита химически модифицированного хлорированного полипропилена с полиэтиленполиамином с селективной сорбционной, комплексообразующей способностью; определение оптимальных условий получения анионита и определение влияния температуры реакции, соотношения исходных веществ, концентрации на ионообменные свойства полученных анионитов является важным и перспективным. Проанализировано использование ионообменных волокнистых материалов в качестве ионитов, особенности их получения и структуры. Большое внимание уделено механизмам хемосорбционных процессов с использованием ионообменных волокнистых материалов и роли воды в их успешном осуществлении. На конкретных примерах рассмотрены отдельные варианты и некоторые закономерности взаимодействия волокнистых анионитов, катионитов и полиамфолитов за счёт реакций обмена, нейтрализации, восстановления-окисления, комплексообразования и осаждения с газообразными и парообразными веществами [1, 2].

В данной работе был модифицирован хлорированный полипропилен (ХПП) с полиэтиленполиамином (ПЭПА) с целью получения анионообменной смолы, путём эффективно поглощения различных анионов [3]. Процесс модификации проводили в закрытом автоклаве в печи. Модификацию исследовали непрерывно от 2 до 18 часов. Первым признаком образования ионообменных материалов является появление у полимеров ионообменных свойств. Реакция образования анионообменной смолы приведена по нижеследующей схеме:



Для модификации ХПП в ПЭПА сначала исследовали различные концентрации раствора ПЭПА. Также определяли кинетические характеристики: значение СОВ анионитов в зависимости от температуры, концентрации и продолжительности (табл.). Исследовали модификацию ХПП в ПЭПА при различных температурах в течение 12 часов. Реакция проведена при мольном соотношении 1:2 ХПП и ПЭПА соответственно.

Таблица. Кинетические характеристики значения СОВ (мг-экв/г) анионитов в зависимости от температуры

Температура, °С	50	70	80	90	100
СОВ, мг-экв/г	1,2	2,9	3,8	4,4	4,6

Результаты эксперимента показывают, что выход реакции увеличивается с повышением температуры. Установлено, что процесс приводит к оптимальным результатам при проведении на водяной бане при 100 °С. Статическая обменная ёмкость анионита, полученного при этой температуре, составила 4,6 мг-экв/г. При изучении кинетики процесса изучена зависимость значения СОВ от различных концентраций ПЭПА. Величина СОВ полученного ионита также увеличивалась с увеличением концентрации ПЭПА. Оптимальный результат был получен при проведении процесса в течение 12 часов при концентрации 80 % ПЭПА.

1. Min Zhanga, Jinling Liua, Yiguang Wang, Linan Anc Michael D. Guiver,d,e and Nanwen Li Highly Stable Anion Exchange Membranes Based on Quaternized Polypropylene // Journal of Materials Chemistry A. — 2015, 2-14
2. Сутягин В.М., Ляпков А.А. Физико-химические методы исследования полимеров. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета. — 2010
3. Хасанов О.Х., Хайдаров И.Н., Исмаилов Р.И. Исследование свойств и структуры анионита на основе хлорированного полипропилена современными спектральными методами // Вестник НУУз. Ташкент. — 2022, № 3, 415—419

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ КОМПОНЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННОЙ СМЕСИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ, НАПОЛНЕННОГО ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ

Е.А. Рогачев, Е.А. Дроздова, А.А. Каленчук, Е.Г. Глуховеря

Омский государственный технический университет, Омск, Россия; earogachev@omgtu.ru

Вызовы, которые стоят перед современной промышленностью, определяют актуальность разработки новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) с повышенными эксплуатационными характеристиками. Путей обеспечения требуемых свойств для разрабатываемых материалов несколько. Среди них – варьирование дисперсности компонентов композиционной смеси, материалов матрицы и наполнителя, концентраций наполнителей, способов изготовления ПКМ.

Придание электропроводных свойств полимерным композиционным материалам имеет важнейшее значение для обеспечения антистатической защиты технических устройств и систем, при изготовлении кабельной продукции, деталей конвейерных лент, тары для транспортировки горючих материалов и т.д. [1, 2]. Повышение концентрации электропроводного наполнителя в ПКМ приводит к охрупчиванию материалов, что часто является негативным фактором, сужающим область применения материала. Одним из альтернативных способов изменения степени влияния наполнителя на свойства ПКМ при выбранных матрице и наполнителе является варьирование дисперсности компонентов композиционной смеси при изготовлении композитов. Данный способ актуален для ПКМ, наполненных техническим углеродом (ТУ), который широко используется для придания электропроводных свойств композитам. Для варьирования дисперсности ТУ может применяться предварительное размалывание гранулированного ТУ или использование «пылящего» ТУ (исходного материала для последующего гранулирования). Также возможно использование полимера как в гранулированном виде, так и в форме порошка. Использование компонентов смеси в различных формах позволит воздействовать на физико-механические и электрофизические свойства ПКМ при неизменной концентрации наполнителя.

В работе исследовалось влияние дисперсности полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) марки HD03490PE производства ООО «СИБУР» и технического углерода марки OMCARB CH1000 [3] производства ООО «Омск Карбон Групп» на структуру и свойства электропроводных ПКМ. ПКМ изготавливали из ПЭВП в форме гранул, наполненного гранулированным ТУ (система «гранулы-гранулы») и ТУ в форме порошка, полученного размалыванием на ножевой мельнице гранул ТУ (система «гранулы-порошок»), а также ПЭВП в форме мелкодисперсного

порошка и ТУ в форме порошка (система «порошок-порошок»). Концентрацию ТУ в ПКМ варьировали от 4 мас. % до 16 мас. %.

Измельчение гранулированного ТУ проводили в ножевой мельнице. Гранулят ПКМ получали методом двойного экструдирования на лабораторном экструдере SCAMEX RHEOSCAM Micro-extruder при температуре 180 °С. Изготовление образцов производилось методом горячего прессования в термопрессе Joos LAP 40 при температуре 190 °С.

В работе исследовались механические свойства ПКМ на разрывной машине Zwick/Roell Xforce HP Z010, измерялось удельное электрическое сопротивление с помощью милли-тераомметра Milli-TO3. Структурные исследования производились методом растровой электронной микроскопии.

В результате проведенных исследований выявлены закономерности формирования структуры и свойств исследуемых ПКМ при различной дисперсности компонентов. Установлено, что характер зависимости модуля упругости от концентрации ТУ для всех исследованных модельных систем изменяется при концентрации ТУ 8–10 мас. %, что связано с изменениями в характере распределения частиц наполнителя в матрице и структуры самой матрицы. Прочностные характеристики ПКМ также изменяются нелинейно. Удельное электрическое сопротивление ПКМ при увеличении концентрации ТУ закономерно уменьшается, однако количественные закономерности этих изменений существенно зависят от дисперсности использованных компонентов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке электропроводных ПКМ для применения в технических устройствах и системах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (код проекта FSGF-2024-0003).

1. Huang X., Sun B., Yu C. [et al.]. Highly conductive polymer nanocomposites for emerging high voltage power cable shields: experiment, simulation and applications // High Voltage. — 2020 (5), 387–396
2. Рагушина М.Д., Евсеева К.А., Калугина Е.В., Ушакова О.Б. Полимерные композиционные материалы с антистатическими и электропроводящими свойствами // Пластические массы. — 2021. № 3–4, 6–9
3. Кропотин О.В., Рогачев Е.А., Дроздова Е.А., Каленчук А.А., Глуховеря Е.Г. Зависимость электрического сопротивления от параметров кристаллической структуры и физико-механических характеристик технического углерода // Ползуновский вестник. — 2024, № 3, 228–233

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.П. Сазанков¹, Т.Ц. Дамдинова², З.Ш. Дамдинов²

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь, alex.saz.job@gmail.com

²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия, ddatyanac@mail.ru

Введение. В последние годы цифровая обработка изображений (ЦОИ) активно применяется при исследовании структурно-неоднородных материалов. Опыт разработки и практического использования методов ЦОИ [2–4] целесообразно использовать для анализа формирования трещины в образце при циклическом нагружении [1].

Цель работы – оценить эффективность ЦОИ для ускоренного определения параметров трещиностойкости полимерных материалов.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования использовались призматические образцы СВМПЭ и АБС-пластика. Для определения параметров трещиностойкости включая диапазон изменения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) использовали методику [1] и программу пакетной обработки видеозаписи испытания на трещиностойкость при циклическом растяжении (рис. 1).



Рис. 1. Стоп-кадр развития трещины в образце СВМПЭ (а) и результат его программной обработки (б)

Результаты и их обсуждение. В качестве примера на рис. 2 показаны результаты анализа экспериментальных данных, полученных при испытании на трещиностойкость СВМПЭ в виде диаграммы изменения КИН по циклам нагружения.

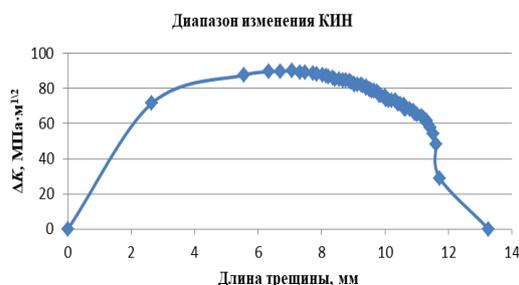


Рис. 2. Диаграмма изменения КИН для образца СВМПЭ

При обработке изображений было выявлено нарушение непрерывности контура трещины вблизи

ее вершины, что приводит к заниженным значениям площади и глубины трещины (рис. 3).

Это предъявляет определенные требования к качеству получаемых изображений, что в ряде случаев предполагает повторение испытаний и выбор оптимального ракурса при видеосъемке.

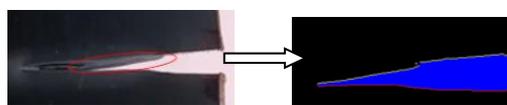


Рис. 3. Результат программной обработки изображения с нарушением непрерывности контура трещины

Заключение. Показана высокая эффективность цифровой обработки изображений для анализа процессов трещинообразования в полимерных материалах, что даёт возможность автоматизировать трудоёмкую процедуру испытаний на трещиностойкость и получить необходимые количественные характеристики. Например, для обработки набора из 58 кадров, полученных при видеосъемке формирования трещины в образце СВМПЭ, потребовалось менее 20 секунд.

В целях совершенствования предлагаемой методики необходимо сформулировать требования к условиям видеосъемки и выполнять программную обработку изображений непосредственно по видеоматериалам без формирования пакета стоп-кадров.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т24МП–057).

1. Сазанков А.П. Модификация метода определения трещиностойкости полимерных материалов и его апробация на примере сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Динамика систем, механизмов и машин.* — 2024 (12), № 2, 51—57
2. Bazarov S.A., Daminova T.Ts., and Bochektueva E.B. Determination of the geometric characteristics of fatigue cracks by digital image processing method // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* — 2019 (684), Art. 012022.
3. Определение по цифровому изображению пористости и геометрических характеристик элементов пористых тел : гос. рег. прогн. для ЭВМ RU 2021662213 / Дамдинова Т.Ц., Раднаева В.Д., Советкин Н.В., Мисюркеева Т.Н. – Опул. 23.07.2021.
4. Исследование параметров диффузионных слоев в процессах химико-термической обработки металлов по цифровым изображениям микроструктур : гос. рег. прогн. для ЭВМ RU 2024613959 / Дамдинова Т.Ц., Мосоров В.И., Дамдинов З.Ш., Коробков К.С. – Опул. 19.02.2024.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ АМИНОВОГО АБСОРБЕНТА МНОГОСЛОЙНЫМИ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ ПОЛИПРОПИЛЕНА

В.В. Снежков¹, В.Ю. Шумская², В.Ю. Гарбарук¹

¹ОДО «НТЦ Ларта», Гомель, Беларусь, larta@lartagroup.com;

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Важнейшим условием успешной эксплуатации установок аминной очистки природного газа от серосодержащих соединений является поддержание высокого качества циркулирующего раствора абсорбента [1]. Для этого используется трёхступенчатая система очистки, включающая фильтр механических частиц, фильтр с активированным углём и фильтр регенерированного амина.

Цель работы – оценка эффективности фильтрации регенерированного раствора метилдиэтанолamina (МДЭА) в условиях промышленной эксплуатации, многослойными фильтрующими элементами (ФЭ) из полипропилена.

ФЭ изготавливали по технологии аэродинамической вытяжки расплава полипропилена, формируя слой фильтрующего материала толщиной 1,4–1,6 мм из волокон диаметром 20–30 мкм, термоскрепленных в местах пересечения, целенаправленно не допуская термоскрепления слоёв между собой для создания граничных зон, которые оказывают существенное влияние на фильтрационные характеристики [2]. ФЭ прошли опытно-промышленные испытания (ОПИ) в фильтре регенерированного амина на одном из газоперерабатывающих заводов ПАО «Газпром». Микроскопические исследования структуры фильтрующего материала, прошедшего ОПИ, исследовали на микроскопе Levenhuk MED D45T. Грязеёмкость определяли по массе задержанного за время эксплуатации загрязнителя (ГОСТ 25151-82). Также были исследованы четыре пробы раствора МДЭА, отобранные до и после фильтра в начале и в конце срока ОПИ, хроматографический анализ которых проводили в «БелНИПИнефть» на газовом хроматографе Agilent 7890A с плазменно-ионизационным детектором.

Показано, что ФЭ задерживает не только механические примеси, но и гелеобразные органические соединения. Расчётные величины соотношения задержанного загрязнителя, полученные обработкой фотографий послойных срезов ФЭ, дают следующие значения: частицы угля 65–70 %, органические соединения 35–30 %, причём большая часть органических веществ сосредоточена на границе раздела слоёв ФЭ.

Сравнительный анализ хроматограмм показал, что пробы аминного абсорбента имеют идентичный компонентный состав, поскольку хроматографические пики имеют одинаковое время выхода, а основным органическим компонентом анализируемого аминного абсорбента, является МДЭА.

Установлены отличия при сравнении пика

МДЭА на хроматограммах:

– фрагмент хроматограмм проб № 1 (до фильтра) и № 2 (после фильтра) в начале ОПИ, приведенный на рис. 1, а, показывает, что на хроматограмме после фильтра (проба №2) отмечено раздвоение пика МДЭА и разделение его на два компонента – МДЭА и «пик наездник», а также установлено смещение времени выхода данного пика в сторону уменьшения; в то время как, на хроматограмме до фильтра (проба № 1), пик МДЭА выписывается нераздвоенным.

– на фрагменте хроматограмм проб № 3 и 4 рис. 1, б отмечено, что после фильтра (проба № 4) наблюдается более глубокое раздвоение пика МДЭА и разделение его на два компонента - МДЭА и «пик наездник», а также установлено смещение времени выхода данных пиков в сторону уменьшения; в то время как, на хроматограмме до фильтра (проба №3), вилка пика МДЭА менее глубокая.

Смещение времени выхода пика МДЭА и его «пика наездника» обусловлено уменьшением температуры кипения вещества, что может быть связано с очисткой вещества от побочных продуктов (или продуктов реакции), протеканием на поверхности контактирования ФЭ с аминным абсорбентом физических процессов.

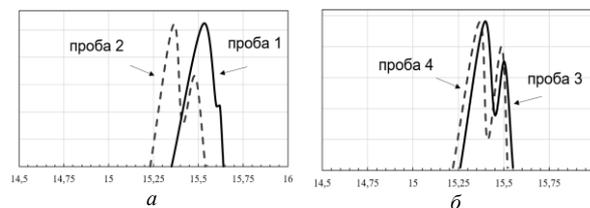


Рис. 1. Увеличенный участок наложения проб и выход МДЭА а – проба 1 – начало ОПИ до фильтра, проба 2 – начало ОПИ после фильтра; б – проба 3 – конец ОПИ до фильтра, проба 4 – конец ОПИ после фильтра

Полученные различия позволяют предположить, что фильтрующий элемент обладает физическими свойствами, аналогичными в некоторой степени свойствам и принципу работы хроматографической колонки и способен разделять отдельные компоненты раствора МДЭА.

1. Актуальные проблемы аминной очистки природных газов, анализ и пути решения, И. А. Голубева, А. В. Дашкина, И. В. Шульга // Нефтехимия. — 2020 (60), № 1, 51–56
2. Шумская В.Ю. Повышение эффективности волокнисто-пористых многослойных полимерных фильтроматериалов для газотранспортного оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / В. Ю. Шумская. — М. — 2023

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ α -ТОКОФЕРОЛА НА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОМ ПОЛИЭТИЛЕНЕ

Д.Н. Сидорова, Н.А. Слепцов, А.М. Спиридонов, А.А. Охлопкова

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия; spalmik@mail.ru

Введение. В настоящее время наиболее распространённым материалом для изготовления антифрикционных деталей систем эндопротезирования коленного сустава является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), характеризующийся не только химической и биологической инертностью, но и выгодным для использования в имплантологии сочетанием физико-механических свойств [1]. Наиболее распространённой проблемой эксплуатации СВМПЭ являются частицы износа и расслоение материала, вызванные трибоокислением материала [2]. α -Токоферол способен подавлять каскад окисления, что вызывает интерес к его использованию в качестве антиоксидантного наполнителя [3].

Среди различных методов модифицирования полимеров можно выделить сорбционное модифицирование, позволяющее равномерно распределить модификатор в полимере. Изучение закономерностей физико-химического взаимодействия модификаторов с полимерной матрицей, влияния на процессы формирования композитов, позволит управлять служебными свойствами материалов.

В данной работе экспериментально определены параметры предельного значения сорбции и константа сорбции α -токоферола СВМПЭ медицинского назначения марки GUR 1050 (Celanese).

Материалы и методы. В качестве адсорбента выбрали СВМПЭ марки GUR 1050 со средней молекулярной массой $5,0 \times 10^6$, синтезированного с использованием металлоценовых катализаторов с высокой степенью полимеризации. Распределение частиц полимера по размеру находится в интервале 150–200 мкм; плотность составляет 0,94–0,95 г/см³, а насыпная плотность – 400 г/л. Данная марка СВМПЭ характеризуется узким распределением частиц по размеру, высокими значениями плотностей и широким диапазоном температур, при которых он способен сохранять свои эксплуатационные свойства, который лежит в интервале от –260 до +120 °С. Благодаря низкому содержанию побочных продуктов синтеза и остатков катализатора он обладает высокой биосовместимостью, низкой цитотоксичностью и широко используется для изготовления различных медицинских изделий, в т.ч. в качестве материала вкладыша суставных эндопротезов.

Исследования процессов сорбции α -токоферола проводили из водно-спиртового раствора на высушенных образцах СВМПЭ. Во всех случаях навеску

образца массой 0,5000 г погружали в 50,00 мл модельного раствора α -токоферола (> 99,9 %; Sigma, США) в центрифужных пробирках и выдерживали при заданной температуре и времени, периодически перемешивая растворы. Затем растворы отделяли от осадка, центрифугируя их при скорости вращения 3000 об/мин в течение 15 мин. Раствор декантировали и сразу же определяли в них остаточную концентрацию α -токоферола.

Количественное определение α -токоферола осуществляли фотометрически в кварцевых кюветках ($l = 1$ см) при длине волны 340 нм. Погрешность в определении не превышает 0,5—1 %.

Обсуждение результатов. На рисунке 1 представлены результаты исследования адсорбции α -токоферола СВМПЭ. Представленная изотерма соотносится к III типу изотерм по классификации ИЮПАК и характерна для более слабого адсорбат-адсорбент взаимодействия в сравнении с адсорбент-адсорбент взаимодействием.

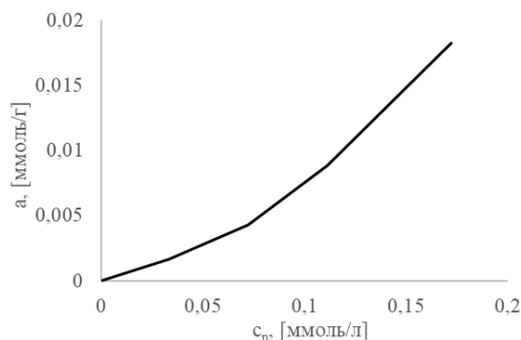


Рис. 1. Изотерма адсорбции α -токоферола на СВМПЭ

Используя модель БЭТ, мы определили значения параметра предельного значения сорбции и константы сорбции α -токоферола СВМПЭ, составившие, соответственно $a_m = 0,0925$ ммоль/г, $C = 1,439$.

1. Kurtz S.M. The UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices. – Second Edition. — Burlington: Academic Press. — 2009
2. Carlsson D.J., Chmela S., and Lacoste J. On the structures and yields of the first peroxy radicals in gamma-irradiated polyolefins // Macromolecules. — 1990 (23), no. 23, 4934—4938
3. Gaziano J.M., Manson J.E., and Hennekens C.H. 13 Natural antioxidants and cardiovascular disease: observational epidemiologic studies and randomized trials // Nat Antioxidants Hum Heal Dis. — 1994, 387—409

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОМЕРНЫХ 1,3-ДИЗАМЕЩЕННЫХ 5-ИМИНОТЕТРАЗОЛОВ

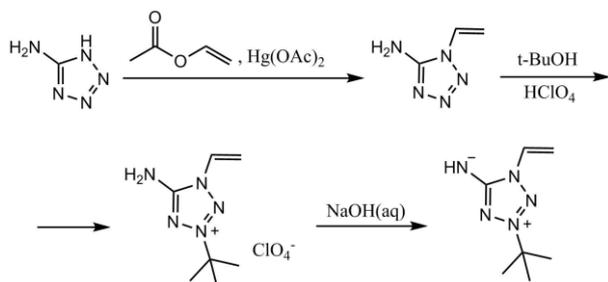
Ю.М. Юркова^{1,2}, Ю.В. Григорьев³¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; yu.m.yurkova@gmail.com³Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ, Минск, Беларусь

Введение. Мезоионные производные тетразола перспективны в качестве энергоёмких и флуоресцирующих материалов, прекурсоров для синтеза биологически активных веществ, ионных жидкостей [1, 2]. Однако мезоионные тетразолы, содержащие реакционно-активные функциональные заместители, в литературе не описаны. Неизвестны также и полимеры, содержащие в составе макромолекулы мезоионные тетразольные фрагменты. В связи с этим разработка методов синтеза и изучение физико-химических свойств новых мезоионных тетразолов, включая полимерные, представляются весьма актуальной задачей.

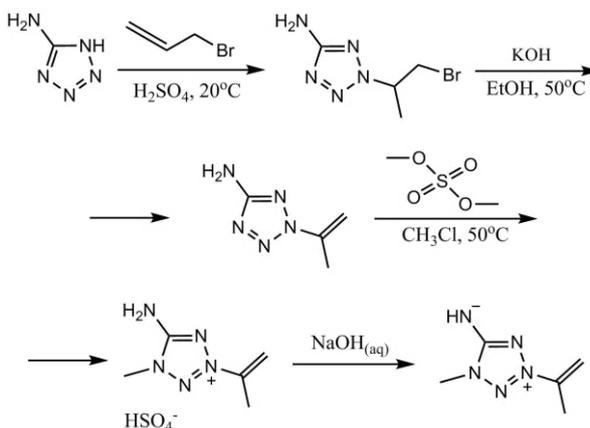
Цель. Разработать подходы получения мезоионных тетразолсодержащих мономеров.

Материалы и методы. Спектры ЯМР регистрировали на спектрометре Bruker Avance 500 (США) при рабочих частотах 499,83 МГц (¹H) и 125,70 МГц (¹³C), в качестве растворителей использовали (CD₃)₂SO и (CD₃)₂CO. Для синтетических целей применяли коммерчески доступные растворители и реагенты квалификации не ниже «ч.».

Результаты и их обсуждение. 5-Амино-1-винилтетразол был получен по методике (рис. 1) [3]. Для алкилирования полученного продукта и получения конечного мезоионного соединения был использован подход, описанный в работе [4].

Рис. 1. Схема получения 1-винил-3-*tert*-бутил-5-иминотетразола

5-Амино-2-*изо*-пропенилтетразол был получен из 5-аминотетразола с использованием подхода, описанного авторами работы (рис. 2) [5]. Метилирование с последующей щелочной обработкой позволило получить целевой 1-метил-3-*изо*-пропенил-5-иминотетразол.

Рис. 2. Схема получения 1-метил-3-*изо*-пропенил-5-иминотетразола

Полученные мезоионные 1,3-дизамещенные 5-иминотетразолы склонны самопроизвольно полимеризоваться при хранении, что подтверждает возможность создания полимерных материалов на их основе.

Выводы. Разработаны подходы для получения мономерных мезоионных производных тетразола — 1-винил-3-*трет*-бутил- и 1-метил-3-*изо*-пропенил-5-иминотетразолов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 2.1.01.01 ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия», № г. р. 20210515).

- Osrovskii V.A., Popova E.A., and Trifonov R.E. Developments in Tetrazole Chemistry (2009-16) // Adv. Heterocycl. Chem. : Cambridge. — 2017 (**123**), 1—62
- Zhang O. and Shreeve J.M. Energetic Ionic Liquids as Explosives and Propellant Fuels: A New Journey of Ionic Liquid Chemistry // Chem. Rev. — 2015 (**114**), no. 20, 10527—10574
- Гапоник П.Н., Ивашкевич О.А., Дегтярик М.М. Синтез и комплексобразующие свойства 1-винилтетразола // Изв. Вузов СССР. Химия и хим. тех.-пол. — 1985, № 11, 43—46
- Voitkhovich S.V. [et al.] Endo- and exocyclic N-alkylation of 1- and 5-aminotetrazoles with t-BuOH-HClO₄ synthesis of mono-, di-, and tri-*tert*-butyl substituted aminotetrazolium salts // Tetrahedron. — 2008 (**64**), 8721—8725.
- Voitkhovich S.V. and Gaponik P.N. Selective synthesis of 2-(1-methylvinyl)tetrazoles // Mendeleev Commun. — 1997, 41—42

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 2

Новые многофункциональные полимерные композиты

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2025)

24—27 июня 2025 г., Гомель, Беларусь

ASSESSMENT OF LOCALIZATION EFFECTS DUE TO INHOMOGENEITY BASED ON THE NUMERICAL EQUIVALENT INCLUSION METHOD

Xiaoqing Jin^{1,*}, Kuanyu Liu¹, Zhizhen Jiang¹, Pu Li², and Feodor M. Borodich¹

¹College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing, China; * jinxq@cqu.edu.cn

²School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu, China

Purpose. The existence of impurities or microstructural inhomogeneities in engineering materials can give rise to localized stress/strain concentrations — a phenomenon known as the localization effect [1, 2]. For instance, non-metallic inclusions (including cavities or pores) in metallurgy may act as stress concentrators, triggering localized plastic deformation or crack initiation.

Advancements in Methodologies. Finite Element Analysis (FEA) enables detailed simulation of complex material behaviors but is limited by high computational cost and efficiency-accuracy trade-offs in heterogeneous systems. Experimental methods like scanning electron microscopy provide microstructural insights yet lack controllability and resolution [2]. The Numerical Equivalent Inclusion Method (NEIM) simplifies nonlinear heterogeneity by modeling inhomogeneities as equivalent inclusions. This transformation facilitates efficient elastic field computation and enables fast, reliable analysis of contact behavior in heterogeneous materials.

Theory and Methods. Consider the contact between a rigid spherical indenter and a heterogeneous layered half-space containing arbitrarily shaped inhomogeneities (Fig. 1).

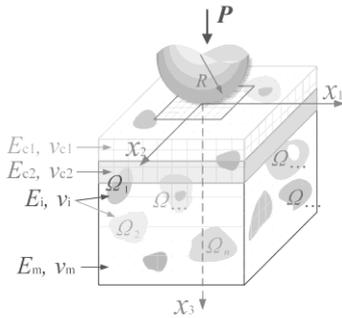


Fig. 1. Heterogeneous half space with embedded inhomogeneities of arbitrary shape under contact loading [2]

The problem above involves both contact and material nonlinearities. The contact nonlinearity arising from contact effects can be addressed using the conjugate gradient method (CGM), while the material heterogeneity introduced by impurities and coatings can be managed through Eshelby’s Equivalent Inclusion Method (EIM). The principle underlying the EIM involves decomposing solutions of an inhomogeneity problem into two distinct components: the homogeneous solution representing uniform material response under contact loading, and the equivalent inclusion solution accounting for inhomogeneity effects. The governing equation of the EIM is

$$C_{ijkl}(\varepsilon_{kl}^0 + \sum_{\chi=1}^2 \varepsilon_{kl}^{\chi} - \varepsilon_{kl}^{\chi*} + \sum_{l=1}^{\eta} \varepsilon_{kl}^l) = C_{ijkl}^c(\varepsilon_{kl}^0 + \sum_{\chi=1}^2 \varepsilon_{kl}^{\chi} + \sum_{l=1}^{\eta} \varepsilon_{kl}^l) \quad (1)$$

for coating

$$C_{ijkl}(\varepsilon_{kl}^0 + \sum_{\chi=1}^2 \varepsilon_{kl}^{\chi} - \varepsilon_{kl}^{\chi*} + \sum_{l=1}^{\eta} \varepsilon_{kl}^l) = C_{ijkl}^*(\varepsilon_{kl}^0 + \sum_{\chi=1}^2 \varepsilon_{kl}^{\chi} + \sum_{l=1}^{\eta} \varepsilon_{kl}^l) \quad (2)$$

for inhomogeneity

where C_{ijkl} , C_{ijkl}^c and C_{ijkl}^* are the elastic moduli of the inhomogeneity, coating and matrix, respectively; the term ε_{kl}^0 the elastic strain corresponding to the solution of a homogeneous material, i.e. contact solution; $\sum_{\chi=1}^2 \varepsilon_{kl}^{\chi}$ ($\chi = 1, 2$) is the strain disturbance caused by the coatings; $\sum_{l=1}^{\eta} \varepsilon_{kl}^l$ denotes the total strain disturbance produced by η inhomogeneities; ε_{kl}^{χ} and ε_{kl}^l represent the strain disturbance induced by the presence of the eigenstrain within coating and inhomogeneity, respectively. Given that the disturbance term ε_{kl}^{χ} and ε_{kl}^l are function of the equivalent eigenstrains, the eigenstrains $\varepsilon_{kl}^{\chi*}$ and ε_{kl}^{l*} are the only unknown to be determined.

Conclusion. In this work, Eshelby’s Equivalent Inclusion Method is reviewed, with the emphasis placed on its numerical implementation. The so called Numerical Equivalent Inclusion Method (NEIM) tends to be robust, and is particularly efficient for quantitatively assessing the localization effect in the vicinity of arbitrarily shaped inhomogeneities, thanks to its seamless integration with the Fast Fourier Transform (FFT) algorithms. Typical applications of the NEIM to contact analyses of heterogeneous materials are presented.

Acknowledgements The research was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52205192 and 12402135), and Opening Fund of State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China).

References.

- Li P., Lyu D., Soewardiman H., Jin X., Wang Q.J., and Keer L.M. Analytical and numerical evaluation of the interaction energy between screw dislocation and inhomogeneous inclusion // *Mechanics of Materials*. — 2021;156
- Liu K., Li P., Yang B., Song H., Borodich F.M., and Jin X. A versatile three-dimensional contact analysis for heterogeneous materials // *International Journal of Solids and Structures*. — 2025;318: 113440.

SUSTAINABLE POLYURETHANE COMPOSITES WITH DYNAMIC BONDS FOR ENHANCED THERMAL ENERGY STORAGE

T. Philas^{1,2,3,4*}, P. Zhang^{1,2,3,4}, P. Ying^{1,2,3,4}, H. Ge⁵, C. Lin², M. Huang², T. Yang^{1,2,3,4}, J. Wu^{1,2,3,4}, T. Wang^{1,4}, A. Ya. Grigoriev^{2,6}, D. Gutsev^{2,6}, N.K. Myshkin^{2,6}, and V. Levchenko^{1,2,3,4}

¹School of Materials Science and Engineering, Taizhou University, Taizhou, China; *E-mail: ptasah@gmail.com

²International Joint Institute of Advanced Coating Technology, Taizhou University, Taizhou, P. R. China

³Wenling Research Institute of Taizhou University, Taizhou, P. R. China

⁴Zhejiang Provincial Key Laboratory for Cutting Tools, Taizhou University, Taizhou, P. R. China

⁵Shandong INOV Polyurethane Co., Ltd. & Shandong INOV New Material Co., Ltd., Zibo, Shandong, China

⁶Metal-Polymer Research Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Purpose. Develop and studies sustainable polyurethane composites with enhanced thermal energy storage capabilities by incorporating dynamic Diels-Alder (DA) bonds for recyclability and either polyethylene glycol (PEG) for shape stability or Halloysite nanotubes decorated with Fe₃O₄ nanoparticles (HNTs@Fe₃O₄) for improved thermal conductivity.

Method. Both research efforts involved the chemical synthesis of polyurethane-based composites incorporating dynamic Diels-Alder bonds. The first study focused on creating shape-stable phase change materials (PCMs) by integrating PEG into the polyurethane network via DA crosslinking. Characterization techniques such as FTIR and DSC were used to confirm the material structure and thermal properties [1]. The second study enhanced thermal conductivity by incorporating HNTs@Fe₃O₄ nanoparticles into a polyurethane matrix with DA bonds, involves evaluating the thermal properties (phase change enthalpies and thermal conductivity) using DSC and assessing the material's recyclability [2].

Materials. The materials included polyurethane pre-cursors, polyethylene glycol (PEG), and a furan-functionalized crosslinking agent for the Diels-Alder reaction with maleimide groups in the polyurethane. The second study utilized polyurethane pre-cursors with functional groups for DA reactions and Halloysite nanotubes decorated with Fe₃O₄ nanoparticles (HNTs@Fe₃O₄) as a thermally conductive filler.

Results and Discussion. The first study successfully synthesized shape-stable polyurethane/PEG composites with dynamic DA crosslinks, demonstrating their potential as solid-solid PCMs with the added benefit of potential recyclability (Fig. 1).

The thermal properties were dependent on the PEG content, and the dynamic crosslinks ensured shape stability during phase transitions. The second study achieved a significant enhancement in thermal conductivity (101 % increase) in the polyurethane/HNTs@Fe₃O₄ composite with an optimal filler content of 0.5 wt.%, which also exhibited high melting (116.8 J/g) and freezing (127.2 J/g) enthalpies (Table 1). The dynamic DA bonds in this composite enabled reprocessing and potential recycling, contributing to its sustainability.

Conclusion. Both studies successfully demonstrated the fabrication of sustainable polyurethane composites with dynamic Diels-Alder bonds for thermal energy storage. These advancements highlight the versatility of

polyurethane and the effectiveness of dynamic bonds in creating advanced materials for energy-saving and environmentally friendly thermal management applications.

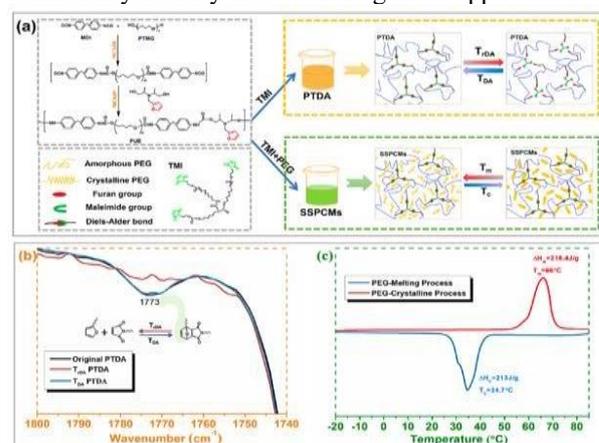


Fig. 1. (a) Schematic illustration for preparation of SSPCMs, (b) thermal reversibility, and (c) phase change mechanism

Table 1. Thermal properties of PEG, PE-DA, and PE-DA/HNTs@Fec

Sample	Melting		Crystallization		Xc (%)
	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	
PEG	60	212.2	33.8	212.8	100
PE-DA	48.97	105.9	15.97	115.1	61.17
PE-DA/HNTs@Fe ₃ O ₄ -0.5	48.84	116.8	18.09	127.2	67.80
PE-DA/HNTs@Fe ₃ O ₄ -1	48.74	87.9	17.54	98.3	51.28
PE-DA/HNTs@Fe ₃ O ₄ -3	48.26	97.9	19.31	104	58.25
PE-DA/HNTs@Fe ₃ O ₄ -5	48.39	91.3	16.59	100	55.37

Acknowledgement. The authors gratefully acknowledge funding for this project provided by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China under Grant Nos. LTZ20E020001 and LQ 22E010007, the Foundation of Zhejiang Educational Committee Grant No. Y201738304, and the open fund of the Zhejiang Provincial Key Laboratory for Cutting Tools under Grant No. ZD202104.

- Changhong L., Huan G., Puyou Y., Tianle W., Min H., Ping Z., Tao Y., Jianbo W., and Vladimir L. Synthesis and Properties of Dynamic Crosslinking Polyurethane/PEG Shape-Stable Phase Change Materials Based on the Diels-Alder Reaction // ACS Appl. Polym. Mater. — 2023 (5), 4190–4198
- Changhong L., Puyou Y., Min H., Ping Z., Tao Y., Gang L., Jianbo W., and Vladimir L. Processable and recyclable

polyurethane/ HNTs @ Fe₃O₄ solid–solid phase change materials
with excellent thermal conductivity for thermal energy storage //
Polym. Com-pos. — 2021 (42), 6816–6826

MODIFYING DIELECTRIC PROPERTIES OF FLUORINATED POLYIMIDE NANOCOMPOSITES WITH FUNCTIONALIZED CARBON NANOTUBES

Baode Zhang¹, Evalds Pentjuss², Juris Bitenieks³, Janis Kleperis², and Andrey N. Aleshin⁴

¹Liaoning Petrochemical University, Fushun, China, e-mail: zhangbaode@lnpu.edu.cn

²University of Latvia, Riga, Latvia

³Riga Technical University, Riga, Latvia

⁴Toffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Due to the unique chemical structures of polyimides (PI), such as five-membered imide rings with high polarizability in the aromatic backbones and the charge transfer complexes, polyimides show promising dielectrics. Unfortunately, continuous efforts on the neat polyimides have been conducted to tailor the dielectric performance with low dielectric loss by designing chemical structure to meet the diverse requirement of the versatile application without success. One of the effective approaches to modifying the dielectric properties is introducing nanofiller, such as carbon nanotubes (CNT) [1]. Due to the CNT and PI exhibit different electric behavior, different permittivity and/or conductivities, Maxwell-Wagner-Sillars (MWS) process can be observed at the interface between CNT and PI of their nanocomposite structures. This study provides a new route to improve the dielectric constant as well as reducing dielectric loss resulted from the compromise between orientational polarization and MWS polarization by tailoring nano-architecture at the interface of CNT and PI [2]. An aromatic polyimide (PI) with rigid benzoxazole ring and bulky trifluoromethyl (-CF₃) side groups has been synthesized as the matrix for two step in-situ polymerized carbon nanotube (CNT) reinforced nanocomposites. Dielectric spectroscopy and molecular dynamic simulation were carried out to gain insights into the molecular mechanism determining their dielectric constant and dielectric loss. The effect of the nature of interfacial nano-architecture on the dielectric permittivity of polyimide (PI) by incorporating the same concentration of 0.5 wt. % CNT and 0.5 wt. % COOH-CNT is investigate in the frequency range of 0.01–10⁶ Hz at room temperature as neat PI under control. Surprisingly, at the same concentration 0.5 wt. %, nanocomposite of CNT-COOH exhibits near twice higher polarization (dielectric permittivity) than that of nanocomposites with pristine CNT. In addition, a significantly lower dielectric loss of CNT/PI nanocomposites compared to both neat PI and COOH-CNT/PI nanocomposites ranging from 0.01 up to 10⁵ Hz at room temperature were found. The tg (δ) versus frequency for pure PI sample, and with 0.5 % additive of CNT, and CNT/COOH is shown in the Fig. 1. The reason behind these findings is attributed to the dominant polarization mechanism changing from orientational polarization caused by polarizable units in PI host to interfacial polarization resulting from CNTs being introduced into PI matrix. That is, orientational

polarization compromise with interfacial polarization due to CNTs being introduced to PI host. The introduction of CNTs interrupt the close packing of PI chain resulting in an increased free volume in a concerned molar volume to a significant extent, while they cause polarizable interface MWS with amorphous PI [2]. COOH grafted to CNT further enhance the MWS effect by tailoring the region of interfacial nano-architecture with polarizable COOH (or C=O) groups between CNT and PI chain by close packing. This study gain the insight into combining of different types of polarization to modify dielectric constant and dielectric loss by tailoring the nano architecture, and it also provides a new route to obtain the desired dielectrics to meet the diversified requirement ranging from microelectronic to energy storage capacitor.

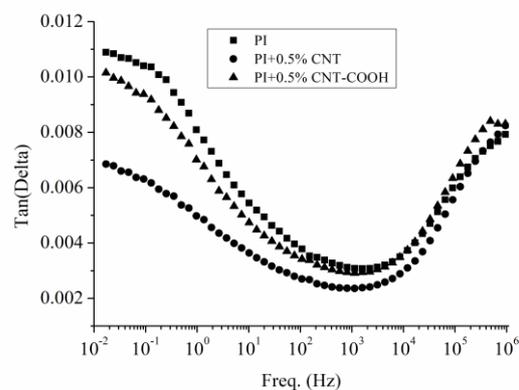


Fig. 1. Tg (δ) versus frequency for pure PI sample, and with 0.5 % additive of CNT, and CNT/COOH

Acknowledgements

The research was supported financially by by China oversea scholarship (no. 201508210267, no. 202408210340), and DAAD supported Baltic-German University Liaison Office Project no. 2017/8.

References

- Ricardo Pérez. Prediction of the effective dielectric constant in SWNT polyimide nanocomposites using the Bruggemann model // *Journal of Applied Polymer Science*. — 2009 (113), no. 4, 2264—2270
- Samet M., Levchenko V., Boiteux G., et al. Electrode polarization vs. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of materials: Characteristic frequencies and scaling laws // *Journal of Chemical Physics*. — 2015 (142), no. 19, 2027—2037

ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ АЛМАЗНЫХ ЗЁРЕН НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АЛМАЗНЫХ ОТРЕЗНЫХ КРУГОВ

В.Е. Бабич

Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск, Беларусь; babich83@mail.ru

Эффективность алмазобразивной обработки, в том числе и экономическая достигается в определённом диапазоне режимов обработки, т.е. режиме «самозатачивания», когда изнашивание связки алмазосодержащего композиционного материала протекает со скоростью достаточной для поддержания определённой концентрации алмазных зёрен на её поверхности, вместо разрушенных и выкрашившихся, что в свою очередь обеспечивает постоянные значения режущей способности инструмента [1]. Эти режимы коррелируют с характеристиками алмазосодержащего материала (концентрацией алмазных зёрен, твёрдостью связки, коэффициента трения, алмазодержания и т.д.), которые в ряде случаев определить затруднительно.

Существуют условия в которых экономическая эффективность алмазных отрезных кругов не является приоритетным перед производительностью обработки и универсальностью инструмента – его способностью обрабатывать несколько материалов: бетон, железобетон, сталь, чугун и композиций на их основе. Область таких условий – спасательные работы при ликвидации чрезвычайных ситуаций, когда от оперативности действий спасателей зависит жизнь людей, а также объёмы повреждённого имущества [2].

Так как бетон является композиционным материалом, в котором связующим являются цементная основа и наполнители, размеры и состав которых варьируются в широких диапазонах, то и режимы его обработки будут различаться, несмотря на то, что результирующим механизмом его изнашивания являются хрупкое разрушение.

Перемещение режущей кромки в бетоне приводит к возникновению напряжений сжатия, деформации и образованию в бетоне микротрещин, и затем разрушение на отдельные частицы. Слой, расположенный под зерном, деформируется под действием высокого давления. Последующие снижение давления при разгрузке приводят к формированию сети микротрещин и разрушению дефектного слоя бетона, и множественным сколам. В области режимов обработки с малыми нагрузками (малые подачи и нагрузки) возможно пластическое перемещение материала, о чем свидетельствует гладкая поверхность царапин. Увеличение нагрузок на обрабатываемую поверхность приводит к образованию боковых и радиальных трещин, разрушению образовавшегося трещиноватого (дефектного) слоя.

Выполнены исследования влияние концентрации алмазных зёрен в алмазосодержащем композиционном материале на режущую способность инструмента. В качестве алмазного инструмента использовались алмазные отрезные круги 1A1RSS/C1 BY-5 350x3,2/2,2x15x25,4x11,5-21, концентрация алмазных зёрен марки AC-160 фракции 630–800 мкм в алмазосодержащем композиционном материале составляла 25, 50, 75 и 100 отн. %. В качестве связок использовались композиции на основе Fe-Ni-Cu-Sn и Fe-Cu-Co. В качестве обрабатываемого материала использовалась плита (400×400×100 мм) из железобетона. Обработку проводили на абразивно-отрезном станке модели Marta INOX 150LX SAPlus на предприятии ООО «Бел Ди-Стар».

Повышение концентрации алмазных зёрен в алмазосодержащем композиционном материале сегмента, означает и увеличение количества единичных инструментов, участвующих в процессе резания железобетона. Очевидно, что это повышение должно приводить к увеличению производительности и мощности резания, однако производительность резания алмазного отрезного круга возрастает, а мощность снижается. Такое несоответствие, может иметь место в случае, когда мощность и производительность резания являются вторичными факторами, а преобладающим – фрикционное взаимодействие связки и алмазных зёрен как с бетоном, так и с арматурой. Концентрация алмазных зёрен в алмазосодержащем композиционном материале сегмента определяет не только количество единичных инструментов участвующих в процессе резания (изнашивания) но и условия фрикционного контакта связки с обрабатываемым материалом, которые влияют на эксплуатационные показатели алмазного отрезного инструмента.

Увеличение концентрации алмазных зёрен в алмазосодержащем композиционном материале позволяет снизить ударные нагрузки на алмазные зёрна, изменить механизм их изнашивания и увеличить длительность цикла резания единичного зерна. Тем не менее, увеличение концентрации алмазных зёрен в связке не позволяет изменить механизм изнашивания алмазосодержащего композиционного материала (сегмента).

1. Инструменты из сверхтвёрдых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки: монография / В.И. Лавриненко, В.Ю. Солод. — Каменское: ДГТУ. — 2016
2. Konstanty J. Cobalt as a Matrix in Diamond Impregnated Tools for Stone Sawing Applications. — AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2nd Edition. — 2003

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ

А.Л. Башлакова

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; bashlakova.anna@mail.ru

Для полимеров, в том числе политетрафторэтилена (ПТФЭ), свойственна вязкоупругость, которая проявляется в виде релаксации напряжений, в ходе эксплуатации при нагружении. Вследствие деформации в теле детали возникает напряжение, которое в случае высокоэластических материалов со временем постепенно уменьшается, если величина деформации остаётся постоянной. Изучение релаксационных свойств материалов имеет важное значение для разработки уплотнительных и герметизирующих элементов, т.к. важнейшими факторами герметизации для контактных уплотнений является уменьшение зазоров в соединениях и предотвращение релаксации напряжений [1].

В режиме релаксации, в ходе принудительного деформирования образца возникают избыточные напряжения, обусловленные сопротивлением кристаллической решётки материала. После достижения заданной деформации начинается выдержка до стабилизации напряжений – собственно, релаксация. Критерием стабилизации (окончания релаксации) является постоянная скорость снижения напряжений, соответствующая окончанию упругой релаксации и переходу к релаксации ползучести.

Цель работы — изучить влияние содержания модифицированных углеродных волокон (УВ) на вязкоупругие свойства композиционных материалов на основе ПТФЭ.

Материалы и методы.

Объектом исследования являлись композиционные материалы с матрицей из ПТФЭ, армированной измельчёнными углеродными волокнами на основе вискозной технической нити. Порошок ПТФЭ марки ПН ГОСТ 10007–80 ОАО «Галополимер» (г. Пермь, Россия); углеродные волокна марки «Белум». Длина волокна 150–200 мкм. Анализ размеров измельчённых углеродных волокон с учётом граничных условий осуществляли с помощью разработанной компьютерной программы «Fiber Scout».

Композиционные материалы получены смешением и прессованием порошка ПТФЭ и измельчённых углеродных волокон с последующим спеканием.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены кривые релаксации напряжения образцов композитов с разным содержанием УВ, деформированных на 5 %. Кривые релаксации в координатах напряжение-время разбиваются на два участка, отвечающих двум периодам релаксации. Первый период, длительностью до 3 минут, характеризуется резким падением напряжения. Второй период релаксации, длительность которого намного больше первого (3 часа), характеризуется низкой скоростью падения напряжения: релаксационная кривая на этом участке при большой длительности испытания приближается к оси абсцисс.

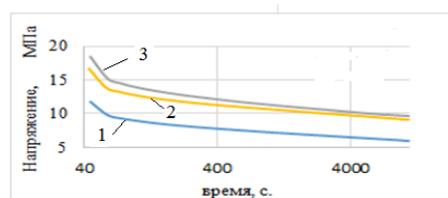


Рис. 1. Зависимость напряжения при сжатии от времени, при постоянной деформации 5 % для образцов с различным содержанием УВ: 1 – ПТФЭ; 2 – ПТФЭ+7 мас. % УВ; 3 – ПТФЭ+10 мас. % УВ

Скорость падения напряжений в образцах не одинакова на двух участках кривых релаксации. Для композитов до 5 мас. % наполнения УВ скорость падения напряжения на первом участке составляет 1,74 МПа/мин., на втором участке 0,13 МПа/мин. При увеличении содержания УВ до 7 мас. % УВ скорость падения напряжения на первом участке увеличивается до 2,51 МПа/мин, а с увеличением наполнения до 10 мас. % скорость падения напряжения растёт уже и на втором участке релаксации и становится равной 0,22 МПа/мин.

Таким образом, вязкопластические свойства ПТФЭ-композита начинают проявляться сильнее при содержании 7 мас. % УВ на первом участке релаксации напряжений, а при 10 мас. % УВ – на всей релаксационной кривой.

Литература

1. Пинчук Л.С. Герметология. — Минск: Наука и техника. — 2002, 117—119

ПОЛИМЕРНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВЕТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А.А. Бойко, Е.Н. Подденежный, Н.Е. Дробышевская

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;
boiko@gstu.by

Цель: формирование полимерно-кристаллических композитов на основе полиэтилена ПЭВД и иттрий-алюминиевого граната, активированного церием $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ (YAG:Ce) для преобразователей излучения синих светодиодов в белый свет [1]. Наноструктурированные порошки YAG:Ce были синтезированы методом термохимических реакций (горения) с использованием в качестве горючего смеси карбамида и гексаметилентетрамина [2].

Материалы и методы. Для получения люминесцентного ультрадисперсного порошка $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ использовали азотнокислые соли иттрия, алюминия и церия $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$; $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$; $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$; карбамид – CH_4N_2O и гексаметилентетрамин $(CH_2)_6N_4$ (ГМТА) в качестве дополнительного горючего. Для изучения физико-химических, структурных и люминесцентных свойств синтезированных материалов были использованы методы рентгенофазового анализа (РФА) (дифрактометр ДРОН-7), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (микроскоп TESCAN, Чехия). Спектры люминесценции регистрировались с помощью спектрофлуориметра СДЛ-2 при комнатной температуре

Результаты и их обсуждение. Азотнокислые соли и карбамид растворяли в дистиллированной воде, затем добавляли ГМТА. Полученный раствор помещали в термостойкую чаше в сушильный шкаф с температурой 80–100 °С и концентрировали до состояния вязкого геля (1,5–2 часа). Далее закрывали чашу алюминиевой фольгой с отверстиями и ставили в муфельную печь, нагретую до температуры 350 °С. В печи под воздействием быстрого нагрева проходит бурная химическая реакция окисления–восстановления, инициируемая ГМТА. Прекурсор выдерживали в печи при 650 °С в течение 1 часа. За время выдержки удаляются остаточные молекулы воды, выгорают органические остатки и после остывания печи формируется пенообразный губчатый продукт ярко жёлтого цвета [2]. Агломераты подвергаются размолу в планетарной мельнице в течение 15 мин

Данные анализа РФА-спектров говорят о том, что в процессе горения формируется кристаллическая фаза – $Y_3Al_5O_{12}$ пространственной группы Ia3d (PDF № 33-40 по каталогу JCPDS-1996). Средний размер области когерентного рассеяния частиц (условный диаметр D) составляет 45,3 нм для

порошка YAG:Ce, прокалённого при 1100 °С.

Плёночные образцы полимерно-кристаллических композитов в виде дисков толщиной 1,0 мм формовали методом горячего прессования из смеси полиэтилена высокого давления ПЭВД и люминесцентного порошка с разной концентрацией. Наполнитель в композите составлял 10, 20, 30 % от общей массы.

Полимерно-кристаллические оптические композиты при возбуждении синим светом люминесцируют в широкой полосе в диапазоне 500 – 700 нм с центром на 570 нм (жёлтое излучение). Увеличение концентрации порошка YAG:Ce в составе композита от 10 до 30 мас. % приводит к росту интенсивности излучения в несколько раз (рис. 1).

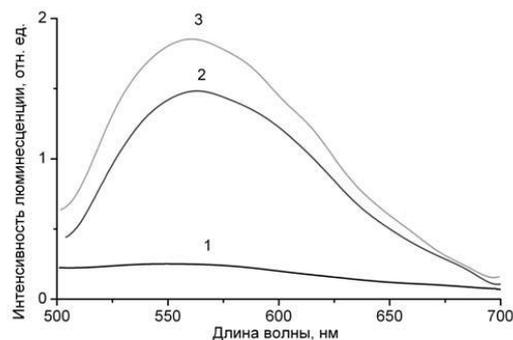


Рис. 1. Спектры люминесценции полимерно-кристаллического светопреобразователя: 1 – 10%; 2 – 20%; 3 – 30% YAG:Ce

Полимерно-кристаллические композиционные материалы, наполненные наноструктурированным порошком иттрий-алюминиевого граната, могут быть использованы для создания светопреобразователей плоских источников белого света, возбуждаемых матрицами светодиодов синего цвета излучения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.2 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Фотоника» на 2021–2025 гг.

1. Pattison M., Hansen M., Thomson G. [et al]. Solid-State Lighting R&D Opportunities. — 2022. DOI: 10.13140/RG.2.2.16101.47844
2. Способ получения наноструктурированного порошка иттрий-алюминиевого граната, легированного церием: Пат. 22052 Респ. Беларусь, МПК С30В 29/28 // О.В. Давыдова, Н.Е. Дробышевская, Е.Н. Подденежный, А.А. Бойко; 30.08.2018

ЛЕГКИЕ И ТЕРМОСТОЙКИЕ ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПЕНОПОЛИИМИДОВ

Г.В. Ваганов, К.С. Полотнянщиков, В.М. Светличный, Е.Н. Попова, В.Е. Юдин

Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – Институт высокомолекулярных соединений, Санкт-Петербург, Россия; glebvaganov@mail.ru

Полиимидные пены, благодаря своему сверхнизкому весу, огне- и термостойкости, превосходным теплоизоляционным и звукопоглощающим свойствам, радиационной стойкости и низкой диэлектрической постоянной являются перспективными материалами для высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая, авто- и судостроение, электроника и энергетика. Однако механические свойства традиционных полиимидных пен невелики, чтобы удовлетворить требованиям применения в качестве конструкционных материалов. Механические свойства пенополиимидов можно улучшить, увеличив их плотность. Однако малый вес является весьма ценным свойством для применения в аэрокосмической, транспортной и автомобильной промышленности, особо чувствительных к весу. С целью повышения механических свойств пенополиимидов их можно модифицировать путём введения микро- и нанонаполнителей.

Цель. Получение исследования лёгких и прочных композитных материалов на основе пенополиимидов путём модификации их армирующими волокнистыми наполнителями.

Материалы и методы. В работе проведён синтез пенообразующего форполимера в виде тонкодисперсного порошка на основе диангирида 3,3',4,4'-бензофенонтетракарбоновой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида, пенополиимидов и композитов на их основе. Синтез пенообразующего форполимера представлен в нашей предыдущей работе. Для получения пенокомпозита использовали волокнистый наполнитель из полиимидного войлока «Аримид» производства ООО «Лирсот» (Россия). Для повышения свойств пенополиимидных на стадии форполимера вводили одностенные углеродные наночастицы ОСУНТ фирмы OCSIAL (Россия).

Получение пенокомпозитного материала осуществляли в два этапа: на первом этапе получали препрег путём распределения форполимерной композиции в виде тонкодисперсного порошка на полиимидной нетканке с последующим каландрированием при температуре 80–130 °С; на втором этапе формировали непосредственно пенокомпозит путём горячего прессования сложенных в форму препрегов

при температуре 220 °С.

Исследовали структуру, термические и механические свойства пенополиимидных волокнистых композиционных материалов.

Результаты и их обсуждение. Исследование свойств пенокомпозитов показало, что композиты обладают высокой термостойкостью ≈ 550 °С, теплоустойкостью ≈ 260 °С, прочностью на изгиб ≈ 8 МПа при плотности в диапазоне $0,23$ г/см³. Показано, что введение ОСУНТ оказывает упрочняющий эффект на пенокомпозиты при изгибе. Введение углеродных наночастиц в количестве менее 0,2 % в связующие позволяет увеличить прочность и модуль при изгибе пенокомпозитов до 13 МПа и до 260 МПа соответственно (рис. 1).

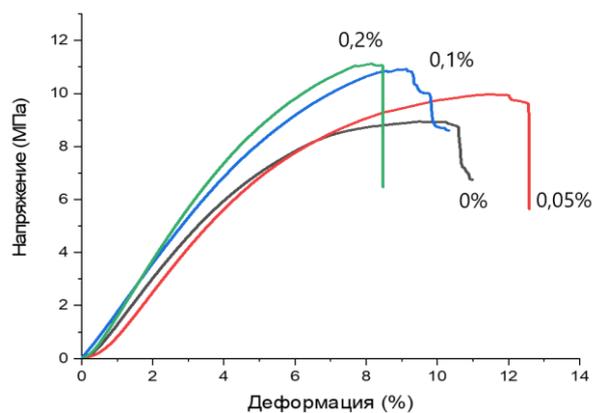


Рис. 1. Деформационные кривые при изгибе пенополиимидных композитов с различным содержанием частиц ОСУНТ

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке за счёт гранта Российского научного фонда № 23-13-20001, <https://rscf.ru/project/23-13-20001/> и регионального гранта Санкт-Петербургского научного фонда.

- Svetlichnyi V., Polotnyanshchikov K., Vaganov G., Kamalov A., Ivan'kova E., Sukhanova T., Ivanov A., Popova E., Myagkova L., and Yudin V. Synthesis and properties of new polyimide foams from foaming compositions with flexible segments of aliphatic diamine // Polym. Eng. Sci. — 2024 (10), 4947—4960

МЕДИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ПОКРЫТИЯ ПРОТЕЗА ДЛЯ ГЕРНИОПЛАСТИКИ

Н.С. Винидиктова¹, Е.Л. Артюшков², Е.Ю. Дорошко²

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

²Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

Введение. В настоящее время операции по поводу грыж передней брюшной стенки составляют четверть всех оперативных вмешательств в мире. Отдалённые результаты при пластике грыж местными тканями характеризовались высокой частотой рецидивов, достигающих 60 % [1]. Такая частота рецидивов привела к внедрению в практику синтетических материалов. Использование сетчатых протезов, в частности, полипропиленовых, при лечении пациентов с грыжами передней брюшной стенки способствует значительному уменьшению частоты рецидивов до 10 % [2]. В то же время, риск инфицирования сохраняется. Известно, что на поверхности макропористых синтетических эндопротезов в условиях бактериальной контаминации *in vitro* в течение 48 часов формируется бактериальная биоплёнка. Одним из способов профилактики раневых осложнений является использование протезов с антимикробными свойствами.

Цель – медико-технические аспекты разработки многофункционального покрытия для полипропиленового сетчатого протеза для герниопластики.

Материалы и методы. Проведён ретроспективный анализ 965 медицинских карт стационарных пациентов (2018–2022 гг.), которым выполнялись ненапряжные герниопластики при грыжах различных локализаций. Проведен анализ полимерных материалов, применяемых в медицине для имплантации, и определён компонентный состав композиционного материала для покрытия. Проведены физико-механические испытания разработанных композиционных материалов. Проведены микробиологические исследования образцов диско-диффузионным методом по отношению к *S. aureus* ATCC 25923 и *E. coli* ATCC 25922.

Результаты и их обсуждение. Ретроспективный анализ показал, что в послеоперационном периоде у пациентов с ущемлёнными грыжами частота осложнений в 10 раз больше, чем у пациентов со свободными и невправимыми, с ущемлёнными послеоперационными вентральными грыжами – в 8,3 раза выше, чем у пациентов со свободными грыжами. Такие пациенты являются группой риска по развитию осложнений в послеоперационном периоде. Кроме того, у отдельных групп пациентов возбудителями инфекционных осложнений являются бактерии, вегетирующие на коже передней брюшной стенки. Существуют дорогостоящие импортные сетки, обладающие антимикробными свойствами.

Таким образом, определены аспекты для разработки модифицирующего покрытия для полипропиленовых сетчатых протезов: обеспечение биосовместимости, защита от инфекций, снижение цены.

Произведён выбор компонентного состава для покрытия по критерию биосовместимости. Экспериментально установлено, что ПВС-хитозановый комплекс удовлетворяет медико-техническим требованиям. Комплекс обладает уникальной структурной организацией для использования его в качестве матрицы для иммобилизации функциональных компонентов. Установлено, что введение в композицию глицерина (Гл) оказывает подавляющее действие на развитие патогенных микроорганизмов (рисунок).



Без Гл Гл(10%) Гл(15%) Гл(20%) Гл(30%)

Рисунок. Образцы композиционного материала с различным содержанием Гл, осеменённые микроорганизмами (30 суток)

Отработана технология формирования покрытия на сетчатом протезе.

Экспериментально установлена оптимальная толщина модифицирующего покрытия (безводного), которая не превышает 0,2–0,5 мм с сохранением функциональных свойств.

Способность комплекса к иммобилизации позволяет вводить необходимое количество лекарственного средства для обеспечения антибактериального эффекта, что подтверждено микробиологическими исследованиями.

Заключение. Анализ проблемы позволил определить основные аспекты для создания модифицирующего покрытия для полипропиленового сетчатого протеза. Определён компонентный состав покрытия, отработана технология его формирования, проведена микробиологическая оценка.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ № М24М-022 и в рамках договора ИММС НАН Беларуси договор № 2/2024.

Список использованных источников

- Алексеев А.К. Осложнения различных способов эксплантации при лечении послеоперационных вентральных грыж // Герниология. — 2006 (3), № 11, 8
- Жуков Б.Н. Оптимизация хирургического лечения больных с ущемленной грыжей брюшной стенки // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. — 2014, № 8, 67—70

БИОЭЛЕКТРЕТНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ПРОТЕЗ КРОВЕНОСНОГО СОСУДА

Н.С. Винидиктова¹, Д.Ю. Дорошко², Е.А. Цветкова¹

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

²Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь; ronaldy93@mail.ru

Введение. Искусственные протезы кровеносных сосудов могут быть инфицированы либо первично во время имплантации, либо вторично – гематогенным, лимфогенным или контактным путём. Нагноение послеоперационных ран обусловлено ослаблением адаптационных возможностей организма, снижением регенерационной способности тканей и их устойчивости к инфекциям, наличием хронических трофических расстройств в связи с длительным анамнезом заболевания [1, 2]. Таким образом, вопрос повышения антимикробной резистентности искусственных имплантатов остаётся актуальным, а одним из решений этой проблемы является использование имплантатов с защитными покрытиями.

Цель – создание биопокрытия для модифицирования протеза кровеносного сосуда, обеспечивающего электретное состояние, ранозаживление и доставку антибиотика для защиты от инфекций в послеоперационный период.

Материалы и методы. В качестве компонентов покрытия использовали поливиниловый спирт (ПВС, ГОСТ 10779, марка М ХЧ), хитозан низкомолекулярный (CAS N 9012-76-4), L-аспарагиновую кислоту (L-Aspartic acid, 200-291-6, CAS N 56-84-8), антибиотик ванкомицина гидрохлорид.

Последовательность технологических операций изготовления композиционного защитного покрытия представлена на рис. 1. Основными операциями являются приготовление в кювете водных растворов компонентов, обработка растворами поверхности вращающегося вокруг оси сосудистого протеза, формирование плёнки, сушка [3].

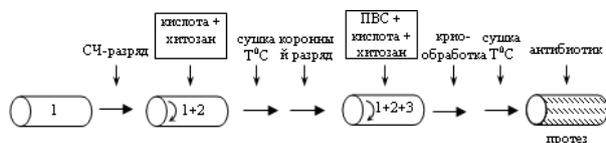


Рис. 1. Схема технологического процесса формирования покрытия на протезе

Для обеспечения смачиваемости, биосовместимости и повышения адгезии покрытия к поверхности импланта применяли обработку протеза в камере установки ВУП-4 сверхчастотной плазмой. Первый слой биопокрытия обрабатывали в коронном разряде отрицательной полярности при комнатной температуре источником высокого напряжения (напряженность поля коронного разряда составляла 20 кВ/см).

Конечным этап формирования покрытия – криообработка.

Оценку функциональной эффективности покрытия осуществляли диско-диффузионным методом по отношению к *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 и гистологическим методом (на лабораторных животных) в соответствии с ГОСТ ISO 10993-6-2011.

Результаты и их обсуждение. На основе гидрогеля разработано двухслойное покрытие, где внутренний, прилегающий к имплантату слой, содержит аминокислотно-хитозановый комплекс и несёт электретный заряд. Внутренний слой не вступает в непосредственный контакт с агрессивной средой организма, сохраняет стабильность и за счёт электростатических сил влияет на кинетику выделения антибиотика из внешнего слоя в операционную рану в течение периода её заживления. Наружный слой содержит комплекс близкого, но более сложного состава (аминокислотно-хитозановый комплекс в сочетании с ПВС, а также антибиотик ванкомицина гидрохлорид в количестве, обеспечивающем защиту от инфицирования).

Гистологическим методом проведен сравнительный анализ эффективности покрытия. Проводили изучение клеточного состава тканей по периферии сосудистого протеза. Отмечено, что на пятые сутки наблюдения воспалительная реакция у животных с образцами биопокрытий была менее выражена в сравнении с образцами без покрытия. Кроме того, выявлено наибольшее количество клеток, формирующих волокна соединительной ткани – фибробластов, т.е. происходит процесс стимулирования заживления.

Заключение. Предложено оптимальное сочетание компонентов для двухслойного биопокрытия и технологическое решение его формирования на сосудистом протезе. Разработанное покрытие обладает комплексом требуемых медико-технических свойств. Микробиологические исследования показали положительный эффект, позволяющий перейти к доклиническим и клиническим исследованиям.

1. Лызиков А.А. Инфекционные осложнения при имплантации сосудистых протезов // Проблемы здоровья и экологии. — 2011, № 4, 75—79
2. Саркисян А.С. Инфекция сосудистых протезов // Вестник хирургии Армении. — 2011, № 1, 23—29
3. Заявка ВУ а20230326. Биоэлектретное двухкомпонентное антимикробное покрытие : заявлено 18.12.2023 / В.М. Шаповалов и др.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА

Е.А. Волгина, Д.Э. Темнов

Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия;
volgina.elena.1999@mail.ru

В работе были исследованы плёнки ПВДФ, коммерческой марки Kureha (Япония) толщиной 9 мкм, степень кристалличности материала составляла около 40 %, содержание полярной β -фазы: $31,5 \pm 1$ %. Плёнки подвергались облучению на циклотронах IC-100 и U-400 в лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова Объединённого института ядерных исследований (Дубна, Россия) ионами $^{22}\text{Ne}^{+4}$ (24 МэВ), $^{132}\text{Xe}^{+26}$ (158 МэВ) и $^{209}\text{Bi}^{+51}$ (670 МэВ). Флюенс для ионов $^{22}\text{Ne}^{+4}$ и $^{209}\text{Bi}^{+51}$ оставался постоянным порядка 10^9 см^{-2} , и варьировался от 10^5 до 10^{10} см^{-2} для $^{132}\text{Xe}^{+26}$.

Плёнки PVDF, облучённые тяжёлыми ионами Xe^{26+} (флюенс 10^9 см^{-2}), травили в водном растворе 10 М КОН и 0,1 м KMnO_4 при 65 °С. После травления мембраны обрабатывали 7,5%-м раствором $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ и промывали в деионизированной воде. Варьируя время травления, получены поры диаметром $21,8 \pm 2,2$; $50,8 \pm 3,2$ и $131,1 \pm 6,2$ нм. Размеры пор определялись методом СЭМ.

Часть образцов поляризовалась в электрическом поле отрицательного коронного разряда при комнатной температуре, напряжённость электрического поля составляла порядка 1 МВ/см.

Пьезоэлектрический модуль d_{33} измерялся динамическим методом с помощью прибора APC.

Экспериментальные результаты. Для изучения влияния технологических параметров изготовления трековых мембран на пьезоэлектрические свойства PVDF была исследована зависимость пьезомодуля d_{33} от заряда ионов и флюенса ионного облучения. Измерения проводились для двух групп образцов — исходных плёнок и поляризованных в поле отрицательного коронного разряда.

На рис. 1 представлена зависимость пьезоэлектрического модуля от заряда ионизирующего иона как для одной, так и для другой группы, на рис. 2 — от величины флюенса ионизирующего облучения.

Рост пьезоэлектрического модуля от заряда налетающей частицы и флюенса может быть обусловлен комплексным влиянием как кинетических, так и термических эффектов, при котором становится возможной ориентация молекулярных диполей вдоль направления воздействия пучка ионов [1].

При последующей поляризации можно заметить эффект суммарного увеличения остаточной поляризации. Для всех исследованных ионов (Ne, Xe, Bi) наблюдается не просто аддитивный, а взаимно усиливающий эффект воздействия.

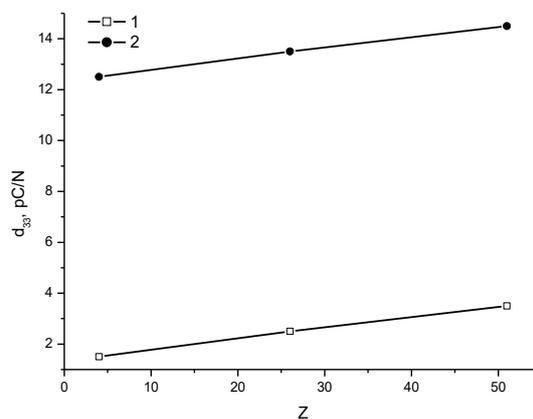


Рис. 1. Зависимость пьезомодуля от заряда тона: 1 – неподверженные дальнейшей поляризации образцы, 2 – подверженные дальнейшей поляризации

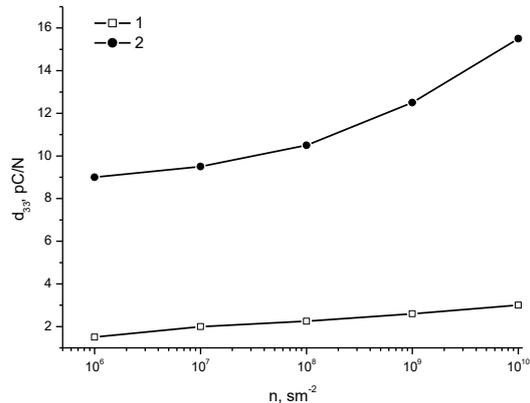


Рис. 2. Зависимость пьезомодуля от флюенса ионизирующего облучения: 1 – неподверженные дальнейшей поляризации образцы, 2 – подверженные дальнейшей поляризации

С увеличением времени травления до 60 минут значение пьезоэлектрического отклика d_{33} экспоненциально уменьшается с 12,5 пКл/Н до 1 пКл/Н. Подобное поведение может свидетельствовать о постепенном исчезновении пьезоактивной фазы в процессе химического травления или же о разориентации полярных структур, происходящей при повышенной температуре травления.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт внутреннего гранта РГПУ им. А.И. Герцена (проект № 87-ВГ)

- Селимов Д.А. и др. Синтез и исследование органо-неорганических композиционных наноматериалов // Химия, физика, биология: пути интеграции. — 2022, 149—149

О ПРИЧИНЕ АНОМАЛЬНО БЫСТРОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПТФЭ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ СО₂-ЛАЗЕРА В ВАКУУМЕ

М.М. Гут

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; gutm@mail.ru

Введение

В работе [1] дано описание процесса лазерной абляции ПТФЭ при действии ИК-излучения СО₂-лазера на блочный ПТФЭ в вакууме. При этом происходит образование волокон ПТФЭ, вытягиваемых из расплава ПТФЭ газовым потоком образующегося мономера ТФЭ. При сравнении с процессом лазерной абляции в вакууме под действием излучения СО₂-лазера для ряда других полимеров было установлено, что скорость лазерной абляции ПТФЭ намного превышает скорость лазерной абляции других полимеров.

Цель

Целью работы является установление причины anomalно быстрой лазерной абляции ПТФЭ под действием излучения СО₂-лазера в вакууме по сравнению с другими полимерами.

Результаты и обсуждение

При нагреве ПТФЭ в вакууме под действием излучения СО₂-лазера происходит термическая деполимеризация ПТФЭ с образованием горячего мономера ТФЭ, поток которого вытягивает волокна из расплава ПТФЭ в кратере абляции. Состав образующегося в вакуумной камере газа примерно на 99 % состоит из ТФЭ. На рисунке 1 приведен фрагмент ИК-спектра ТФЭ, снятого при комнатной температуре [2].

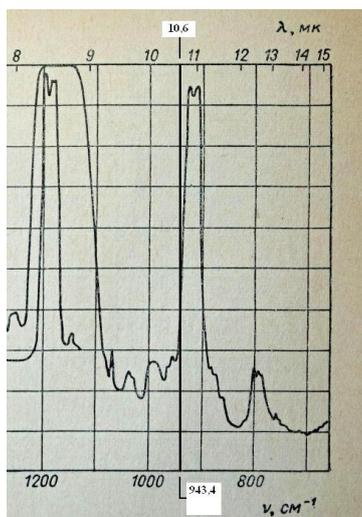


Рис. 1. Фрагмент ИК-спектра ТФЭ

Как видно из ИК-спектра ТФЭ, для длины волны излучения $\lambda = 11$ мкм наблюдается мощный пик поглощения. ИК-излучению СО₂-лазера соответствует длина волны $\lambda = 10,6$ мкм, которой отвечает волновое число $\nu = 943,4$ см⁻¹. Данная длина волны $\lambda = 10,6$ мкм попадает на нижнюю боковую часть пика поглощения ТФЭ. На рисунке 1 длина волны $\lambda = 10,6$ мкм обозначена вертикальной жирной линией.

Как известно из курса физики, при повышении температуры газа происходит увеличение числа столкновений молекул. Это в свою очередь ухудшает возможность для молекул газов свободно вращаться и колебаться, что приводит к некоторым изменениям колебательных и вращательных энергетических уровней. В результате при повышении температуры газов происходит расширение полос поглощения и некоторое увеличение их интенсивности в ИК-спектрах. В результате расширения полосы поглощения горячего ТФЭ при $\lambda = 11$ мкм мы получим, что длина волны излучения СО₂-лазера $\lambda = 10,6$ мкм уже будет полностью попадать на данную расширенную полосу поглощения. Это означает, что горячий газообразный ТФЭ в пузырьках расплава ПТФЭ будет очень эффективно поглощать энергию излучения СО₂-лазера, разогревать путём теплопередачи стенки пузырька, тем самым увеличивая скорость термической деполимеризации ПТФЭ.

Заключение

Причиной anomalно быстрой лазерной абляции ПТФЭ под действием ИК-излучения СО₂-лазера на блочный ПТФЭ в вакууме по сравнению с другими полимерами является эффективное поглощение энергии излучения СО₂-лазера горячим газообразным мономером ТФЭ, образующимся в результате термической деполимеризации ПТФЭ, вследствие совпадения длины волны излучения СО₂-лазера с расширенным пиком поглощения горячего газообразного ТФЭ.

1. Красовский А.М., Толстопятов Е.М., Белый В.А. О механизме деструкции политетрафторэтилена под действием излучения СО₂-лазера. // Докл. АН БССР. — 1984, № 2, 1100—1103
2. Попова Г.С., Тарутина Л.И., Пирожная Л.Н., Фраткина Г.П., Сперанская Т.А., Позднякова Ф.О., Крейцер Т.В., Голденберг А.Л., Зюзина Л.И., Чулановский В.М. Инфракрасные спектры поглощения полимеров и вспомогательных веществ. — М.: Химия. — 1969

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

К.Ю. Зерщиков¹, А.А. Елкин²

¹ООО «Константа-2», г. Волгоград, Россия; director@constanta-2.ru

²Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия

Для подшипников скольжения, также, как и для подшипников качения, различают статическую и динамическую грузоподъемность. Основными аргументами – характеристиками режима и при качении, и при скольжении являются скорость, нагрузка и соотношение скорости с нагрузкой. Соответственно различие между режимами работы подшипников, предельные параметры работы и долговечность определяются соотношением этих величин и опираются на экспертные оценки и опыт эксплуатации.

Для металлофторопластовых подшипников по величине этих параметров статический режим работы подразумевает малые и редкие перемещения при высоких до 400 МПа нагрузках, динамический режим – это средние нагрузки до 150 МПа при постоянной невысокой скорости взаимного перемещения до 0,5 м/с. Это надёжные, но оценочные данные, которые не опираются на теоретическую основу и поэтому не позволяют транслировать их на другие типы подшипников.

В связи с этим, задача расчётного определения предельных параметров работоспособности металлополимерных подшипников скольжения является актуальной.

Чтобы формализовать подход к решению — получить обобщённое решение, вводится трёхслойная структура подшипника скольжения, состоящая из стального основания – подложки, адгезионного слоя, выполняющего связующую роль и антифрикционного слоя, являющегося основным выполняющим основные функции несущим слоем (рис. 1). Это позволяет исследовать расчётными методами разнообразные структуры металлополимерных подшипников.

Однако имеющиеся сложности при аналитическом расчёте задач контактного взаимодействия, дополняются в данном случае необходимостью учёта композитного строения подшипников, а при анализе динамического режима, ещё и учётом динамических процессов. Поэтому решения искали с помощью метода конечных элементов.

Однако рассчитать напряженно-деформированное состояние подшипника под нагрузкой – это необходимое, но не достаточное условие для определения грузоподъемности. Не менее важной задачей является нахождение критериев работоспособности и здесь основным методом её решения является экспериментальное подтверждение.

Конечно-элементная модель. Подшипник скольжения состоит из стальной обоймы поз. 2 с нанесённым на её внутреннюю поверхность через адгезионный подслоя антифрикционным слоем. Обойма вращается вокруг жёстко закреплённой оси поз.1 (рис. 1, а). Для

верификации полученных расчётных зависимостей расчётная модель повторяет схему экспериментального испытательного стенда, позволяющего варьировать нагрузку и скорость взаимного перемещения, а также исследовать подшипники с различными геометрическими характеристиками.

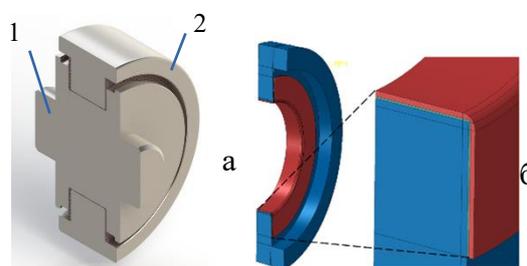


Рис. 1. Структура подшипника скольжения

Для имитации динамической нагрузки расчёт в модели происходит в два этапа, два шага: первый шаг от 0 до 1 – нагружение вертикальной нагрузкой, то есть фактически это статическое нагружение; второй шаг от 1 до 2 – вертикальная нагрузка продолжает действовать, но добавляется вращение подшипника на 180 градусов. Между поверхностями задан контакт тип поверхность-поверхность, исключающий взаимное проникновение элементов модели друг в друга.

Полученные расчётные данные подтверждают ранее установленные факты концентрации напряжений вблизи главного направления нагружения. Кроме того, установлено, что для анализа статической и динамической прочности необходимо оценивать не только действующие напряжения, но и деформации. Обозначены основные характеристики НДС, которые являются критериальными для анализа работоспособности металлополимерных подшипников скольжения. Показано влияние физико-механических характеристик слоёв на статическую и динамическую грузоподъемность подшипников. Показано, что динамическая грузоподъемность напрямую зависит от характеристик адгезионного слоя, тогда как статическая грузоподъемность практически не связана с его прочностью.

Экспериментальные исследования в целом подтвердили справедливость заложенных в расчёт представлений, причём они находятся в хорошей корреляции с упомянутыми выше экспертными оценками работоспособности металлофторопластовых подшипников. Разработанные критерии работоспособности подшипников при динамическом режиме легли в основу расчётов этих подшипников. Таким образом, получены решения для расчёта несущей способности металлополимерных подшипников скольжения в статическом и динамическом режимах работы.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ БОРЬБЫ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ ПРИ РАЗВИТИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

И.К. Кабардин, В.О. Зуев, М.Р. Гордиенко, С.В. Какаулин, В.Г. Меледин,
С.В. Двойнишников

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия;
ivankabardin@gmail.com

Работа направлена на решение фундаментальной научной задачи по поиску оптимальных решений для борьбы с обледенением – одной из основных проблем при развитии энергетических технологий в условиях изменения климата.

В условиях сложных аэродинамических потоков исследована эффективность новых противообледенительных систем на базе защитных ИСГ плёнок с иерархическими размерами нано-структур от 50 нм до 100 мкм, фторполимерных напыленных покрытий, покрытий с поверхностью модифицированных лазерным излучением и покрытиями «Грифтек» на основе фторопласта от ИММС Республики Беларусь.

Проведены экспериментальные исследования образования льда на поверхности модельных участков (в присутствии и без гидрофобных покрытий) при климатических условиях без образования наледи и с интенсивным образованием наледи.

Проведены комплексные исследования и испытания, включающие проверку эффективности исследуемого типа противообледенительной нанопокрываний в климатической аэродинамической трубе. В рабочем участке установки с помощью водораспыливающей системы создавался водокапельный поток холодного воздуха, контролируемый средствами измерений технологических параметров установки, физических характеристик параметров потока и исследуемых моделей.

Проведена серия экспериментов с оценкой геометрии и массы ледового покрытия. Сделана оценка влияния режима работы на обледенение. Исследовано обледенение при постоянной концентрации водных капель в аэрозоле и температуре для скорости набегающего потока 10 м/с в диапазоне углов атаки от 0 до двойного оптимального 16 градусов. Проведено исследование образования льда на поверхности участков лопастей с различными гидрофобными покрытиями при климатических условиях без образования наледи и с интенсивным образованием наледи. Проверена износостойкость к обледенению указанных покрытий и исходного покрытия элемента лопасти. Образцы монтировались на поверхности исследуемой лопасти для обеспечения одинаковости условий экспериментов.

Измерения на стенде искусственного обледенения разделяются на три группы.

1. Съёмка процесса обледенения видеокамерой с последующей обработкой на компьютере. Визуальный контроль параметров потока в темпе эксперимента (скорости и температуры потока, значений

тока и напряжения системы электрообогрева модели, температуры поверхности модели).

2. Измерения физических и технологических параметров (температуры модели, скорости, температуры потока, влажности водовоздушного потока). Запись электронного протокола эксперимента.

3. Проверка износостойкости покрытий.

Была проведена экспериментальная серия из 10 циклов заморозки/разморозки. Водные капли в поток не вносились, а обледенение обеспечивалось конденсацией на охлаждённой лопасти влаги, содержащейся в воздухе.

В дальнейших исследованиях износостойкости покрытий было усилено охлаждение тестовой секции и воздуха путём использования дополнительной охлаждающей установки на основе трубок Ранка. Было проведено 4 цикла заморозки-разморозки при давлении на входе в трубы Ранка в 7 избыточных атмосфер. Водяной спрей вырыскивался с торца, где располагались 4 холодных выхода трубы Ранка. Капли спрея долетали до лопатки и замораживались на ней.

Выполнена адаптация измерительного комплекса на основе метода фазовой триангуляции с применением структурированного освещения и метода на основе полного внутреннего отражения для измерения трёхмерной геометрии наледи на исследуемых экспериментальных участках. Проведены измерения, обработаны и проанализированы результаты. Для решения поставленной задачи разработан алгоритм измерения и калибровки на основе метода фазовой триангуляции. Для учёта отражающих свойств наледи, условий внешнего освещения и обеспечения минимальной погрешности измерения геометрических параметров наледи, разработан программный комплекс для контроля качества работы измерительной системы с текущими параметрами.

Для измерения геометрических параметров наледи в ограниченном объёме требуется подбор параметров измерительной системы, обеспечивающих достижение минимальной погрешности измерения трёхмерной геометрии, а также учёт нарушений прямолинейности траекторий лучей при распространении по тракту источник света-объект-фотоприёмник, вызванных наличием пространственного изолятора экспериментальной области в виде преломляющих прозрачных стенок. Разработан специальный алгоритм калибровки.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 25-79-30002.

ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЁННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ СИСТЕМЫ ПОЛИМЕР – ДИОКСИД КРЕМНИЯ

П.А. Костюкевич, А.М. Кузей, А.В. Францкевич

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;
kostykevich@yandex.ru

Основными методами повышения физико-химических характеристик, эксплуатационных характеристик материалов являются: формирование структур пересыщенных твёрдых растворов (в металлах) и ультрадисперсных (нано-) структур – аналогов структур распада твёрдых растворов в металлах, полимерах, керамике. Структуры, формирующиеся при введении наноразмерных частиц с функциональными поверхностными группами в полимеры, можно рассматривать и как аналоги подобных структур в сплавах, композиционных материалах, обеспечивающих увеличение их физико-химических характеристик.

Объектами исследования являлись композиционные материалы системы полимер – диоксид кремния. В качестве полимера использовали новолачную смолу марки СФП-012А, диоксида кремния – наноразмерный диоксид кремния с удельной поверхностью 300 г/м^2 и размерами частиц 5–20 нм. Концентрация диоксида кремния в композиционных материалах составляла 10 и 20 об. %. Композиционные материалы получали горячим прессованием шихты полимер – диоксид кремния, полученной дроблением компакта после испарения увлажнителя. В качестве увлажнителя использовали этиловый спирт. Температура горячего прессования составляла 430 К, давление горячего прессования 100 МПа. Твёрдость композиционных материалов полимер – диоксид кремния составляла 59 HRB₁₀₀ и 72 HRB₁₀₀. Предел прочности при сжатии 210 МПа и 230 МПа.

Композиционные материалы системы полимер – диоксид кремния имеют аморфную структуру (рис. 1).

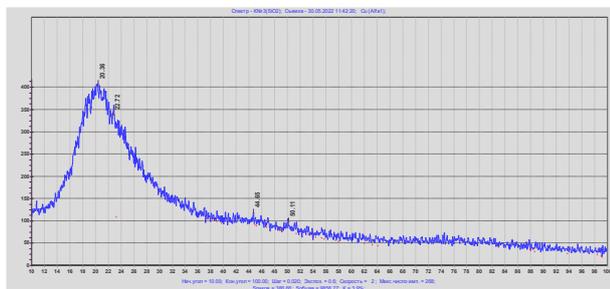


Рис. 1. Рентгенограмма композиционного материала системы фенолформальдегидная смола – диоксид кремния после термообработки при 430 К

Рефлексы от не идентифицированных фаз на рентгенограмме при $20,36^\circ$ и $22,72^\circ$ связаны с продуктами неполного взаимодействия частиц

отвердителя (гексаметиленetetрамина) с фенолформальдегидной смолой.

Морфологии разрушенных поверхностей композиционных материалов системы фенолформальдегидная смола – диоксид кремния представлены множеством округлых выступов (рис. 2).

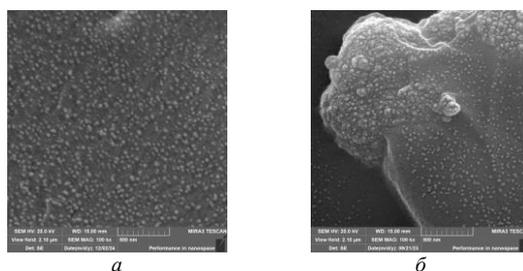


Рис. 2. Морфологии разрушенных поверхностей композиционных материалов системы фенолформальдегидная смола – диоксид кремния. Концентрация диоксида кремния в композиционных материалах: а – 10 об. %; б – 20 об. %

Нагрев композиционных материалов сопровождается экзоэффектами при 160°C . На термограмме композиционного материала с 20 об. % диоксида кремния присутствует и слабовыраженный экзоэффект при 210°C .

Морфологии разрушенных поверхностей композиционных материалов позволяют судить об их микроструктуре: композиционные материалы представляют собой совокупность глобул, объединённых прослойками полимера. Концентрация диоксида кремния в прослойках меньшая, чем в глобулах. Формирование глобулярных структур в композиционных материалах указывает на сильное межатомное взаимодействие между молекулами полимера и наноразмерными частицами диоксида кремния. Термоэффект при 160°C обусловлен процессом взаимодействия $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ групп гексаметиленetetрамина с OH -группами полимера. Термоэффект при 210°C следует связывать с процессами взаимодействия силанольных ($-\text{OH}$) и силоксановых ($\text{Si}-\text{O}$) групп наноразмерного диоксида кремния с OH -группами фенолформальдегидной смолы. Повышение твёрдости и предела прочности при сжатии композиционных материалов при увеличении в них концентрации диоксида кремния обусловлено двумя механизмами упрочнения материалов: дисперсным – при перераспределении нагрузок с матрицы на частицы и дисперсионным при взаимодействии функциональных групп на поверхности диоксида кремния с функциональными группами фенолформальдегидной смолы.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИИМИДНЫХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ С КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИМИ И ФТОРСОДЕРЖАЩИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

В.Е. Крафт¹, М.Э. Борисова¹, А.М. Камалов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия; Sparta3006@inbox.ru

²Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время нетканые полимерные материалы находят широкое применение в медицине, электротехнике и приборостроении. Полиимидные полотна обладают выраженным электретным эффектом, а также стойкостью к агрессивным средам в широком интервале температур, что позволяет использовать их в качестве фильтров и датчиков в различных условиях окружающей среды.

Цель. Существует необходимость в постоянном увеличении стабильности электретного состояния для повышения ресурса работы электретных устройств, что может быть достигнуто введением наполнителя в полиимидную матрицу [1].

Материалы и методы. В данной работе изучалась стабильность электретного состояния в композиционных нетканых полотнах, полученных методом электроформования из водных растворов триэтиламмонийной соли полиамидокислоты (СПАК) на основе пиромеллитового диангидрида (ПМ) и 4,4'-диаминдифенилового эфира – (ДАДФЭ). Особое внимание уделялось влиянию природы наполнителя и его концентрации на электретные свойства материалов. В качестве наполнителя использовались нанодисперсный кремнийорганический SiO₂ (Аэросил) и фторсодержащая водная суспензия Ф4-МБ-Д.

Нетканые полотна изготавливались в филиале НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС методом электроформования в установке NANON-1 (Япония). Образцы заряжались в коронном разряде при отрицательной полярности коронирующего электрода. Характеристиками электретного состояния является электретная разность потенциала (U_3) и величина суммарного заряда на единицу площади (q). Измерения параметров электрета осуществлялось методом электростатической индукции. При изучении стабильности накопленного в материалах заряда использовались изотермический ($U_3 = f(t)$) (рис. 1) и термоактивационный ($U_3 = f(T)$) режимы.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что с увеличением концентрации наполнителя (от 0 до 7 %) стабильность электретного состояния возрастает независимо от условий хранения образцов. При этом максимумы спектров токов термостимулированной деполяризации (ТСД) смещаются в область более высоких температур.

Показано, что накопление и релаксация заряда в исследованных образцах обусловлены поляризацией Максвелла-Вагнера. Ранее было установлено, что

заряд накапливается в приповерхностном слое материала, а стабильность заряда существенно зависит от контактных условий электрета с электродами. Релаксация заряда происходит за счёт собственной проводимости диэлектрика. Величина проводимости связана с U_3 соотношением:

$$\gamma = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{U_3} \frac{dU_3}{dt}. \quad (1)$$

Ранее установлено, что нетканый материал имеет диэлектрическую проницаемость равную 1,75. При добавлении 1 % и 5 % SiO₂ величина ε снижается до 1,45 и 1,35 соответственно [2].

Механические свойства нетканого материала (напряжение при разрыве и деформация) снижаются независимо от природы используемых наполнителей.

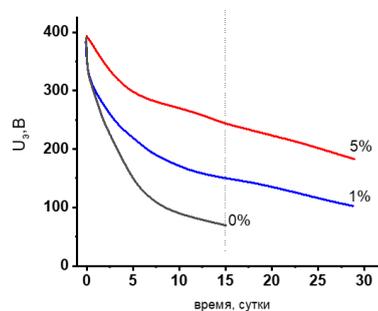


Рис. 1. Зависимость $U_3 = f(t)$ нетканого полиимидного материала с различным содержанием SiO₂

На рис. 1 показано, что при введении в полиимидные нетканые материалы наполнителя SiO₂ значения U_3 на 15 сутки хранения составляют 80 В и 250 В у исходного и композиционного материала (5 %) соответственно.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 23-79-01112, <https://rscf.ru/project/23-79-01112>.

- Erhard D.P., Richter F., Bartz C.B., and Schmidt H.W. Fluorinated aromatic polyimides as high-performance electret materials // *Macromol Rapid Commun.* — 2015 Mar;36(6):520-7. doi: 10.1002/marc.201400638. Epub 2015 Jan 19. PMID: 25598273.
- Kamalov A. et al. Electrospun SiO₂/polyimide materials based on the water-soluble polyamic acid salt PMDA-ODA with an ultralow dielectric constant // *Polymer Engineering and Science.* — 2025. doi: 10.1002/pen.27188.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И МОНТМОРИЛЛОНИТОВЫХ ГЛИН

Н.Н. Лазарева*, А.А. Охлопкова, Ю.В. Капитонова, П.Н. Тарасова

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия; lazareva-nadia92@mail.ru

Современные материалы, обладающие уникальными свойствами, играют ключевую роль в развитии высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая, электронная, химическая и медицинская. Одним из перспективных направлений в материаловедении является создание полимерных композитов, сочетающих в себе преимущества различных компонентов для достижения заданных характеристик. Особый интерес представляют композиты на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) и монтмориллонитовых глин.

Политетрафторэтилен, известный под торговой маркой «тефлон», является одним из наиболее химически стойких и термостойких полимеров. Он обладает низким коэффициентом трения, высокой диэлектрической проницаемостью и устойчивостью к агрессивным средам. Однако его применение ограничено относительно низкой механической прочностью и износостойкостью. Для улучшения этих характеристик в состав ПТФЭ вводят наполнители.

Монтмориллонитовые глины представляют собой природные наноглины, состоящие из слоистых силикатов. Они обладают высокой удельной поверхностью, способностью к межслоевому расширению и улучшению механических, барьерных и термических свойств полимерных матриц. Благодаря своей наноструктуре, монтмориллонит может эффективно модифицировать структуру полимеров, что приводит к созданию композитов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Цель работы: исследование влияния монтмориллонитовых глин на свойства и структуру полимерных композитов на основе ПТФЭ.

Материалы и методы исследования. Материалами для исследования выступали ПТФЭ марки ПН-90 («ГалоПолимер», Россия) в качестве полимерной матрицы, механоактивированная монтмориллонитовая глина, содержащая до 70 %

монтмориллонита (Черкасского месторождения) в качестве модификатора. Для исследования физико-механических характеристик использовали универсальную испытательную машину Shimadzu Authograph AGS-J (Япония) методами ISO 527-2:2012, ISO 604:2002, ГОСТ 9550-81. Трибологические исследования проводили на трибометре CETR UMT-3 (США) со схемой трения палец – диск, где образец в виде цилиндра с размерами ~20*10 мм трётся об стальное контртело в виде диска марки 45 с твёрдостью 45–50 HRC, при нагрузке 2 МПа, скорости скольжения 0,2 м/с, время трения 3 ч. Исследование структуры разработанных полимерных композитов проводили методами ИК-спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Результаты и их обсуждение. В ходе проведения исследования установлено, что введение 2 мас. % механоактивированного монтмориллонита способствует повышению относительного удлинения при растяжении композитов на 37 %, при этом предел прочности при растяжении остаётся на уровне исходного ПТФЭ. Наполнение исходного ПТФЭ природной монтмориллонитовой глиной приводит к значительному снижению скорости массового изнашивания композитов от 65 до 543 раз в зависимости от количества и механоактивации модификатора. Установлены закономерности, определяющие механизмы формирования и последующего функционирования ПКМ, наполненных монтмориллонитом по результатам ИК-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Методом РСА установлено изменение кристаллической структуры монтмориллонита при его механоактивации.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-13-20061.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Д.А. Негров, В.Ю. Путинцев, Е.В. Князев, А.И. Глотов, Д.А. Вебер

Омский государственный технический университет, Омск, Россия; aiglotov@omgtu.ru

Введение. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) благодаря своим уникальным свойствам широко используется в качестве основного компонента антифрикционных композиционных материалов в различных технических областях [1]. Углеродные волокна (УВ), представляющие собой тонкие нити с высокой удельной прочностью и модулем упругости, активно используются в исследованиях и производстве композитов на основе ПТФЭ [2]. Для реализации прочностных свойств углеродных волокон в композите необходимо достижение повышенного взаимодействия между волокном и полимерной матрицей. Повышение степени взаимодействия на границе раздела между наполнителем и полимером может быть реализовано путём применения предварительной химической функционализации наполнителя [3].

Цель работы – исследовать влияние модификации углеродных волокон на комплекс эксплуатационных свойств композиционного материала.

Материалы и методы исследований. В данной работе исследованы образцы композитов на основе политетрафторэтилена марки RX015 (АО «ГалоПолимер»). В качестве упрочняющего наполнителя использовалось молотое углеродное волокно в концентрации 10, 15, 20, 25, 30 мас.%. Испытания образцов на растяжение проводили на разрывной машине Zwick/Roell согласно ГОСТ 11262-2017. Определение трибологических свойств проводили с помощью универсальной машины трения УМТ-2168 по схеме «палец-диск». Морфология поверхности холодного (после выдержки в жидком азоте) скола образцов ПКМ исследовалась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Jeol JSM-5700 в режиме высокого вакуума. Для исследования поверхности углеродных волокон проводили энергодисперсионный анализ (ЭДА) с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра JED-2300.

Перед изготовлением образцов проводилась химическая функционализация углеродного волокна с целью осаждения на поверхности кислородосодержащих функциональных групп, повышающих взаимодействие с полимерной матрицей. Для химической модификации использовалась смесь серной и соляной кислот в соотношении 1:3, длительность обработки составляла 5 суток.

Образцы ПКМ изготавливались по технологическому режиму, включающему процессы предварительной дегидратации компонентов смеси в сушильном шкафу, механического смешения в лопастном смесителе и последующего статического

прессования при давлении в 80 МПа.

Результаты и их обсуждение. На РЭМ изображениях функционализированных углеродных волокон (рис.1) видно, что после обработки поверхности волокон покрыта плотным слоем частиц, образовавшихся в результате химической реакции. Также на поверхности УВ идентифицировано небольшое количество крупных частиц размером от 1 до 10 мкм.

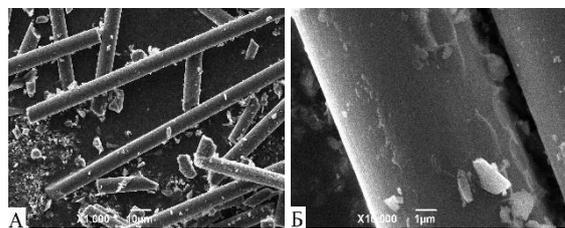


Рис. 1. РЭМ-изображение углеродных волокон после обработки смесью серной и соляной кислот: 1к крат (А), 10к крат (Б)

Результаты ЭДА поверхности УВ, свидетельствуют об однородности проведенного окисления. Максимальное и минимальное значения концентрации кислорода, измеренные на различных участках поверхности, отличаются в 1,2 раза.

По результатам испытаний механических свойств композитов установлено, что по сравнению с исходными углеродными волокнами, применение химически активированных при изготовлении ПКМ позволяет значительно повысить прочность при разрыве до 48 % и модуль упругости до 53 %. Однако также установлено снижение относительного удлинения при разрыве до 32 %, что может быть связано с увеличением жёсткости композита.

При анализе трибологических свойств композитов установлено, что предварительная химическая активация наполнителя не оказывает значительного влияния на изменение износостойкости и коэффициента трения композиционного материала.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ НИР № FSGF-2024-0003.

1. Puts G.J., Crouse P., and Ameduri B.M. Polytetrafluoroethylene: synthesis and characterization of the original extreme polymer // Chemical reviews. — 2019 (119), no. 3, 1763–1805
2. Markova M.A. and Petrova P.N. Influence of Carbon Fibers and Composite Technologies on the Properties of PCM Based on Polytetrafluoroethylene // Inorganic Materials: Applied Research. — 2021 (12), 551–557
3. Sharma M. et al. Carbon fiber surfaces and composite interphases // Composites Science and Technology. — 2014 (102), 35–50

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Омелюсик, А.В. Шмелев

Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;
alexlifting@mail.ru

Введение. Современные тенденции развития техники заключаются в снижении веса силовых конструкций машин и компонентов. Это требует применения новых конструкционных материалов, например, стеклопластиков, превосходящих по своим прочностным, упругим и другим свойствам традиционные материалы [1]. Как правило, стеклопластики состоят из стеклянного наполнителя и синтетического полимерного связующего [2]. Для реализации численного моделирования используются программные средства на основе метода конечных элементов (МКЭ). При этом главным вопросом в процессе практического использования МКЭ является вопрос корректного выбора модели материала и определения соответствующих значений параметров выбранных моделей.

Методические подходы. С целью определения значений параметров моделей материалов тканевых стеклопластиков необходимо выполнить следующие этапы:

1. Провести экспериментальные исследования механических характеристик стеклопластиков с различной ориентацией армирующих волокон;

2. Выполнить компьютерное моделирование натурального эксперимента с учётом полученных при испытаниях свойств материалов;

3. Дать качественную и количественную оценку полученным результатам компьютерного моделирования эксперимента;

4. Выработать рекомендации по дальнейшему использованию полученных значений параметров моделей стеклопластиков.

Апробация методических подходов. Для определения механических характеристик стеклопластиков были проведены испытания на растяжение плоских образцов на основе стеклотканей TP-0,56 и T-10(80) при углах ориентации волокон 0° , 45° , 90° .

В программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA PC была разработана конечно-элементная модель испытательного образца. Для описания свойств стеклопластика на основе ткани TP-0,56 использовалась гомогенная объёмная модель материала MAT_059 COMPOSITE FAILURE SOLID MODEL. Эта модель позволяет имитировать повреждение материала на основе трёхмерного критерия разрушения по значениям растягивающих, сжимающих и сдвиговых напряжений.

Значения механических характеристик стеклопластика, включающие модуль упругости и прочность на растяжение в двух взаимоперпендикулярных плоскостях, приняты по результатам экспериментальных исследований. Недостающие значения механических характеристик приняты по литера-

турным источникам [3]. Одна из захватных частей образца фиксировалась, а другой задавалось перемещение вдоль оси образца, тем самым вызывая его растяжение.

Расчёт выполнен для образцов с ориентацией волокон 0° и 45° . На рис. 1 представлено сравнение разрушения натурального образца и компьютерной модели для образца с углом ориентации волокон 45° .

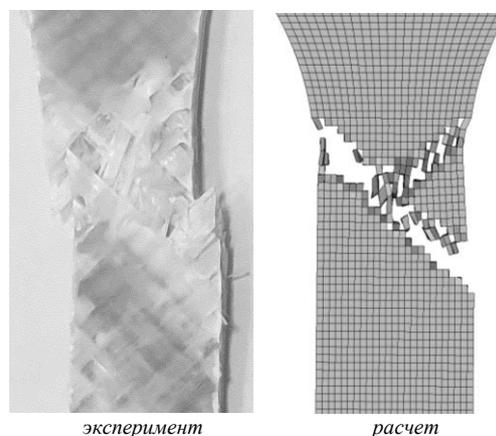


Рис. 1. Разрушение образца стеклопластика из ткани TP-0,56с ориентацией волокон 45°

Как видно из рисунка, в расчётной модели разрушение образца происходит под углом 45° к направлению прикладываемой растягивающей нагрузки, что говорит о качественном соответствии процесса деформирования и разрушения, корректном выборе и задании свойств модели материала в программном комплексе ANSYS LS-DYNA. При этом погрешность расчёта по величине предела прочности стеклопластика составила для образца с углом ориентации волокон 0° – 1,8 %, с углом 45° – 3,0 %.

Заключение. Сформированные и апробированные методические подходы позволяют проводить расчётные исследования более сложных деталей машиностроительных конструкций, таких как кузовов автомобилей, панелей обшивки автобусов, бамперов, внутренней отделки и др.

1. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1). — Томск: Нац. исслед. Томск. политехн. ун-т. — 2013
2. Тулаева Н.Н. Оценка прочности элементов конструкций из хаотически армированного стеклопластика: поясн. зап. к вып. квал. раб. — Челябинск: ЮУрГУ. — 2019
3. Балданов А.Б., Бохоева Л.А., Бочектуева А.С. Моделирование процессов деформирования и разрушения слоистых композиционных материалов при локальном ударе // Динамика механизмов и машин. — 2021 (9), № 6, 2—7

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИИМИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

А.А. Павлов¹, М.Э. Борисова¹, А.М. Камалов², А.Л. Диденко²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия; pavlov_aa@spbstu.ru

²Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – Институт высокомолекулярных соединений, Санкт-Петербург, Россия

Цель. Развитие электротехнической промышленности требует изучения и внедрения новых изоляционных материалов. Для определения возможностей применения нового материала необходимо исследовать его электрофизические свойства: удельную проводимость, электрическую и механическую прочность. Сегодня существенное внимание уделяется полиимидным материалам и композиционным структурам на их основе.

Данное исследование посвящено изучению электрических свойств термопластичных и терморезистивных полиимидов (ПИ). ПИ обладают высокими механическими характеристиками, низкой электрической проводимостью [1], стойкостью к агрессивным средам и повышенным температурам, что позволяет применять их в составе изоляции электрических машин, трансформаторов [2], печатных плат и в качестве защитных покрытий. К недостаткам ПИ можно отнести высокую стоимость, которая может быть снижена при переходе к термопластичным ПИ.

В работе исследуются свойства термопластичных ПИ: импортного А-мФ и отечественного Р-СОД с целью оценки возможности замещения. Для повышения электрической прочности ПИ были получены композиционные материалы на основе ПИ с органическими и неорганическими наполнителями.

Материалы и методы. Плёнки ПИ были изготовлены в филиале ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – Институте высокомолекулярных соединений. Растворы полиамидкислоты (ПАК) получались поликонденсацией смеси диангида и диамина в растворителе ДМАА (диметилацетамид). ПИ плёнки толщиной ~60 мкм изготовлены поливом на стекло 10–20% раствора ПАК.

В дальнейшем образцы подвергались сушке при 60 °С в течение 24 ч. Термическую циклизацию плёнок ПАК проводили на стекле при температурах 100, 200, 300 °С в течение 1 ч. и в течение 15 мин. при 360 °С. На основе матриц Р-СОД и ПМ-ДАДФЭ были синтезированы композиционные материалы с низким содержанием наполнителя (1 мас. %). В качестве наполнителей были выбраны Аэросил и Ф-4.

В ходе исследования материалов были применены следующие методы: динамический механический анализ (ДМА), измерение электропроводности, измерение кратковременной электрической прочности.

Результаты и обсуждение. В данной работе был изучен комплекс электрофизических характеристик ряда термопластичных и терморезистивных ПИ: А-мФ (ULTEM), Р-СОД, ДФО-ДАДФЭ и ПМ-ДАДФЭ (ПМ-1).

Определены температуры стеклования T_g ПИ методом ДМА. Показано, что с увеличением T_g наблюдается рост модуля упругости и снижение тангенса угла механических потерь.

Установлено, что в интервале температур ниже T_g проводимость ПИ не зависит от гибкости цепи макромолекул. Удельная проводимость исследованных ПИ плёнок составляет 10^{-15} – 10^{-12} См/м в температурном диапазоне 25–200 °С.

Определена кратковременная электрическая прочность ПИ при переменном напряжении промышленной частоты (50 Гц). Значения величины $E_{пр}$ составляют от 98 до 220 кВ/мм. Из полученных данных следует, что величина $E_{пр}$ отечественной плёнки Р-СОД выше $E_{пр}$ плёнки А-мФ (ULTEM) на 24 %.

Введение наполнителей (Аэросил, фторопласт) в Р-СОД и ПМ-ДАДФЭ не привело к увеличению кратковременной электрической прочности. Целесообразно продолжить разработку композиционных материалов, варьируя природу наполнителя и его процентное содержание, или провести химическую модификацию молекулы ПИ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания (тема №124013000726-6 «Полимерные и композиционные материалы для перспективных технологий»).

1. Mitsui H., Shiono T., Ushiki M., Sato Y., Ono S., and Murase T. Electrical and mechanical properties of thermoplastic polyimide-insulated coaxial cable for use under high-temperature and radioactive conditions. // *Elect. Eng. Jpn.* — 1995 (115), 12–21
2. Costa C., Lopes P., and Castro J. High-performance thermoplastics obtained by fused filament fabrication: effects of harsh environmental conditions of power transformers // *Prog. ddit. Manuf.* — 2025 (10), 203–218

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЭНДОПРОТЕЗОВ СУСТАВОВ ИЗ СВМПЭ ШАРЖИРОВАНИЕМ В НЕГО ЧАСТИЦ ГУБЧАТОГО ПОРОШКА ТИТАНА

В.В. Савич, Р.П. Голодок, А.М. Тарайкович

Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск, Беларусь;
savich.vadim@gmail.com

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) используется в конструкциях эндопротезов тазобедренных и коленных суставов в качестве вкладышей пар трения. Для обеспечения остеоинтеграции, поверхность компонентов эндопротезов из СВМПЭ должна иметь металлическое покрытие из порошков губчатого титана, между которыми формируются поры, обеспечивающие прорастания в них костной ткани. Для нанесения таких покрытий может использоваться шаржирование. При этом между частицами порошка не происходит образования металлических контактов, но частицы проникают глубоко в СВМПЭ.

Цель исследований – поиск оптимальных параметров шаржирования и разработка технологии нанесения слоя губчатых частиц порошка титана на сферическую наружную поверхность СВМПЭ.

Материалы и методы исследований. Использовали губчатый порошок титана марки ТПП-8 с размером частиц 0,160 мм. Содержание примесей, %, до: Fe – 0,8; N – 0,25; Cl – 0,15. Температура плавления СВМПЭ 135–190 °С, плотность 0,93–0,94 г/см³, модуль упругости 910–980 МПа, предел текучести 20–40 МПа. СВМПЭ использовали в виде сферической заготовки чашки эндопротеза тазобедренного сустава со сферической лункой под головку ножки.

Шаржирование осуществлялось по схеме одноосного одностороннего прессования. Шихта из порошка титана засыпалась внутрь металлической матрицы. Предварительно измерялась масса заготовки из СВМПЭ, которая устанавливалась на слой порошка и подпрессовывалась верхним пуансоном. Затем сборка нагревалась и выдерживалась 30 минут в диапазоне температур 150–190 °С, соответствующему границам перехода СВМПЭ в пластичное состояние. После завершения процесса шаржирования масса экспериментального образца измерялась вновь. Плотность насыщения частицами порошка титана верхнего слоя СВМПЭ определялась исходя из разницы начальной и конечной масс экспериментального образца, площади поверхности и глубины насыщения, которая определялась с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

Результаты исследований и их обсуждение. Параметры процесса шаржирования, при которых возможно формирование покрытия СВМПЭ сплошным, но пористым слоем частиц порошка титана, выбираются следующим образом: давление на слой порошка не должно превышать 10–25 % от предела

текучести СВМПЭ и прикладывается после разогрева матрицы, порошка и СВМПЭ до температур 135–190 °С – перехода полимера в пластичное состояние [1]. На рис. 1 представлен внешний вид полученных по разработанной технологии металлополимерных чашек эндопротеза тазобедренного сустава, а на рис. 2 – СЭМ изображения поверхности слоя порошка титана и микроструктуры его контакта с СВМПЭ.



Рис. 1. Внешний вид металлополимерных чашек эндопротеза тазобедренного сустава

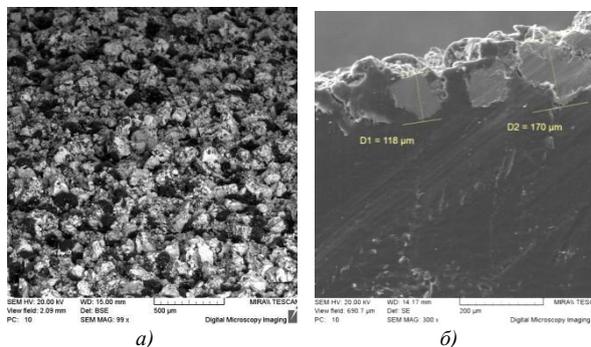


Рис. 2. Внешняя поверхность слоя частиц порошка титана, шаржированных в поверхность СВМПЭ (а), микроструктура внедрения (б)

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Т20КИТГ-005.

1. Способ получения покрытия из порошка титана на компоненте эндопротеза сустава из сверхмолекулярного полиэтилена: Патент РБ 23934 / Голодок Р.П., Савич В.В., Тарайкович А.М.
2. Исследование влияния термомеханических параметров процесса нанесения порошка губчатого титана на сверхмолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) на плотность формируемого слоя и глубину его внедрения / Савич В.В., Голодок Р.П., Тарайкович А.М., Кузнецик О.О. // Порошковая металлургия. — 2021, № 44, 111–116

СРАВНЕНИЕ ФТОРОПЛАСТОВЫХ КОМПОЗИТОВ С РАЗНЫМИ ВИДАМИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

В.А. Шелестова, И.С. Шилько, В.А. Стратанович, В.А. Ломач

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь; sheles_v@mail.ru

Постановка задачи. Углеродные волокна (УВ) являются эффективным наполнителем фторполимеров для получения антифрикционных материалов. Они производятся из разных прекурсоров, существенно отличаясь вследствие этого по поверхностным, прочностным свойствам. Однако сравнительных исследований композитов на основе различных видов УВ недостаточно. Важной задачей также является поиск новых прекурсоров для углеродных материалов.

Цель работы – провести сравнительные исследования композитов на основе ПТФЭ, содержащих разные виды углеродных волокон.

Материалы и методы. Изучались 4 вида УВ, полученных из разных прекурсоров: вискозной технической нити (ВТН), вискозной пряжи (ВП), полиоксидиазола (ПОД), полиакрилонитрила (ПАН). УВ модифицировали методом плазмохимической обработки (ПХО) в низкотемпературной плазме в среде октафторциклобутана (ОФЦБ).

Композиты изготовлены на ОАО «Гродненский механический завод». В качестве матрицы использован фторопласт-4 марки ПН-90 (ГОСТ 10007), в качестве наполнителей – предварительно измельчённые УВ в количестве 17 мас. %. Физико-механические и триботехнические характеристики полученных материалов определяли по методикам [1]. Изучение структуры УВ и композитов проводилось методами РЭМ, КР-спектроскопии, ДТА.

Результаты и обсуждение

Изучено влияние свойств углеродных материалов на свойства композитов (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики УВ

Характеристики УВ	Вид прекурсора для УВ			
	ВТН	ВП	ПОД	ПАН
Массовая доля золы, %	0,6	1,1	3,8	–
Адсорбционная активность по йоду, %	1,0	1,3	1,0	–
Углерод, %	90	89	89	97
Отношение I_D / I_G	3,2	3,3	2,0	0,9
Плотность УВ, г/см ³	1,6	1,6	1,65	1,76
Насыпная плотность, кг/м ³	450	270	410	280

Показано, что УВ отличаются по плотности, термостойкости, форме поперечного сечения филаментов, содержанию углерода, насыпной плотности после измельчения. Методом КР-спектроскопии обнаружены отличия в кристаллической структуре моноволокон из вискозного и полимерного сырья. В КР-спектрах углеродных материалов G-полоса отображает степень кристаллизации материала, D-полоса – неупорядоченность структуры. Отноше-

ние интенсивностей (I_D/I_G) используется для вычисления степени неупорядоченности углеродного материала.

Из исследованных УВ наибольшей плотностью, термостойкостью и кристаллическостью структуры отличаются УВ на основе ПАН. Из вискозного сырья УВ получают средней термостойкости, меньшей плотности. УВ на основе ПОД хрупкие, отличаются пониженной термостойкостью и особенной сетчатой структурой по данным РЭМ.

Сравнение физико-механических характеристик композитов, содержащих изученные виды УВ, показало, что композиты с добавлением УВ ПАН отличаются наибольшей прочностью, модулем упругости, но низким удлинением при разрыве. Образцы, содержащие УВ ПОД имеют самый низкий модуль упругости при сжатии, среднюю прочность, но также низкое удлинение. При использовании УВ из вискозных прекурсоров композит имеет наиболее оптимальный комплекс свойств.

Определено, что более высокие триботехнические характеристики (установившийся коэффициент трения, предельный PV-фактор, износостойкость) показал композит на основе УВ ВТН. Новый вид УВ на основе ПОД позволяет получить композит с удовлетворительными физико-механическими характеристиками, но уступающий остальным по износостойкости.

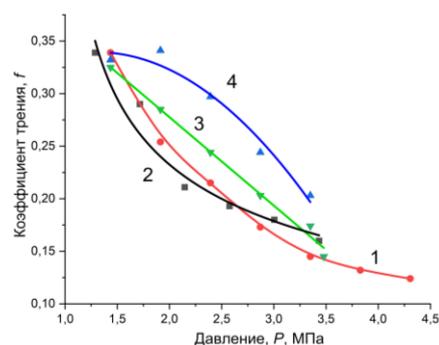


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения f от давления для композитов с УВ ВТН (1), ВП (2), ПОД (3) и ПАН (4)

Изучены поверхности трения методом РЭМ. Показано, что УВ на поверхности трения ведут себя по-разному: УВ ПАН более остальных выступают над поверхностью трения, остальные виды погружены в матрицу, при этом УВ ПОД максимально срезаются, что подтверждает их хрупкую структуру.

1. Шелестова В.А., Гракович П.Н., Шилько И.С., Брундуков А.С., Стратанович В.А., Гуцев Д.М., Иванов Л.Ф. Триботехнические свойства композитов на основе разных марок фторопласта-4 и углеродных волокон // Трение и износ. — 2021 (42), № 2, 121–127

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕН-ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

С.В. Шилько, Т.В. Дробыш, А.П. Сазанков

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Беларусь; shilko_mpri@mail.ru

Введение. Плёнки из фторопласта-40 на основе этилен-тетрафторэтилена (ЕТФЕ) сочетают прочность, эластичность и стойкость к воздействию воды, пыли и УФ излучения в температурном диапазоне $-100...200$ °С. Это обусловило их применение для устройства светопрозрачных фасадов, крыш и павильонов в виде лёгких мембран-подушек. Однако высокая стоимость ЕТФЕ мотивирует оптимизацию толщины плёнки. В этой связи необходимы механические испытания плёнок ЕТФЕ при различной температуре с учётом специфики конструкций мембранного типа, а именно, при одноосном и двухосном напряжённом состоянии.

Цель работы – определение деформационно-прочностных характеристик ЕТФЕ.

Материалы и методы. Испытания на одноосное и двухосное растяжение проводились при температуре 25 °С на образцах размером 200×20 и 250×250 мм соответственно, вырезанных из плёнки ЕТФЕ толщиной 200 мкм. Для определения модуля упругости и прочности при двухосном растяжении выполнялось пневматическое нагружение образца с регистрацией возникающего прогиба [1].

Результаты и их обсуждение. При одноосном растяжении образцов плёнки ЕТФЕ на машине Инстрон 5567 были получены значения прочности $\sigma_p = 26,3$ МПа и относительное удлинение при разрыве ε_p свыше 350 %.

Перед нагружением в условиях двухосного растяжения в камере высокого давления производилось измерение расстояния между меткой в центре образца и чувствительным элементом дальномера. Это расстояние принималось за начало отсчёта вертикальных перемещений, вызванных деформацией плёнки в процессе деформирования. В ходе испытания производилась подача воздуха в камеру и выполнялось синхронное измерение давления и перемещения метки.

На относительно коротком начальном участке нагружения плёнка ЕТФЕ деформировалась упруго без существенных пластических деформаций. С увеличением объёма «пузыря» постепенно развивались необратимые (пластические) деформации пленки и происходило её заметное утонение, скорость которого увеличивалась. По этой причине происходил быстрый рост объёма «пузыря» и замедление роста давления при неизменной подаче воздуха (производительности насоса).

В момент, когда растягивающее напряжение достигало предела прочности плёнки при растяжении, происходило её разрушение. В двух случаях в

образце образовалось отверстие диаметром 2–3 мм. Выход воздуха через такое небольшое отверстие сопровождалось плавным снижением давления. Более масштабное разрушение остальных образцов сопровождалось громким хлопком, образованием крупного отверстия неправильной формы и быстрым падением давления воздуха.

Модуль упругости при двухосном растяжении определяли, исходя из зависимости прогиба тонкой мембраны w от избыточного давления P [1]:

$$P = C_1 \frac{\sigma_0 hw}{a^2} + C_2 \frac{Ehw^3}{(1-\nu)a^4},$$

где P – давление, МПа; σ_0 – остаточные напряжения в плёнке при $P = 0$, МПа; a , h , w – радиус, толщина и прогиб мембраны соответственно, м; E – модуль Юнга, МПа; ν – коэффициент Пуассона; значения коэффициентов C_1 и C_2 зависят от формы мембраны.

На рисунке дана усреднённая зависимость модуля упругости материала плёнки от давления.

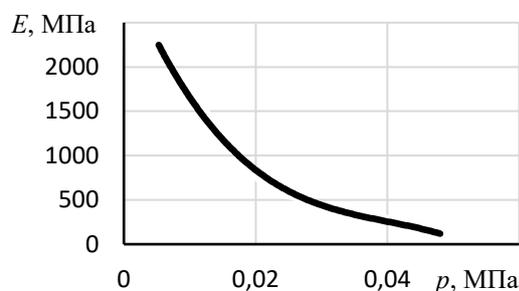


Рис. Зависимость модуля упругости от давления

Заключение. Получены экспериментальные данные о деформационно-прочностных свойствах плёнок этилен-тетрафторэтилена при одноосном и двухосном напряжённом состоянии. Можно сделать вывод о достаточно высоких деформационно-прочностных характеристиках ЕТФЕ. Показана возможность применения плёнки ЕТФЕ толщиной 200 мкм для изготовления мембранных элементов конструкций по критерию прочности и жёсткости при растяжении.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект № Т24-067) и х/д И-93/2024.

1. Обзор методов измерения механической прочности тонких плёнок / В. А. Беспалов [и др.] // Моделирование систем и процессов. — 2022 (15), № 3, 110–128. doi: 10.12737/2219-0767-2022-15-3-110-128

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 3

Трибология и трибоматериаловедение

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2025)

24—27 июня 2025 г., Гомель, Беларусь

APPLICATION OF A PHYSICS-INFORMED NEURAL NETWORK TO INVESTIGATE THE EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON THE PRESSURE DISTRIBUTION WITHIN A THIN LUBRICANT FILM

A. Kovalev^{1,2}, D. Yessimova^{1,2}, Y. Meng³, N.K. Myshkin⁴, J. Wu^{1,2}, and V. Levchenko^{1,2}

¹School of Materials Science and Engineering, Taizhou University, Taizhou, China, e-mail: a.kovalev@tzc.edu.cn

²International Joint Institute of Advanced Coating Technology, Taizhou University, Taizhou, China

³State Key Laboratory of Tribology in Advanced Equipment, Tsinghua University, Beijing, China

⁴Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Purpose. At present, physics-informed neural networks (PINNs) attempt to circumvent the problem of unavailability of experimental data by using only the partial differential equation governing the physical problem and its boundary conditions as information for supervised training [1]. Understanding the influence of surface properties such as roughness or texture on the performance of a lubricated contact is still a challenge in tribology [2, 3]. In our study we have used PINN techniques for estimating the pressure distribution in a sliding lubricated contact by combining the real rough surface data and the averaged Reynolds equation for hydrodynamic flow within a thin lubricant film.

Method of study. The averaged Reynolds equation is a common approach based on a simplification of the Navier-Stokes equations for fluid flow. The simplification takes into account the constant pressure within the thin lubricant film, steady state of motion and deals with two-dimensional distribution of flow velocities and pressure in a plane of contact, and is expressed as follows:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu u \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (1)$$

where u , p and h represent the velocity in x direction, local film thickness and local pressure, respectively. The PINN framework designed especially for estimation of pressure distribution of rough surface in Fig. 1 is shown.

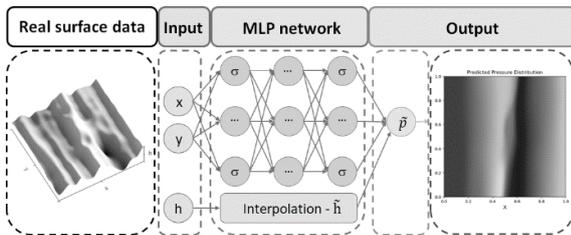


Fig. 1. Simplified scheme of the PINN framework for pressure distribution estimation

A PINN has three inputs. Two are spatial coordinates of the local point (x, y) , the third is height data $h(x, y)$. The spatial coordinates are used as a set of collocations in a multilayer perceptron (MLP) to compute the prediction for a pressure distribution in the form of a non-linear approximation $\hat{p}(x, y) \mapsto \mathcal{N}_p(x, y, \mathbf{W}, \mathbf{b})$. The original height data set $h(x, y)$ was interpolated using a bilinear method in order to obtain a height function $h(x, y) \mapsto \hat{h}(x, y)$ which allowed the local gradients to be calculated by automatic differentiation (AD) for the average Reynolds equation (Eq. 1) used.

Result and discussion. The result of the PINN predicted pressure distribution in a (x, y) plane and cross sections of the height profile and corresponding pressure are shown in Fig.2. The rough surface was captured by a 3D confocal microscope [4]. All spatial dimensions were normalized according to the conventional procedure. The comparative analysis has shown in general that the behavior of the pressure distributions follows the texture morphology of the surface taking into account the obvious effect of the pressure increase in the presence of obstacles in the sliding direction and drops down at the top of asperity.

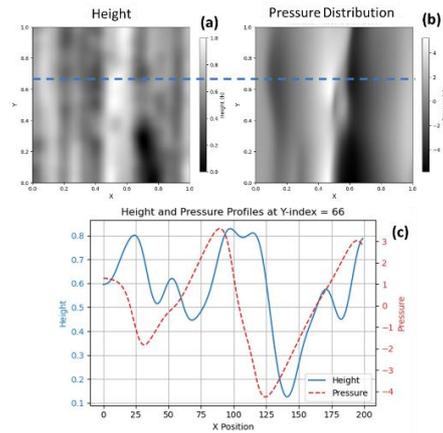


Fig. 2. (a) Real rough surface used as source of height data. (b) The pressure distribution over the rough surface. (c) Cross sections of height profile (solid line) and pressure variation (dashed line)

Summary. This study successfully used a modified PINN neural network to predict the pressure distribution within an irregular thin lubricant film, demonstrating the great potential of machine learning techniques to improve lubrication performance.

1. Vu-Quoc L. and Humer A. Deep Learning Applied to Computational Mechanics: A Comprehensive Review, State of the Art, and the Classics// Comp. Model. Eng. Sci. — 2023 (137), no. 2, 1070—1343
2. Ying P., Lin Ch., Zhang P., Wu J., Yang T., Kovalev A., Myshkin N., and Levchenko V. Effect of Artificial Intelligence on Obtaining Coatings and Materials with Specified Properties. In: Book of abstract IEEE 14th International Conference “Nanomaterials: Applications & Properties” Riga, Latvia, Sept. 8-13. — 2024, 43
3. Gropper D., Wang L., and Harvey, T.J. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings // Tribol. Int. — 2016 (94), 509—529
4. Zhang Y., Kovalev A., and Meng Y. ‘Combined effect of boundary layer formation and surface smoothing on friction and wear rate of lubricated point contacts during normal running-in processes // Friction. — 2018 (6), no. 3, 274—288

ХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ИНДУСТРИАЛЬНОГО МАСЛА НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Ф.А. Григорьев¹, Ю.М. Юркова^{1,2}

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; grigoriev.feodor@gmail.com

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. Растительные масла представляют собой перспективную альтернативу минеральным в производстве смазочных материалов [1]. Их химическая модификация позволяет существенно расширить спектр функциональных свойств биоразлагаемых смазок, а также создавать эффективные присадки [2–4].

Ключевой особенностью растительных масел является возможность прививки к их молекулам различных функциональных групп – эпоксидных, амидных, гидроксидных и карбоксильных – как непосредственно к структуре глицеридов, так и в продукты их разложения, включая жирные кислоты и сложные эфиры. Это открывает широкие возможности для управления физико-механическими, химическими и антифрикционными характеристиками смазочных материалов.

Актуальность исследований в данной области обусловлена растущим интересом к экологически чистым технологиям, а также активным внедрением «зелёных» решений в транспортной, сельскохозяйственной и промышленной сферах.

Цель. Определить возможность химической модификации индустриального масла, полученного из растительного сырья, с использованием различных функциональных групп и сравнить физико-химические и триботехнические характеристики полученных материалов.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовано индустриальное масло на основе растительного сырья «БИО-ГроИЛ» (ТУ ВУ 400084698/327-2023), представляющего собой смесь растительных масел с добавлением присадок. Модификацию проводили при температуре кипения реакционной смеси в отсутствие растворителей и катализаторов со следующими реагентами: 2-аминоэтанол х.ч., этиленгликоль тех. и янтарная кислота (ГОСТ 6341-75).

Результаты и их обсуждение. Использование этаноламина, этиленгликоля и янтарной кислоты в качестве модифицирующих агентов обусловлено возможностью их взаимодействия с триглицеридами рапсового масла и образования амидов жирных кислот, диглицеридов и сложных эфиров янтарной кислоты, соответственно. Предполагается, что введение полярных функциональных групп позволит изменить средство к поверхностям трения (в частности, к металлам) и, как следствие, улучшит антифрикционные свойства материала.

Согласно данным, представленным в таблице 1, все виды модификации приводят к увеличению кинематической вязкости. Параметр нагрузки сваривания

для образцов, обработанных 2-аминоэтанолом и этиленгликолем несколько упал, в то время как для янтарной кислоты вырос, при этом, если для последних двух модификаторов показатель износа вырос, то для 2-аминоэтанола он уменьшился более чем на 23 %.

В целом различные виды модификации разнонаправленно влияют на функциональные характеристики рассматриваемой смазки. В перспективе это открывает возможности путём варьирования количеств вводимых реагентов получать смазки с требуемыми свойствами.

Таблица 1. Физико-химические и триботехнические характеристики образцов рапсового масла

Характеристика образца	РКЛ-М	амин	гликоль	кислота
Показатель износа, мм	0,51	0,39	0,65	0,63
Нагрузка сваривания, кг	224	178	160	237
Кинематическая вязкость при 40°C, мм ² /с	31,52	49,14	41,72	62,80
Кислотное число, мг КОН/г	6,55	1,03	3,24	12,26

Выводы. Показано, что модификация индустриального смазочного материала на основе рапсового масла такими реагентами как 2-аминоэтанол, этиленгликоль и янтарная кислота существенно и разнонаправленно изменяют его функциональные свойства. Это открывает возможности создания жидких и пластичных смазочных материалов с заданными свойствами путём варьирования концентраций исследованных модификаторов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 4.2.3 НИР 1 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Многofункциональные и композиционные материалы».

1. Honary L., Ritcher E. Biobased Lubricants and Greases: Technology and Products. – Н.: John Wiley & Sons, Ltd. — 2011
2. Гринева А.А., Зорина А.В., Столповская Н.В., Фалалеев А.В., Крысин М.Ю. Эфиры этиленгликоля и жирных кислот растительных масел // Вестник ВГУ: Химия, биология, фармация. — 2014, № 3, 18–23
3. Сафронов О.И., Папейкин А.А., Венгер И.А., Бодачская Л.Ю. Применение амидамина растительных масел в качестве присадок к смазочным материалам // Вестник ОНУ. Химия. — 2018 (23), № 3(67), 29–39
4. Антонова З.А., Крук С.В., Курсевич В.Н., Максимук Ю.В., Кривова М.Г. Получение и свойства этиловых эфиров рапсового масла // Вестник БГУ. Химия. — 2015, Сер. 2, № 1, 7–12
5. Протопопов А.В., Ворошилова А.В., Бобровская С.А. Химическая модификация подсолнечного масла // МНИЖ. — 2017, № 12 (66), 152–154

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПО ПЛОСКОСТИ С ОРТОТРОПНЫМ АДГЕЗИОННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Н.Н. Дмитриев¹, Е.М. Петроковец²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; dn7@rambler.ru

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Физико-механические свойства пары трения с течением времени могут меняться. В какой-то период при взаимодействии контактирующих поверхностей преобладает механическая составляющая силы трения, с ростом температуры – адгезионная составляющая. В общем случае необходимо учитывать обе компоненты силы трения, каждая из которых может обладать анизотропией.

Закон ортотропного адгезионного трения.

Согласно [1], ортотропная адгезионная сила трения, действующая на материальную точку, при ненулевой скорости задаётся законом:

$$\mathbf{T} = T_x \mathbf{i} + T_y \mathbf{j}, \quad (1)$$

где

$$T_x = -\frac{f_x^2 N \cos \vartheta}{\sqrt{f_x^2 \cos^2 \vartheta + f_y^2 \sin^2 \vartheta}},$$

$$T_y = -\frac{f_y^2 N \sin \vartheta}{\sqrt{f_x^2 \cos^2 \vartheta + f_y^2 \sin^2 \vartheta}},$$

и годограф силы трения представляет собой эллипс

$$\frac{T_x^2}{f_x^2 N^2} + \frac{T_y^2}{f_y^2 N^2} = 1. \quad (2)$$

Здесь ϑ – угол, определяющий направление вектора скорости точки, N – нормальная реакция плоскости.

Если на точку действует сила $\mathbf{P} = P(\cos \delta \mathbf{i} + \sin \delta \mathbf{j})$, движение начинается при пересечении этой силой границы годографа (2) в направлении $\vartheta_0 = \arctg\left(\left(\frac{f_x}{f_y}\right)^2 \operatorname{tg} \delta\right)$.

Аналогично линейному ортотропному трению [2], в случае адгезионного трения, определяемого формулой (1) при условии $f_x < f_y$, движение материальной точки по инерции характеризуется стремлением угла ϑ к нулю или π .

Движение твёрдого тела, опирающегося на круговую или кольцевую область. В данной работе исследовалось влияние ортотропного адгезионного

трения на параметры движения твёрдых тел, опирающихся на кольцевую или круговую площадки в предположении равномерного распределения давления по горизонтальной плоскости. Уравнения плоскопараллельного движения записываются в виде

$$m\ddot{x} = \iint_S \tau_x dS, \quad m\ddot{y} = \iint_S \tau_y dS, \quad J\dot{\omega} = \iint_S \operatorname{mom}_{C_z}(\tau) dS, \quad (3)$$

где τ_x, τ_y – проекции элементарной силы трения на оси Ox, Oy и момент этой силы относительно оси, перпендикулярной плоскости скольжения, проходящей через центр масс, J – момент инерции тела относительно этой оси.

Можно показать, что при движении указанных тел по инерции вектор скорости центра масс стремится принять положение, параллельное оси с наименьшим коэффициентом трения. Численное решение системы уравнений (3) позволяет найти предельное положение мгновенного центра скоростей на финальном участке траектории (табл.).

Таблица. Предельное значение величины $\delta = \omega/v$ для кольца и диска (числитель и знаменатель соответственно)

$\mu = f_y - f_x$	Адгезионное трение	Линейное трение
0,03	0,973/1,368	0,990/1,435
0,06	0,924/1,123	0,975/1,345
0,09	0,848/1,119	0,956/1,285
0,12	0,729/1,009	0,934/1,225
0,15	0,526/0,789	0,907/1,172
0,18	–/–	0,876/1,123

Заключение. Результаты механико-математического моделирования свидетельствуют о существенном влиянии закона ортотропного трения на параметры движения однородного диска и однородного тонкого кольца по плоскости.

1. Konyukhov A, Vielsack P., and Schweizerhof K. On coupled models of anisotropic contact surfaces and their experimental validation // *Wear*. — 2008 (264), 579–588
2. Дмитриев Н.Н. Движение диска и кольца по плоскости с анизотропным трением // *Трение и износ*. — 2002 (23), № 1, 10–15

НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ГИБРИДНОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ

А.В. Ивахник, В.И. Жорник

Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;
itmol@mail.ru

Пластичные смазочные материалы (ПСМ) по своему строению являются коллоидными системами, состоящими из дисперсионной среды (масляная основа), дисперсной фазы (ДФ), а также функциональных добавок в виде маслорастворимых присадок и нерастворимых в масле наполнителей. В значительной степени именно ДФ, её строение, во многом определяют функциональные свойства ПСМ. Традиционно разделяют четыре семейства ПСМ по типу природы их ДФ: простые и комплексные мыльные смазки; органические немые; неорганические. ПСМ на одном типе загустителя, можно сгруппировать как смазки, имеющие одинарную дисперсную фазу (ОДФ). Каждый тип ОДФ придаёт смазке свои свойства, имеющие как преимущества, так и недостатки [1, 2].

Во многом повышение эксплуатационных свойств ПСМ с ОДФ достигло своего предела, связанного с природой загустителя. Возникает дефицит традиционных компонентов, например лития. При этом перспективными являются работы по созданию ПСМ с загустителем, имеющим гибридное строение дисперсной фазы (ГДФ) представляющей собой либо сочетание различных солей (например, литиевой и кальциевой) одной и той же карбоновой кислоты, либо комбинацию ДФ различного семейства (например, мыла и высокодисперсные неорганические (или органические) частицы). ГДФ придаёт смазкам новые уникальные сочетания функциональных свойств не достижимых для смазок с ОДФ [3, 4].

Целью данной работы является анализ научно-технологических основ формирования гибридной дисперсной фазы пластичных смазочных материалов и исследование её влияния на реологические и трибологические свойства ПСМ.

Образцы ПСМ были получены на лабораторной установке, воспроизводящей основные особенности промышленных установок.

Объёмно-реологические и функциональные свойства ПСМ с ГДФ связаны с химическим строением и полярностью компонентов её загустителя, а также с межмолекулярным и межмицеллярным их взаимодействием. Регулирование полярности и силы взаимодействия компонентов можно осуществлять по направлениям:

– выбор композиции ГДФ с учётом функциональных свойств каждого её компонента и оценкой влияния синергизма (или антагонизма), проявляющегося в результате их взаимодействия;

– выбор вида дисперсионной среды с

соответствующим химсоставом и полярностью, имеющей оптимальную совместимость с ГДФ;

– регулирование полярности немыльного и мыльного компонентов ГДФ в процессе синтеза.

Последнее направление, являющимся наиболее наукоёмким и технологически сложным, по сути сводится к активации немыльной составляющей ГДФ (её поляризации). Такая активация может осуществляться несколькими способами: механическим, термическим и химическим, а также их комбинацией.

Отличительной особенностью технологической схемы получения ПСМ, имеющих ГДФ, содержащую наряду с мыльным загустителем также и ультрадисперсные (наноразмерные) частицы (немый компонент) является то, что при её реализации возможно применить все способы поляризации. Так при предварительном введении этих агломератов частиц в дисперсионную среду осуществляют их активацию (поляризацию) механическим способом (воздействием различных высокоэнергетических диспергаторов). Далее в образовавшуюся масляную суспензию вводятся реактивы, необходимые для химической поляризации и формирования мыльного компонента ГДФ (т. е. кислот и щелочей). В процессе синтеза ПСМ все компоненты ДФ подвергаются термической, гомогенизации (при выпаривании воды, нагревании, помехенизации и других термических воздействиях). В результате применения всех типов активации образуется ГДФ, отличающаяся повышенной термо- и механопрочностью, коллоидной стабильностью, улучшенными смазывающими свойствами.

Рассмотрены научно-технологические основы формирования ГДФ пластичных смазок, состоящей из мыльного (соли высших карбоновых кислот) и немыльного (высокодисперсные неорганические частицы) компонентов. Для образования гибридного строения ДФ с появлением прочных физических и химических связей между её компонентами необходимо проводить активацию её компонентов.

1. Ишук Ю.Л. Состав структура и свойства пластичных смазок. — Киев: Наук. думка. — 1996
2. Манг Т. Смазки. Производство, применение, свойства: Справочник под ред. В.М. Школьников. — СПб.: Профессия. — 2010
3. The three categories of lubricating grease formulation work – a forty-six year perspective / J. Andrew Waynick. — NLGI Spokesman. — 2023
4. Moving forward...can lubricating grease be produced in a more efficient way / Mehdi Fathi-Najafi, John Kay. — NLGI Spokesman. — 2019

АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА ПАРЫ ТРЕНИЯ СПЕЧЕННЫЙ ФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ-СТАЛЬНОЕ КОНТРТЕЛО

А.Ф. Ильющенко, А.В. Лешок, А.Н. Роговой, А.Г. Томашевский

Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск, Беларусь; sdilav@tut.by

Спеченные фрикционные материалы широко используются в различных узлах трения автотракторной техники, техники специального назначения [1]. Для узлов трения, работающих со смазкой, используются фрикционный материал на основе меди (оловянистая бронза переменного состава), содержащий графиты различных марок, металлические, керамические порошки [2]. Разнообразие используемых порошков приводит к различным механизмам износа поверхностей трения, формированию различных продуктов износа (форма, структура) [3]. Их наличие в смазке приводит к изменению контактных процессов при трении, засорению фильтрующих элементов, уменьшению подаваемой смазки. Исследование формируемых продуктов износа позволит оценить механизмы трения, выявить роль влияния на них используемых порошков.

Цель исследований – анализ продуктов износа пары трения спеченный фрикционный материал-стальное контртело.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования являлось масло трансмиссионное марки «А» после испытаний на стенде инерционном типа «ИМ-58» спеченных фрикционных материалов на основе оловянистой бронзы с 12 % олова, содержащих графит марки ГЭ-1, ГК-1, порошок кокса литейного фракции 40–120 мкм. Анализ продуктов износа фрикционного материала в составе смазки после наработки 10000 циклов испытаний изучали с помощью анализа на СЭМ после очистки в петролейном эфире и последующей сушки на воздухе.

Результаты исследований и их обсуждение.

Анализ продуктов износа позволил установить образование включений в виде конгломератов размером 5–70 мкм, состоящих из частиц различной формы (пластинчатой, осколочной) размером 40–150 нм (рис. 1, а). МРСА частиц показал, что в них содержится 65,2–82,9 % железа, 1,10–2,76 % меди, 0,75–2,21 % олова, 20,2–31,8 % углерода. Высокое содержание углерода, может быть объяснено наличием на поверхности металлических частиц наноразмерных частиц графита.

Установлено, что для фрикционного материала содержащего графит ГК-1, в смазке присутствует большое количество нанодисперсных углеродных частиц размером 40–500 нм, образующих агломе-

раты размером 1–25 мкм (рис. 1, б). При использовании графита ГЭ-1 – ультрадисперсные частицы размером 1–5 мкм (рис. 1, в), на поверхности которых располагаются нанодисперсные частицы размером 30–300 нм. При использовании порошка кокса, в смазке присутствуют частицы осколочной формы размером 0,5–4,0 мкм, на поверхности которых располагается незначительное количество наноразмерных частиц размером 40–250 нм (рис. 1, г).

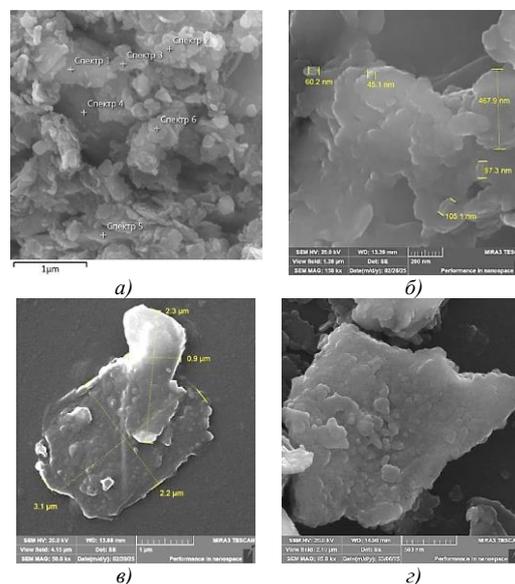


Рис. 1. Морфология частиц износа фрикционного материала (а), графита ГК-1 (б), ГЭ-1 (в), кокса (г) из смазки

Полученные результаты экспериментальных исследований позволили сделать вывод, что свойство (вязкость) смазки с течением времени изменяется за счёт увеличения количества продуктов износа графита. В большей степени это выражено для мелкодисперсного графита ГК-1, содержание частиц которого в единице объема СФМ больше, чем ГЭ-1. Твёрдый кокс при трении разрушается на фрагменты большего размера, и, внедряется в пластичную бронзу, модифицируя ее.

1. Алыгин В.Б., Поддубко С.Н. Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин. — Минск: Бел. наука. — 2019
2. Федорченко И.М., Крячек В.М., Панаиоти И.И. Современные фрикционные материалы. — Киев: Наукова думка. — 1975
3. Ильющенко А.Ф., Лешок А.В., Дьячкова Л.Н. Спеченные фрикционные материалы на основе меди для работы в условиях граничного трения. — Минск: Медисонт. — 2021

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ TiN/a-C

В.И. Колесников¹, О.А. Беляк^{1,2}, Д.В. Максимов¹, М.С. Горин³, М.М. Четверик¹

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

²Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия; belyak.o.a@gmail.com

³Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Широкое распространение для узлов и деталей триботехнического назначения получили PVD покрытия TiN. Один из самых больших недостатков покрытий TiN является столбчатая, пористая микроструктура. Наличие пор ухудшает не только механические свойства, но и коррозионную стойкость таких покрытий. В связи с этим, актуальным становится формирование нанокomпозиционных покрытий TiN/a-C, с формированием сверхтвёрдого нанопервоверхностного слоя a-C или многослойной структуры TiN/a-C. Такие покрытия состоят из двух фаз: нанокристаллической и аморфной фазы. В многослойных нанокomпозиционных покрытиях с включением аморфной фазы углерода в базовый материал TiN уменьшает как размер кристаллитов, так и пористость таких покрытий, что приводит к плотной и однородной микроструктуре покрытия, и как следствие, к высокой твёрдости таких покрытий [1].

Материалы

В настоящей работе исследуются нанокomпозиционные покрытия TiN/a-C. Синтез таких покрытий осуществляется многофункциональной установкой вакуумного напыления BRV600, комплект которой включает специализированный узел для получения углеродных покрытий с использованием метода лазерного испарения исходного углеродного материала (графита) и последующего осаждения его на TiN под действием регулируемого потенциала смещения.

Экспериментальные исследования и их результаты

Механические и трибологические свойства нанокomпозиционных покрытий TiN/a-C, а также TiN и DLC покрытий были исследованы в рамках теоретических моделей и лабораторных экспериментов. Теоретическое моделирование свойств таких покрытий включало в себя исследование процесса индентирования на атомарном уровне, реализованного в программном комплексе LAMMPS. Такой подход даёт возможность детально изучить свойства материала в наномасштабе и наблюдать стадии поверхностной деформации, визуализировать взаимодействие между структурными элементами в наномасштабе, а также детально анализировать процессы зарождения и накопления дислокаций в структуре, которые невозможно наблюдать экспериментальными методами. На рис. 1 представлена простейшая двухслойная структура представительного объёма материала TiN/a-C.

В рамках такого подхода, после обработки диаграмм индентирования (рис. 2) получены значения нанотвёрдости и приведенного модуля Юнга системы «материал-индентор» для покрытий TiN/a-C, TiN, DLC [2].

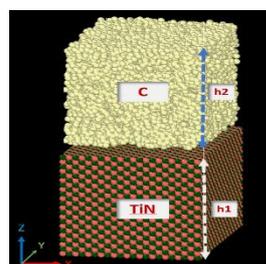


Рис. 1. Представительный объём TiN/a-C

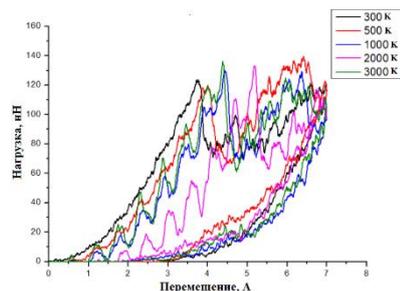


Рис. 2. Диаграммы индентирования, полученная в LAMMPS для монослоя TiN при различной температуре гидростатического сжатия

Результаты теоретических расчётов сопоставлены с результатами лабораторного индентирования таких покрытий, выполненных комплексом NanoTest600. Моделирование трибологических свойств и распределение напряжений в слоистой системе рассматриваемых покрытий выполнено в рамках конечно элементного моделирования в программном комплексе Ansys.

В результате проведенного комплекса исследований установлены оптимальные соотношения и кристаллической и аморфной фаз покрытия TiN/a-C.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-79-30007-П, <https://rscf.ru/project/21-79-30007/>.

1. Harish C. Barshilia, M. Surya Prakash, D.V. Sridhara Rao, and K.S. Rajam. Superhard nanocomposite coatings of TiN/a-C prepared by reactive DC magnetron sputtering // *Sur. Coat. Tech.* — 2005 (195), no. 2-3, 147—153
2. Belyak O., Suvorova T., and Manturov D. Study of Tribological and Mechanical Characteristics of Wear-Resistant Coatings Taking into Account Their Elastoplastic Properties // *J. Friction and Wear.* — 2024 (45), no. 5, 280—286

АНТИФРИКЦИОННЫЙ ЭВТЕКТИЧЕСКИЙ СИЛУМИН С МЕЛКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ ГЛОБУЛЯРНЫМ КРЕМНИЕМ

Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко

Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, Минск, Беларусь; stetsenko.52@bk.ru

Бронзы являются антифрикционными сплавами, наиболее применяемыми в промышленности. Бронзы имеют высокий коэффициент трения по стали и обладают высокой фрикционной износостойкостью, поэтому широко используются в узлах трения машин и механизмов. Но бронза является относительно тяжёлым и дорогостоящим материалом. Поэтому замена антифрикционных бронз на более дешёвые и лёгкие антифрикционные сплавы является актуальной задачей.

Разработан антифрикционный сплав на основе алюминия, содержащий кремний медь, алюминий, отличающийся тем, что кристаллы эвтектического кремния имеют глобулярную форму и размер от 2 до 8 мкм при следующем соотношении основных компонентов, в вес. %: Si – 12–15; Cu – 3–5; Al – остальное [1].

Антифрикционный эвтектический силумин с мелкокристаллическим глобулярным кремнием (АС) получают литьём в кристаллизаторы с затопленно-струйной системой охлаждения (струйные кристаллизаторы). Струйные кристаллизаторы, по сравнению с обычными, позволяют увеличить линейную скорость затвердевания силумина в 2,5–3 раза. Это позволяет получать слитки диаметром от 40 мм до 120 мм с высокодисперсной инвертированной микроструктурой без использования модифицирующих флюсов и лигатур [2, 3].

Цель. Определение возможности замены антифрикционных бронз на АС в узлах трения машин и механизмов.

Материалы и методы. Механические свойства АС определяли с помощью разрывной машины ИР5143-200-11. Твёрдость образцов АС измеряли на твердомере ТШ-2М. Триботехнические испытания АС по сравнению с бронзой БрОЦС5-5-5, в условиях без смазки, проводились на торцевой машине трения при нормальной нагрузке 12,8 Н и вращении образца из стали 45 со скоростью 620 об/мин. Триботехнические испытания АС по сравнению с бронзой БрОЦС5-5-5, в условиях со смазкой (И20А), проводились на машине трения СМЦ-2 при нормальной нагрузке 200 Н и вращении образца из стали 45 со скоростью 300 об/мин [3]. Триботехнические испытания АС по сравнению с бронзами БрОЦС5-5-5, БрОФ10-1, БрАЖ9-4, в условиях со смазкой (И20А), проводились на машине трения МТВП при удельных нагрузках от 10 МПа до 100 МПа. При этом использовалась схема возвратно-поступательного перемещения призматического образца (10×5×5 мм) по стали 45 при скорости 0,1–0,5 м/с [4].

Результаты и их обсуждение. АС после термической обработки по режиму Т5 имели следующие механические свойства: временное сопротивление разрыву – 350–450 МПа; относительное удлинение – 3–5 %; твёрдость – 125–145 НВ [3].

В результате испытаний на торцевой машине трения установлено, что по износостойкости, в условиях без смазки, АС превосходят бронзу БрОЦС5-5-5 в среднем в 7 раз. В результате испытаний на машине трения СМЦ-2 установлено, что по износостойкости, в условиях со смазкой, АС превосходит бронзу БрОЦС5-5-5 в среднем в 23 раза [3]. Коэффициент трения скольжения по стали 45 у АС, по сравнению с бронзой БрОЦС5-5-5, в условиях со смазкой и без неё, был соответственно в 1,35 и 1,65 раз меньше. В результате испытаний на машине трения МТВП установлено, что по износостойкости, в условиях со смазкой, АС превосходит бронзы БрОЦС5-5-5, БрОФ10-1, БрАЖ9-4 при высоких удельных нагрузках [4].

В результате опытно-промышленных испытаний установлено, что детали из АС по фрикционной износостойкости и ресурсу работы не уступали либо превосходили аналогичные детали из промышленных антифрикционных бронз БрАЖ, БрОЦС, БрАЖМц, БрАЖН, БрОФ, БрОС [3].

Область применения АС в промышленности: подшипники скольжения, шестерни червячных колес редукторов, втулки балансиров и шарниров, направляющие втулки и другие детали узлов трения технического оборудования.

В настоящее время заготовки из АС применяются на промышленных предприятиях России и Беларуси. АС в среднем на единицу веса в 2,5 раз дешевле проката из промышленных алюминиевых и оловянных антифрикционных бронз, но по плотности в 3 раза их легче.

АС позволяет заменить дорогостоящие и тяжёлые антифрикционные бронзы в узлах трения машин и механизмов.

1. Антифрикционный сплав на основе алюминия: патент 2504595 РФ, МПК С 22 С 21/04, С 22 С 21/12 // Бюллетень Фед. службы по интелект. собств., пат. и тов. зн., 2014. № 2. / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович
2. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Модифицирование сплавов. — Минск: Беларуская навука. — 2009
3. Стеценко В.Ю. Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Минск: БНТУ, 2021.
4. Марукович Е. И. [и др.] Исследование триботехнических свойств антифрикционного силумина АК15М3 // Трение и износ. — 2020 (41), № 2, 131—138

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПОЛИМЕРНЫХ ВКЛАДЫШЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Д.Н. Сидорова, А.М. Спиридонов

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия;
dolguyana.sidorova@bk.ru

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) находит широкое применение в медицине, а именно в ортопедии как полимерный вкладыш в искусственные протезы суставов. Уникальные свойства СВМПЭ определяют его как прочный, износостойкий и биосовместимый материал. Однако, при длительной эксплуатации полиэтилена в суставах при постоянном трении могут возникать частицы трения макро- и наноразмеров, что приводит к перипротезному воспалению с последующей заменой протеза [1].

Цель

Сопоставить результаты трибологических испытаний материалов из промышленных вкладышей с лабораторными образцами.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны полимерные вкладыши для коленных эндопротезов трех известных марок: Zimmer Biomet NexGen®, Meril Life DestiKnee™, Johnson&Johnson Sigma™ DePuy Synthes, стержневые СВМПЭ Chirulen® и Ortoplast, а также лабораторные образцы: СВМПЭ исходный; СВМПЭ+0,3 мас. % α -токоферол; СВМПЭ+0,5 мас. % ZrO_2 ; СВМПЭ+0,3 мас. % α -токоферол+0,5 мас. % ZrO_2 .

Для изготовления лабораторных образцов был взят СВМПЭ марки GUR 1050 (Lennite, Китай), α -токоферол (Sigma-Aldrich, США), и порошок диоксида циркония (Плазмотерм, Россия).

Лабораторные образцы получали методом горячего прессования с предварительным смешиванием порошка СВМПЭ с наполнителями.

Для изучения устойчивости к износу определяли скорость массового изнашивания и коэффициент трения по схеме «палец-диск» [2] на универсальном трибометре (CETR, США). Плотность определяли согласно ГОСТ 15139-69 «Пластмассы. Методы определения плотности».

Результаты и их обсуждение

Излишнее образование частиц износа может привести к риску возникновения воспалительной реакции в суставе. Тем самым главной характеристикой материала, используемого в качестве вкладыша в эндопротезах суставов, является его износ-

стойкость, а именно скорость массового изнашивания. Результаты трибологического испытания представлены на таблице 1.

Таблица 1. Трибологические характеристики

Образец	I , мг/ч	f	ρ , г/см ³
NexGen	0,13	0,34	0,94
DestiKnee	0,07	0,31	0,93
DePuy	0,15	0,27	0,94
Chirulen	0,20	0,35	0,93
Ortoplast	0,47	0,34	0,93
СВМПЭ исх.	0,28	0,37	0,94
СВМПЭ+0,3 мас. % α -ток.	0,17	0,37	0,94
СВМПЭ+0,5 мас. % ZrO_2	0,16	0,46	0,95
СВМПЭ+0,3 мас. % α -ток.+0,5 мас. % ZrO_2	0,16	0,43	0,95

Примечание. I – скорость массового изнашивания, мг/ч; f – коэффициент трения; ρ – плотность, г/см³.

Как видно из таблицы 1 у всех испытуемых материалов наблюдаются низкие значения скорости массового изнашивания, наименьший показатель у образца DestiKnee – почти в 7 раз меньше по сравнению с наибольшим показателем. Полученные значения скорости массового изнашивания лабораторных образцов не уступают значениям промышленных материалов.

С добавлением твёрдого наполнителя наблюдается повышение коэффициента трения. Коэффициент трения зависит от условий проведения испытаний и самого материала. Если в полимерном материале содержатся твёрдые наполнители, то, как правило, коэффициент трения возрастает за счёт выступления наполнителей на поверхность трения [3].

Значения плотности материалов характерна для типичных полимерных композиционных материалов на основе СВМПЭ

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FSRG-2024-0004).

1. S.M. Kurtz. 1 - A Primer on UHMWPE // in book UHMWPE Biomaterials Handbook (Third Edition). — William Andrew Publishing. — 2016, 1—6. - 10.1016
2. UHMWPE/CaSiO₃ nanocomposite: Mechanical and tribological properties / S. N. Danilova, A. A. Okhlopkova, S. B. Yarusova [et al.] // Polymers. — 2021 (13), no. 4, 1—17
3. Danilova S. N. et al. UHMWPE/CaSiO₃ nanocomposite: Mechanical and tribological properties // Polymers. — 2021 (13), no. 4, 570

НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ РОЛИКОВЫХ НОЖЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ СТОЙКОСТИ К ИЗНОСУ И КОРРОЗИИ

М.А. Скотникова, С.А. Шашерина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;
skotnikova@mail.ru

Введение. При эксплуатации скважин в нефтедобывающей промышленности, широко используются щелевые перфораторы, рабочим инструментом которых являются роликовые ножи из инструментальных сталей типа Х12МФ и которые очень быстро изнашиваются.

Цель работы: Повышение стойкости роликовых ножей к износу и коррозии за счёт нанесения никель-медных покрытий и подбора оптимальных контактных напряжений для их наноструктурирования.

Материалы и методы. В работе исследовались инструментальные стали типа Х12МФ с никель-медным покрытием, нанесённым с помощью диффузионного легирования и последующего интенсивного пластического деформирования (ИПД) с контактными напряжениями 3,0 ГПа, 3,5 ГПа и 4,5 ГПа. Применялись методы: оптической и просвечивающей электронной микроскопии; рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа; трибологические и коррозионные испытания; измерения твёрдости и шероховатости.

Результаты и их обсуждение. Результаты триботехнических испытаний показали, что после нанесения Cu-Ni покрытия и ИПД при напряжении 3,5 ГПа наблюдалось не только снижение до 0,08 коэффициента трения, в 2,1 раза износа, в 2,5 раза шероховатости поверхности ролика, по сравнению со сталью без покрытия, но и повышение нагрузки схватывания до 1400 Н.

Испытания образцов на сопротивление общей сероводородной коррозии проводили на образцах-свидетелях из стали Х12МФ со следующими диффузионными Ni-Cu покрытиями, «табл. 1».

Таблица 1. Результаты испытаний на общую сероводородную коррозию

Состояние образца	Скорость коррозии, мм/год	Степень защиты, %
Исходный (без покрытия)	3,90	–
Покрытие + ИПД 3,0 ГПа	0,08	98,0
Покрытие + ИПД 3,5 ГПа	0,07	98,2
Покрытие + ИПД 4,5 ГПа	0,08	98,0

Показано, что Ni-Cu покрытия, и особенно после ИПД 3,5 ГПа, имели высокие защитные свойства против коррозии при температурах до 150 °С. По окончании эксперимента на всех образцах-свидетелях не были обнаружены дефекты покрытий

(отслоений, вздутий и пр.). Степень защиты превышала 98 % (испытания по стандарту NACEMR0175/ISO 15156).

Результаты просвечивающей электронной микроскопии показали, что после нанесения Ni-Cu покрытия на сталь Х12МФ и последующей интенсивной пластической деформации, под напряжением 3,5 ГПа, поперечный размер дислокационных субзерен (43 нм) с малоугловыми границами раздела уменьшился в 5 раз по сравнению с исходным состоянием. На электронограммах вблизи рефлексов появились тяжи, свидетельствующие о наличии больших упругих искажений кристаллической решётки. В режиме высокого разрешения было обнаружено присутствие преимущественно малоугловых границ в структуре покрытия, которые обладали большей проникающей способностью для перераспределения легирующих элементов «рис. 1» [1].

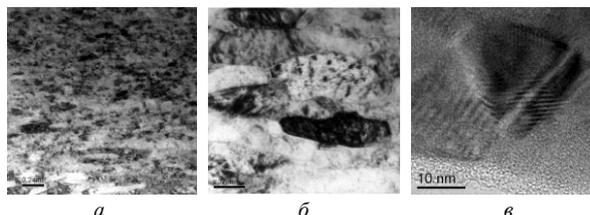


Рис. 1. Наноструктурированное Ni-Cu покрытие после ИПД 3,5 ГПа. $\times 60000$ (а); $\times 330000$ (б); $\times 1500000$ (в)

Можно полагать, что хром из стали Х12МФ перераспределялся вдоль малоугловых дислокационных границ удлинённой полигонизованной наноструктуры, ориентированных перпендикулярно краю поверхности покрытия. В покрытии наблюдалось увеличение концентрации Cr, по сравнению с исходным состоянием. Это приводило к упрочняющему изменению химического и фазового состава Ni-Cu покрытия и повышению его относительной стойкости к износу и коррозии.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-19-20092, <https://rscf.ru/project/25-19-20092/>

1. Shasherina S.A., Skotnikova M.A. Forming of nanostructured Cu-Ni coverings of tool steel H12MF after surface machining attrition treatment // Materials Today — 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 666 012004.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВМПЭ ПОКРЫТИЯ НА МОРОЗОСТОЙКОЙ РЕЗИНЕ

Е.В. Горская¹, И.В. Шкалей¹, Н.Н. Петрова², А.А. Дьяконов²

¹Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; torskaya@mail.ru

²Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия

Введение. Значительный интерес при создании полимерных композиционных материалов (ПКМ) представляет сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), который обладает высокими прочностью, износостойкостью ввиду низкого коэффициента трения, абразивостойкостью, работоспособностью при крайне низких температурах. При его сочетании с эластомерными материалами, обладающими высокой эластичностью, низким модулем, демпфирующими свойствами следует ожидать интересных результатов.

Целью данной работы является изучение особенностей сухого трения морозостойкой резины с покрытием из СВМПЭ на основе фрикционных испытаний.

Материалы и методы. В работе были исследованы двухслойные ПКМ, состоящие из СВМПЭ (марка GUR-4022, Ticona, Германия) в качестве покрытия и резины в качестве подложки. Резиновая смесь содержала все необходимые ингредиенты: каучук БНКС-18 (СИБУР, Россия), наполнитель (технический углерод П-803), диспергатор, ускоритель и активатор вулканизации и вулканизирующий агент (сера).

Были изготовлены образцы в виде кольца с СВМПЭ покрытием толщиной 300 и 600 мкм. При изготовлении сначала формовали порошок СВМПЭ (10 МПа, 5 мин), соединяли с подготовленной резиновой смесью и выдерживали (155 °С, 10 МПа, 20 мин) в пресс-форме для проведения вулканизации эластомера и горячего прессования термопласта, затем охлаждали в этой же пресс-форме.

Испытания на трение проводились на триботестере (MFT-5000, Rtec, USA) в режиме однонаправленного скольжения стального шарика (ШХ15, диаметр 10 мм) по поверхности образцов при постоянной нагрузке: 10 Н для объёмного СВМПЭ (для минимизации пластических деформаций в процессе трения) и 20 Н для исследуемых материалов. Радиус трека составлял 23 мм. В течение цикла варьировалась линейная скорость скольжения (при прочих равных условиях) по возрастанию величины в диапазоне от 0,01 до 1 м/с. При каждой скорости продолжительность составляла 10 мин. Испытание повторялось трижды для усреднения итогового результата.

На оптическом профилометре S neox 3D (Sensofar-Tech, Spain) были получены оптические изображения дорожек трения (объектив 20X).

Результаты и их обсуждение. Дорожки трения на поверхности покрытия значительно шире, чем на

объёмном СВМПЭ вследствие существенно большей интегральной податливости двухслойных ПКМ (рис. 1).

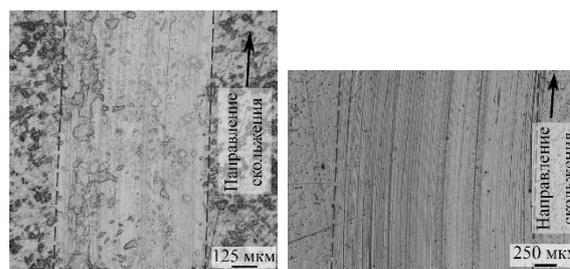


Рис. 1. Оптические фото дорожек трения для объёмного СВМПЭ (слева) и композита с толстым покрытием (справа)

Были получены зависимости коэффициента трения от скорости скольжения (рис. 2).

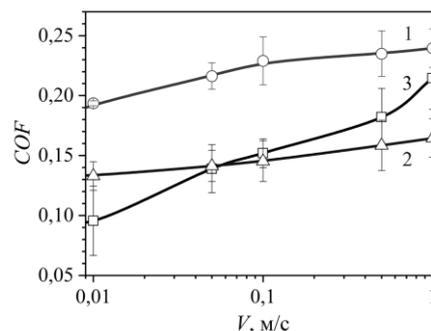


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения COF от скорости скольжения V для тонкого покрытия (1), толстого покрытия (2) и объёмного СВМПЭ (3)

Результаты показывают, что коэффициент трения зависит от толщины покрытия и скорости скольжения. Коэффициент трения для композита изменяется от 0,1 до 0,22, что существенно меньше коэффициента трения резины (0,4–1,1) [1]. При этом, чем толще покрытие, тем ниже демпфирующая способность материала. При увеличении скорости разогрев приводит к росту поверхностной энергии полимера и, следовательно, к увеличению адгезии (и коэффициента трения соответственно).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-19-00484).

1. Bukovskiy P.O., Morozov A.V., Petrova N.N., Timofeeva E.V. Study on the Influence of Activated Carbon Nanotubes on the Tribological Properties of Frost-Resistant Rubber // Mech. Solids. — 2019 (54), 1250—1255

ГИДРОАБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС В ПРОЦЕССАХ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.Л. Худoley

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь; khudoley@hmti.ac.by

Анализ литературных источников показал, что гидроабразивное изнашивание (ГАИЗ) в технических системах и технологических процессах может рассматриваться, как положительное [1–4], так и негативное (нежелательное) [5] явление. Однако, в обоих случаях стремятся к минимизации коррозионного и эрозийного типов воздействия.

При эксплуатации горно-обогатительного оборудования (пульповоды, землесосы и т.п.), насосов гидроэлектростанций; машин и станочного оборудования, конструктивно содержащих опоры скольжения и зубчатые пары; стремятся минимизировать и подавить ГАИЗ, и наоборот при гидроабразивной резке материалов интенсифицируют унос материала с поверхности за счёт использования высоких скоростей потока, увеличения количества абразивных частиц, изменения формы частиц и дополнительного активирования посредством нагрева / охлаждения и кавитации.

В общем случае при прецизионной гидроабразивной обработке (ПГАО) величина съёма материала с поверхности характеризуется малыми значениями – от единиц нанометров до нескольких десятков микрон. В трибологическом смысле речь идёт о микро- и наноизнашивании (МНИ). Процессы ПГАО, в основе которых используется явление ГАИЗ, можно обобщить и классифицировать следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Классификация процессов прецизионной обработки поверхности, в основе которых используется явление гидроабразивного изнашивания

В настоящей работе автором подробно рассмотрены указанные процессы с позиции МНИ. Показано, что при ПГАО повреждаемость материала поверхности значительно меньше, чем при её обработке

связанным абразивом. Это объясняется тем, что абразивные частицы находятся в несвязанном состоянии, и поэтому они могут «проворачиваться» в потоке при контакте с обрабатываемой поверхностью, что неизбежно приводит к сокращению треков микро- и нанорезания, и как следствие – уменьшению глубины воздействия абразивных частиц на поверхность. По аналогии с классической механической обработкой резанием, жидкая среда в процессах ПГАО выступает в роли смазочно-охлаждающей жидкости, поэтому гидроабразивный поток осуществляет интенсивное охлаждение поверхности, которая при абразивном воздействии частиц (МНИ) стремится к разогреву. При этом минимизируется тепловое воздействие на обрабатываемый материал и соответственно уменьшается повреждаемость поверхности. Дополнительно, поток жидкости обеспечивает постоянный унос продуктов МНИ из зоны трибоконтакта, значительно минимизируя, а часто и исключая, трибомодификацию поверхности.

Следует отметить, что гидроабразивная среда выступает в роли обрабатывающего инструмента с определёнными характеристиками по скорости съёма материала с поверхности и качеству её обработки. Для обеспечения контролируемого темпа и качества ПГАО рекомендуется управлять параметрами МНИ. Для чего целесообразно применять автоматизированные системы контроля и стабилизации параметров реализуемого процесса ПГАО.

Использование указанных особенностей ГАИЗ на практике позволяет эффективно очищать подложки микроэлектроники; формировать смазочные каналы на поверхностях трибосопряжений [2], удалять дефектные слои на рабочих поверхностях оптических и лазерных элементов и т.п.

1. Booij S.M., Brug H.H., Braat J.J.M., and Faehnle O.W. Nanometer deep shaping with fluid jet polishing // *Optical Engineering*. — 2002 (41), no. 8, 1926—1931
2. Исупов М.Г. Струйно-абразивная технология формообразования смазочных микрокарманов // *Вестник машиностроения*. — 2003 (11), 55—57
3. Качанов И.В. [и др.] Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины. — Минск: БНТУ. — 2016
4. Галиновский А.Л., Кравченко И.Н., Мартысюк Д.А. и др. Разработка метода дискретной абразивно-жидкостной ультраструйной диагностики материалов // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. — 2021 (4), 88—99
5. *Abrasive Erosion & Corrosion of Hydraulic Machinery* / Eds. C.G Duan and V.Y. Karelin // *Series on hydraulic machinery*. — Vol.2. — London: Imperial College Press. — 2002

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 4

Рециклинг полимерных материалов и экологические аспекты производства

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2025)

24—27 июня 2025 г., Гомель, Беларусь

ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ ОБУВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.Н. Буркин¹, Н.С. Ковальков²

¹Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь; a.burkin@tut.by

²ЧПУП «Обувное ремесло», Витебск, Беларусь

Введение. К основным видам крупнотоннажных отходов обувного производства относят: натуральные кожи, искусственные кожи, картоны, пластмассы, ткани с полимерным покрытием, термопластичные композиционные материалы и т.д. В мировой практике перерабатывают около 20 % промышленных отходов обувного производства. Под отходами обувного производства понимают остатки полуфабрикатов, материалов, образующиеся в процессе превращения исходного материала в готовую продукцию, утратившие полностью или частично потребительские качества исходного материала (химические или физические свойства, а также полнота, конфигурацию и т.п.).

Обувь – это довольно сложная многокомпонентная инженерная конструкция, включающая разные комплектующие материалы, которые соединяются между собой. На крупном предприятии одновременно бывает до 300 наименований основных и вспомогательных материалов, задействованных в производстве обуви. В результате проведения раскройных и сборочных операций образуются твёрдые отходы, приблизительно от 40 до 80 тонн на 1 миллион пар обуви.

Основная часть. В настоящее время переработка отходов рассматривается как один из вариантов восстановления продукции. Поэтому в литературе существует множество определений и классификаций, касающихся действий по восстановлению продукта. При этом рециркуляция материалов (рециклинг, переработка) рассматривается как наиболее подходящий вариант управления отходами обуви.

Эффективное управление утилизируемыми отходами – это довольно сложный вопрос, состоящий из многих компонентов. Модель управления отходами включает несколько сценариев: как правило, повторного использования, утилизации, сжигания и применяется для оценки реальной проблемы управления отходами обуви. Современные решения по переработке отходов включают: повторное использование, материальный и энергетический рециклинг, захоронение.

Для каждого из вариантов существуют различные воздействия на окружающую среду, экономические выгоды и технические требования, которые необходимо учитывать.

Основываясь на 30-летнем опыте работы сотрудников ВГТУ в этом направлении [1], отметим основные проблемы, связанные с переработкой отходов обувного производства:

– как правило обувные предприятия – это небольшие производства с выпуском до 1 млн пар обуви в год, а, следовательно, объёмы отходов по видам невелики – до 10 тонн, которые производителям обуви невыгодно перерабатывать;

– законодательная база страны не урегулирована в послаблении налогов на этот вид деятельности – нужно оформлять лицензию;

– на подавляющее большинство отходов нет разработанных малотоннажных технологий их переработки;

– перевозки отходов на большие расстояния невыгодны по вполне понятным причинам;

– невозможность изготовления изделий с высокой добавленной стоимостью;

– отсутствие линейки специализированного оборудования для переработки отходов;

– отсутствие достаточной информации о структуре, составе и технологии изготовления исходных комплектующих материалов для обуви.

Заключение. Указанные выше проблемы необходимо решать на региональном уровне, например, Витебского региона. Для этого нужно реализовать комплексный подход с использованием других отходов предприятий региона.

Учитывая современные тенденции развития экономики необходим переход от линейной модели к замкнутой, т.е. круговой. Как уже отмечалось выше, для современного предприятия, имеющего полный цикл производства: от раскроя до выпуска готовой обуви это реализовать невозможно.

Одним из вариантов решения является реализация круговой экономики замкнутого цикла на предприятиях, изготавливающих комплектующие для сборки обуви, например, детали низа.

В настоящее время такой вариант решения круговой экономики разработан для ЧПУП «Обувное ремесло» – резидента Технопарка УО «ВГТУ». Данное предприятие изготавливает подошвы обуви из пенополиуретана. В процессе изготовления образуются отходы, которые в последствии перерабатывают в гранулят термопласта, используя технологии, разработанные совместно с кафедрой «Техническое регулирование и товароведение» УО «ВГТУ». Полученный гранулят затем используется в производстве моноклетчатых подошв для обуви различного назначения.

1. Материалы для подошв обуви на основе отходов производства: монография / А.Н. Радюк, Е.А. Ковальчук, А.Н. Буркин, под общ. ред. А.Н. Буркина. — Витебск: УО «ВГТУ». — 2022

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА

В.Ю. Гарбарук^{1,2}

¹ОДО «Научно-технический центр ЛАРТА», Гомель, Беларусь, v.garbaruk@outlook.com;

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Полимерные материалы нашли своё применение во многих отраслях техники и промышленности. Совокупность широкой номенклатуры применяемых веществ, технологичность при изготовлении и уменьшение стоимости готовых изделий позволяют во многих сферах заменить классические материалы на полимерные или композиты на их основе. Однако существует проблема улучшения служебных характеристик материалов на основе полимеров, что позволило бы расширить область их применения на более ответственные изделия. На этом фоне перспективным видится возможность создания композитных полимерных материалов, компоненты синергично улучшают свойства изделий. Также следует отметить важность технологической обработки такого рода изделий, позволяющей добиться требуемых характеристик для материалов, изначально не соответствующих требованиям. Предварительная обработка для повышения степени кристалличности используется при производстве термостойких фильтровальных материалов [1, 2], но не существует единого мнения о влиянии внешних факторов непосредственно при производстве таких изделий.

В данной работе исследовано влияние дополнительной термической обработки на эффективность очистки и физико-механические свойства волокнисто-пористых фильтрующих материалов (ВПФМ), полученных методом «meltblowing» из полифениленсульфида (ПФС) с добавлением полипропилена (ПП). В качестве образцов использовались цилиндрические фильтрующие элементы, полученные при одинаковых режимах работы экструзионного оборудования, разделённые на 6 групп: 1) без дополнительного воздействия, выступающая в качестве контрольной, 2) образцы после изготовления были помещены в печь при температуре выше температуры кристаллизации ПФС на 4 часа с последующим выключением печи и выдержкой в ней образцов до полного остывания, 3) Образцы помещали в термоизолирующий кожух для уменьшения скорости остывания и увеличения времени нахождения при температуре выше температуры кристаллизации ПФС, 4) с обработкой инфракрасным излучением в процессе изготовления и последующей выдержкой под ним при остывании, 5) образцы облучали ИК излучением и после (аналогично группе 2) были помещены в печь, 6) образцы облучались ИК излучением и после (аналогично группе 3) были помещены в термоизолирующий кожух.

Через 24 часа после достижения всеми образцами комнатной температуры измеряли величины диаметров

волокон, эффективность очистки по механическим твердотельным загрязнениям, проводили дифференцирующую сканирующую калориметрию образцов, а также исследовали физико-механические свойства образцов. Для полноты исследования каждый образец был разделён на 3 равные по толщине части, каждая из которых была исследована отдельно

Полученные результаты показали, что все виды дополнительной обработки увеличивают эффективность очистки образцов от механического твердотельного загрязнения (рис. 1), при этом диаметры волокон после обработки не отличались от контрольного образца и составляли величину от 17 до 40 мкм для всех фильтроэлементов. Степень кристалличности для всех образцов была выше 38 %, при этом после обработки значительное увеличение (до 70 %) наблюдалось только у образцов, выдержанных в печи (группы 2, 5), при этом средняя часть образцов показывала более высокое значение кристалличности. Эти же группы показали лучшие результаты при вдавливании металлического индентора с давлением 0,1 МПа. При этом образцы, подвергнутые ИК облучению, обладали большей жёсткостью внутреннего слоя фильтроэлемента.

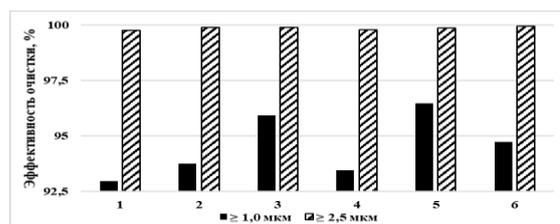


Рис.1. Эффективность очистки образцов фильтрующих элементов при фильтрации воздуха от твердотельного аэрозоля

Таким образом, дополнительная обработка ВПФМ на основе ПФС позволяет улучшить показатели эффективности очистки за счёт термического воздействия на массив волокон фильтрующих элементов. Выбор методов дополнительной обработки и их комбинации может зависеть от необходимых требований рабочей среды и условий эксплуатации, в том числе направления потока и требований к механической прочности элемента.

1. Polyarylene sulfide melt blown fibers and products: pat. US 6,110,589 / Colin F. Harwood, Isaak Wasserman, Thomas C. Gsell, Glen Head. – Publ. date 29.08.2000
2. Polyarylene sulfide resin compositions: pat. US 6,762,229 B2 / Naomitsu Nishihata, Masahito Tada, Hiroyuki Sato, Kiyomi Ohuchi. – Publ. date 13.07.2004

ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ ШВЕЙНО-ТРИКОТАЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ («СЕКОНД-ХЕНД») В МАТЕРИАЛЫ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

И.М. Грошев¹, К.И. Тарутько¹, А.Н. Махонь², И.С. Карпушенко²

¹ОАО «Витебскдрев», Витебск, Беларусь

²Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь

На протяжении последнего десятилетия в Республику Беларусь ввозятся тысячи тонн одежды, бывшей в употреблении («секонд-хенд») и существует проблема с переработкой и утилизацией такого рода швейно-трикотажных изделий. Существует важная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке технологических процессов получения рециклированных материалов с использованием текстильных отходов.

Разработка новых технологий переработки текстильных отходов «секонд-хенд» в производстве композиционных материалов может стать выгодной индустрией, обладающей большим потенциалом как в экономическом, так и в экологическом плане.

Нами получены экспериментальные образцы композиционных материалов с включением текстильных волокон «секонд-хенд». Для производства образцов были использованы разволокненные и измельченные текстильные волокна «секонд-хенд». В качестве материала матрицы добавлен измельченные полимерные отходы упаковки. Содержание их в смеси варьируется от 10 до 30 %. Полимерные отходы выполняли роль связующего

Кроме того, в композицию добавлялась древесная стружка в количестве до 30 %.

В качестве связующего дополнительно использовался окисленный крахмал. Он обеспечивает надёжное склеивание слоёв, повышенное сопротивление к сползанию, увеличение времени между смешением компонентов, снижение прилипания к рабочему инструменту и большую пластичность композиционной смеси.

При изготовлении образцов варьировали режимы нагрузки, температуры и времени. Прессование образцов проводили при температуре от 190–240 °С. Образцы при температуре в 240 °С пригорали, расслаивались и были не пригодны для дальнейших исследований. Оптимальный температурный диапазон изготовления композиционных материалов находился в пределах 190–210 °С.

Изготовленные образцы исследовались на: ударную прочность, абсолютную остаточную деформацию, предел прочности при изгибе, плотность, водопоглощение, разбухание по толщине за 24 ч. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний композиционных материалов с включением текстильных отходов «секонд-хенд»

Образец	Результаты испытаний по показателям, ед.измерения					
	Плотность, кг/м ³	Разбухание по толщине за 24 ч, %	Водопоглощение, %	Ударная прочность	Деформативность: остаточное вдавливание, мм	Предел прочности при изгибе, МПа
1	795,6	0,45	18	Удар малым шаром: ≥ 20 Н; Удар шаром большого диаметра: ≥ 1600 мм.	0,02	-
2	734,87	2,65	30,2		0,08	7
3	1006,04	1,04	2,83		0,01	9
4	1014,61	5,6	2,25		0,01	12
5	961,33	0,9	19,2		0,02	11
6	699,72	12,4	76,2		0,15	5
7	930,34	4,7	28,7		0,02	6
8	797,56	10,13	28,38		0,12	-
9	919,58	0,96	3,77		0,01	11
10	963,37	1,53	7,96		0,02	5
11	940,93	2,07	8,81		0,02	11
12	852,52	6,05	6,22		0,02	8
13	942,72	2,61	45,15		0,2	-
14	795,43	5,95	23,48		0,05	7
15	740,34	13,95	26,9		0,09	-

Анализ результатов исследований показывает, что полученный композиционный материал соответствует эксплуатационным требованиям для настилочных материалов. На новый композиционный материал разработан проект технических условий, определены области использования.

Вторым направлением в использовании разволокненных отходов «секонд-хенда» является получение изоляционных материалов для наружного и внутреннего применения. В лабораторных условиях изготовлены образцы изоляционных материалов различной плотности и толщины. Отходы «секонд-хенда» являются смесью полимерных волокон, имеющих различную способность переходить в расплавленное состояние при воздействии температуры. Это свойство использовалось нами для получения изделий без применения связующего. Плотность образцов варьировалась от 50 до 250 кг/м³ при толщине 10–50 мм. Размер экспериментальных образцов составил 270×270 мм.

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ МАТРИЦЫ

К.В. Ефимчик¹, Е.Ф. Кудина^{1,2}

¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь; efim_by@mail.ru

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

Введение. Важнейшей из задач в получении новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) является подбор добавок и наполнителей, влияющих на совместимость полиолефинов с дисперсными компонентами в композиционной системе, уменьшение себестоимости готового изделия, а также обеспечения экологической безопасности изделия и последующего процесса рециклинга [1].

Цель. Разработка новых ПКМ на основе полипропиленовой матрицы и диспергированного шунгита, исследование механических свойств разработанного материала.

Материалы и методы. В качестве полимерного связующего использовали полипропилен марки PP 8300G (EPYS30RE).

В качестве наполнителя применяли дисперсный шунгит. Шунгит имеет сложный состав и содержит кварц, сложные силикаты, сульфиды, щелочные металлы и др. Интерес применения шунгита в качестве наполнителя для ПКМ вызван особенностями его химического строения, природным происхождением, экологической безопасностью, а также не высокой стоимостью [2].

Образцы изготавливали в соответствии с ГОСТ 4651-2014.

Результаты и их обсуждение.

Испытание образцов на сжатие проводилось в соответствии с ГОСТ 4651-2014 в лаборатории «Электрические и электронные системы» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта» на универсальной разрывной машине ТС244.31А.

Зависимость «напряжение (σ) / относительная деформация (ϵ_c)» для композиций с содержанием шунгита от 0,5 до 10 мас. % представлена на рисунке.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что введение шунгита в количестве от 0,5 до 4 мас. % нецелесообразно, т.к. прочность композиции уменьшается. При содержании шунгита в количестве от 5 до 7 мас. % прочность композиции увеличивается до 23 %. Введение наполнителя от 8 до 10 мас. % практически не влияет на прочность исходного материала, поэтому повышение концентрации наполнителя более 7 мас. % нецелесообразно.

После проведения испытаний, разрушенные образцы ПКМ подвергли вторичной переработке.

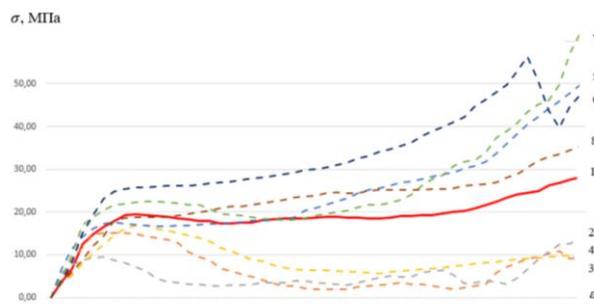


Рис. Зависимость «напряжение (σ , МПа) / относительная деформация (ϵ_c)» с содержанием шунгита в композиции: 1 – 0 мас. %; 2 – 0,5 мас. %; 3 – 1 мас. %; 4 – 2 мас. %; 5 – 3 мас. %; 6 – 5 мас. %; 7 – 7 мас. %; 8 – 10 мас. %

Полученные результаты на сжатие показали, что механические характеристики разрабатываемого материала после повторной переработки ухудшаются не более чем на 2 %. Таким образом, шунгит может быть использован для повышения прочности при сжатии композиционных материалов на основе полипропилена, которые могут подвергаться рециклингу без существенной потери прочности.

Выводы. Результаты проведенных исследований показали, что введение от 5 до 7 мас. % шунгита в полипропилен марки PP 8300G (EPYS30RE) позволяет получить ПКМ с улучшенными механическими характеристиками. Оптимизация концентрационных соотношений наполнитель/ПП позволяет повысить прочность композиции до 23 %.

Для переработки ПКМ с шунгитом не требуется дополнительное оборудование, а механические характеристики после рециклинга ухудшаются не более, чем на 2 %. Таким образом, изготовление изделий на основе модифицированного шунгитом полипропилена позволяет получить экологически безопасный материал с повышенной прочностью, не оказывающий негативного влияния на окружающую среду в процессе жизненного цикла изделия, а также повторного использования его в качестве вторичного сырья.

1. Шаповалов В.М., Григорьев, А.Я. Рециклинг и утилизация многокомпонентных полимерных систем на основе вторичных термопластов (обзор) // Полимерные материалы и технологии. — 2021 (7), № 3, 6—19
2. Воробьева Е.В., Волнянко Е.Н., Мацуткевич Я. Особенности применения диспергированного шунгита в качестве наполнителя для ингибированного полиэтилена // Полимерные материалы и технологии. — 2020 (6), № 4, 86—92

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОПРАВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПНЕВМОЭКСТРУЗИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

М.А. Коваленко, К.В. Овчинников, В.М. Шаповалов

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь; mikhaikovalenko1991@gmail.com

В процессе применения разборных оправок при производстве аэраторов из полиэтилена высокого давления установлено снижение их плотности (увеличении продуваемости) в центре изделия с характерной шириной участка аэратора в пределах 15 см. При эксплуатации таких аэраторов, учитывая высокое сопротивление его остальных участков, значительное количество воздуха будет проходить через небольшой участок по центру изделия, что будет способствовать увеличению пузырьков воздуха и уменьшению эффективной зоны аэрации. В связи с этим были проведены исследования по распределению величины перепада давления по длине готового изделия и выявлены вероятные причины его появления, предложены варианты решения данной проблемы.

Цель работы: определение вероятных причин появления эффектов снижения плотности участков аэраторов и возможных вариантов их решений.

Материалы и методы исследования

В работе исследовались аэраторы, изготавливаемые на разборных оправках. В процессе нанесения волокнисто-пористой массы производилось тепловизионное исследование распределение температуры по длине изделия, а после изготовления измерение продуваемости поверхности аэратора. Данные заносились в таблицы и анализировались.

В процессе изготовления аэраторов производилось уплотнение волокнисто-пористой массы.

Результаты и их обсуждение

В результате исследования были определены две вероятные причины появления участков с повышенной продуваемостью. Механический фактор путём использования изношенных оправок, создающих биение с максимумом амплитуды в центре изделия, что приводит к «отталкиванию» ролика от оправки во время её вращения. Наиболее вероятным физическим фактором минимизации эффективной зоны аэрации представляется влияние массивного металлического соединительного конусного узла на процесс формирования пневмоэкструзионного изделия. Таким образом формируется по центру изделия область с повышенной теплопроводностью (сильным теплоотводом) и массой, обладающей высокой общей теплоёмкостью. Волокно, осаждаясь на поверхность оправки, охлаждается равномерно по всей длине, отдавая температуру металлическому телу оправки.

На рисунке 1 показано распределение показателя перепада давления по длине оправки.

На рисунке 2 показано распределение температуры волокнисто-пористой массы по длине оправки при наборе толщины изделием в процессе его формирования.

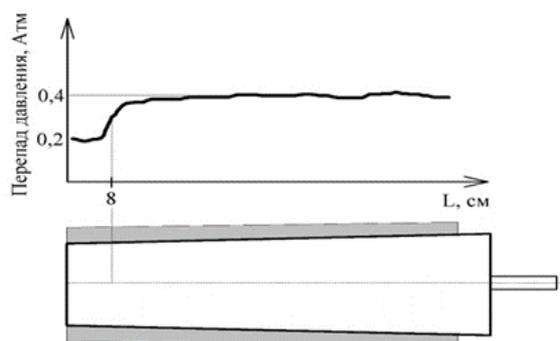


Рис. 1. Распределение величины показателей перепада давления по длине оправки

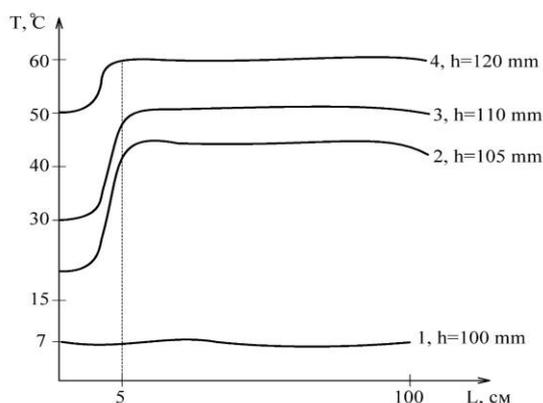


Рис. 2. Распределение температуры по длине волокнисто-пористого изделия

Распределение температуры ВП массы в зависимости от места (при удалении от центра) на оправке показало, что до начала нанесения ВП массы, температура оправки равномерна и практически не зависит от места её измерения. После нанесения тонкого слоя (2,5 мм), температура оправки поднимается до 45 °С, при этом в центре присутствует область шириной 10 см с температурой в 20 °С. Тенденция сохраняется на всём временном промежутке получения ВПИ. Таким образом одним из возможных вариантов решения данной проблемы является изготовление оправок с равномерными теплофизическими свойствами, а при необходимости чередующимися участками с различной теплоёмкостью.

ЭКОЛОГИЧНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА И КОМПОНЕНТОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

О.В. Конакова, Н.С. Винидиктова, В.М. Шаповалов, М.А. Коваленко

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; konakovaolga08@gmail.com

Введение. Жизнедеятельность человека в значительной мере связана с использованием полимерных материалов, что приводит к образованию бытовых отходов, засоряющих окружающую среду. Одним из способов решения данной проблемы является использование биоразлагаемых полимерных материалов. Несмотря на то, что в мире насчитывается более 100 видов различных биоразлагаемых полимеров, сдерживающим фактором их широкого применения является высокая стоимость. Проблема разработки доступных экологических материалов остаётся актуальной.

Цель настоящей работы – исследовать возможность получения биоразлагаемых композиционных материалов (БКМ) на основе полилактида и растительных отходов.

Материалы и методы. В работе использовали ПЛА 4043D (США), гречневая лузга (ГЛ), древесные опилки (ДО), масло вазелиновое (МВ, ГОСТ 3164). Образцы БКМ получали методом экструзионной переработки на лабораторном экструдере SUPLAST 25/2мм. Образцы подвергали испытаниям на водопоглощение (ГОСТ 4650). Диски из БКМ диаметром 50 ± 1 мм и толщиной $3,0 \pm 0,2$ мм, помещали в ёмкость с водой при $T = 23,0 \pm 2,0$ °С, периодически производили взвешивание. Испытания на биоразложение проводили по ускоренной лабораторной методике. Образцы помещали в готовый компост при $T = 30 \pm 2$ °С. Оценка производили гравиметрическим методом и внешним осмотром.

Результаты и их обсуждение. Для экспериментальных исследований готовили 2 группы образцов: 1) ПЛА+ДО (30–80%), 2) ПЛА+ГЛ (40–75%). В обеих группах МВ использовали в качестве пластификатора.

В ходе испытаний на водопоглощение отмечено, что масса образцов ПЛА(100) в течение 3 месяцев практически не изменялась (рис. 1), а наполненных ГЛ и ДО более 50 мас. % увеличилась до 10 % уже через 24 ч (рис. 1). Кроме того, у наполненных образцов уже на 9 сутки боковые поверхности образцов разбухали, появлялись трещины, а через 2 месяца на поверхности был зарегистрирован активный рост микроорганизмов, что, очевидно, является свидетельством способности материала к биоразложению.

Испытания на биоразложение проводили в течение 7 месяцев с периодической (раз в месяц) оценкой изменения массы. После извлечения образца из компоста проводили визуальную оценку, подсушивали в течение 1 ч и очищали от компоста. Отмечено, что после 1 месяца испытаний у всех образцов изменился

цвет и увеличилась масса: ПЛА(100) на 0,5 мас. %; при наполнении 30 % до 4 мас. %, 70 % до 17 мас. %.

При визуальной оценке на поверхности наполненных образцов был отмечен рост колоний микроорганизмов, что является свидетельством способности композиционного материала к биоразложению (рис. 2). Установлено, что через 3 месяца масса наполненных образцов стала снижаться, через 7 месяцев их масса снизилась на 7–20 мас. % соответственно, а масса ПЛА(100) осталась без изменений. Из композитов ПЛА+ДО(60) и ПЛА+ГЛ(50) были сформованы изделия в форме крышек (рис. 2, в)

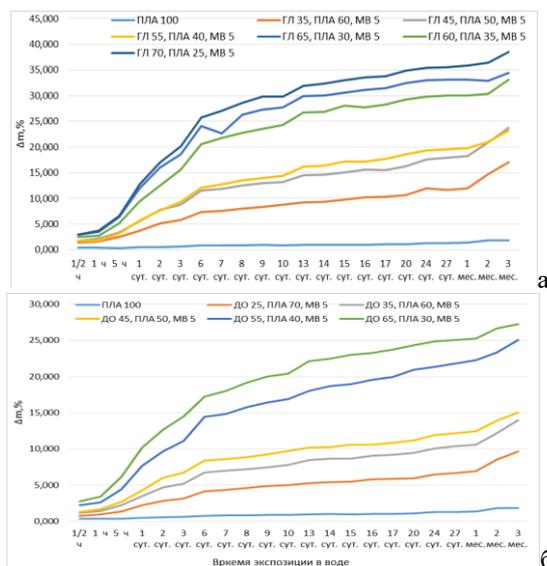


Рис. 1. Испытание образцов на водопоглощение: а – ПЛА+ГЛ; б – ПЛА+ДО



Рис. 2. Образцы БКМ: с ДО (а), ГЛ (б) после компостирования. Образцы сформованных изделий из наполненного ПЛА (в)

Заключение. Установлено, что композиции из ПЛА, наполненного растительными компонентами, интенсивнее разлагаются, сохраняют способность к формованию, обладают более низкой стоимостью.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 4.2.2, НИР 2.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.Ф. Луцко¹, В.В. Рубаник¹, В.В. Рубаник мл.¹, А.А. Казьмин²

¹Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Беларусь; ita@vitebsk.by

²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

Основной деталью современных фильтроэлементов (рис. 1) является штора, изготовленная из фильтровальной бумаги зигзагообразной складчатой формы, которая обеспечивает большую площадь поверхности фильтрации. Фильтровальная бумага имеет множество мелких пор и представляет собой матрицу из натуральных и синтетических волокон, пропитанных полимерной смолой, которая придаёт ему дополнительную жёсткость и прочность.



Рис. 1. Конструкция гидравлического фильтра (а) и фильтроэлемента (б)

Основным этапом процесса сборки фильтроэлемента является соединение концевых складок шторы.

Методом механического и клеевого соединения. Сборка шторы происходит обжимом на прессе U-образной металлической скобой её концевых складок. Сам же процесс изготовления скобы включает в себя следующие операции: резку металлического листа на полосы, вырубку из них заготовок под скобу, гибка заготовки и нанесение на неё цинкового покрытия гальваническим способом. Очевидно, что подготовка к процессу сборки шторы требует больших энергетических, временных и трудовых затрат, а также является экологически опасной. Экран изготавливают из перфорированного электрокартона путём вальцовки с последующим склеиванием внахлёт его концевых участков. Клеевое соединение экологически небезопасно и имеет длительный цикл отверждения.

В Институте технической акустики Национальной академии наук Беларуси разработана технология и оборудование для сборки шторы и экрана фильтроэлементов методом ультразвуковой сварки.

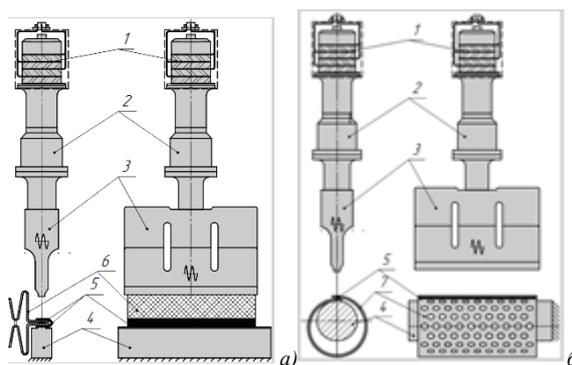


Рис. 2. Схема соединения концевых секций фильтроэлементов методом ультразвуковой сварки: а – вид шторы до сварки, б – после УЗ сварки; 1 – излучатель, 2 – бустер, 3 – волновод-излучатель, 4 – опора, 5 – вставка из ПВХ, 6 – штора, 7 – экран

Соединение двух концевых участков шторы и экрана фильтроэлемента проводили на установке мощностью 1,2 кВт с рабочей частотой 20 кГц (рис. 2). В силу того, что в составе бумаги и электрокартона недостаточное количество термопластичного полимерного материала для образования прочного сварного соединения, сварка этих материалов невозможна. Для получения прочного сварного шва в качестве связующего материала между слоями бумаги и картона вводили полосу из поливинилхлорида (ПВХ) шириной 3 мм и толщиной 0,5 мм. При этом, вместо металлической скобы использовали полимерную из ПВХ.

Разработанная технология соединения деталей фильтроэлементов методом УЗ сварки с использованием термопластичного полимерного материала ПВХ в качестве клеевого расплава может с успехом заменить методы механического и клеевого соединения шторы и экрана. При этом производительность процесса изготовления фильтроэлемента возрастает до 5 раз.

ВОЛОКНИСТЫЙ СЕРОСОДЕРЖАЩИЙ ПОЛИАМФОЛИТ НА ОСНОВЕ НИТРОНА-Д

В.В. Матусевич, А.П. Поликарпов, В.Ж. Ворса, А.А. Шункевич, Г.В. Медяк, З.И. Акулич,
О.И. Исакович

Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;
vmatus@ifoch.bas-net.by

Актуальность работы. Волокнистые сильнокислотные катиониты востребованы во многих областях науки и техники. Однако, эти материалы дороги и сложны в производстве. В частности, волокнистый сульфостирольный катионит ФИБАН К-1 получается радиационной прививочной сополимеризацией стирола с дивинилбензолом на полипропиленовых волокнах с последующим сульфированием в дихлорэтане [1]).

Цель работы заключалась в разработке нового сильнокислотного катионита путём полимераналогичных превращений Нитрона-Д.

Материалы и методы исследования. Нитрон-Д произведен на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», Беларусь. Его модификация проведена путём химической прививки органической сульфокислоты, содержащей первичные аминогруппы, к нитрильным группам нитрона при 373–393 К. Обменные ёмкости (ОЕ) по amino-, сульфо- и карбоксильным группам определены по стандартным методикам. ИК спектр зарегистрирован на Фурье ИК спектрофотометре «Nicolet iS50». Элементный анализ проведён на CHNOS элементном анализаторе vario MICRO Cube. Сорбция аммиака в динамических условиях из воздушно-аммиачной смеси изучена при $298,2 \pm 0,1$ К, активности воды в газовом потоке (a_w) 0,35, концентрации NH_3 в потоке 21 мг/м^3 , скорости потока $3,75 \text{ см/с}$, толщине слоя сорбента $0,6 \text{ см}$ при объёмной плотности $0,15\text{--}0,17 \text{ г/см}^3$. Изопиестические исследования ионитов при различной активности паров воды проведены при $298,2 \pm 0,1$ К. Рассчитаны эквивалентные коэффициенты влагоёмкости K_3 , представляющие собой число молей воды, приходящееся на один эквивалент функциональных групп полимера.

Изучены свойства двух известных ионитов: сильнокислотного катионита ФИБАН К-1 [1] и карбоксильного катионита ФИБАН К-6 [2]. Все иониты исследовались в H^+ -форме.

Результаты и обсуждение. Ионообменные ёмкости исследованных образцов были следующие, мг-экв./г, $\text{OЕ}_{\text{SO}_3\text{H}}/\text{OЕ}_{\text{COOH}}/\text{OЕ}_{\text{аминны}}$: ФИБАН К-7 – 2,1/2,64/1,2; ФИБАН К-1 – 3,1/0/0; ФИБАН К-6 – 0/4,4/1,4. ФИБАН К-7 содержал 7,79 мас. % серы. Из рис. 1 видно, что ФИБАН К-6 при $a_w = 0,35$ не поглощает NH_3 , а ФИБАН К-7 занимает промежуточное положение между ним и ФИБАН К-1. Это свидетельствует о присутствии в ФИБАН К-7 сильнокислотных групп ($-\text{SO}_3\text{H}$).

В ИК спектре ионита ФИБАН К-7 присутствует набор полос поглощения, характеристичных для SO_3H – группы (см^{-1}): 514; 578; 734; 803; 1028; 1260.

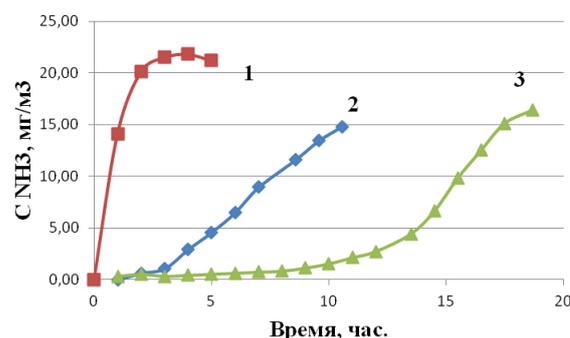


Рис. 1. Кривые проскока аммиака: 1 – ФИБАН К-6; 2 – ФИБАН К-7; 3 – ФИБАН К-1. Условия сорбции – в тексте

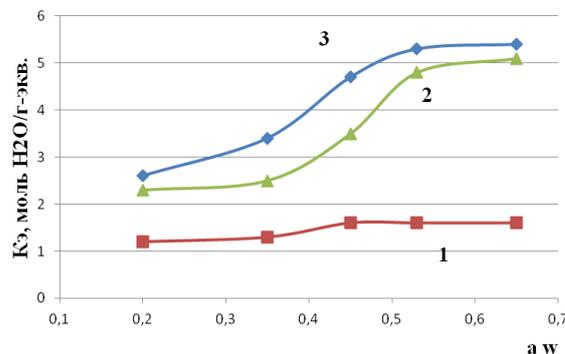


Рис. 2. Зависимость эквивалентных коэффициентов влагоёмкости K_3 ионитов ФИБАН от активности воды: 1 – ФИБАН К-6; 2 – ФИБАН К-7; 3 – ФИБАН К-1. Кривая 2 рассчитана для $\text{OЕ}_{\text{SO}_3\text{H}} = 2,1 \text{ мг-экв./г}$

Выводы. Синтезированный ионит ФИБАН К-7 представляет собой полиамфолиит с сульфо- и карбоксильными группами и умеренным содержанием слабых аминогрупп, превосходящий по сорбционным свойствам по NH_3 и коэффициенту K_3 аминокарбоксильный ионит ФИБАН К-6.

- Шункевич А.А. Синтез, структура и свойства волокнистых ионитов ФИБАН // Химия и технология новых веществ и материалов: сб. науч. тр. / Ин-т физ.-орг. химии НАН Беларуси; под ред. А. В. Бильдюкевича. — Минск: Технопринт. — 2005, 158–188
- Медяк Г.В., Шункевич А.А., Ворса В.Ж., Исакович О.И., Поликарпов А.П. Волокнистые аминокарбоксильные иониты ФИБАН К-6 и К-6М для очистки воды от ионов тяжелых металлов // Сорбционные и хроматографические процессы. — 2023 (23), № 4, 471–478. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11540>

СОРБЕНТЫ БОРА НА ОСНОВЕ ПРИВИТЫХ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ВОЛОКОН

Г.В. Медяк¹, З.И. Акулич¹, А.А. Шункевич¹, А.П. Поликарпов¹, И.В. Воронюк²

¹Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь; medyakg@ifoch.bas-net.by

²Воронежский Государственный университет, Воронеж, Россия

Актуальность работы связана с решением проблемы очистки воды для питьевых нужд, поскольку имеют место локальные превышения концентраций бора в поверхностных и подземных водах вблизи атомных электростанций, металлургических, керамических и фармацевтических производств, а также сельскохозяйственных угодий, где были использованы борсодержащие препараты.

Анализ технико-экономических проблем удаления бора из природной воды [1] показал, что наиболее эффективными являются сорбционные процессы с использованием синтетических ионообменных смол. Однако организация технологии очистки воды требует современных решений, которые предполагают легко наращивать мощности, заменять и регенерировать картриджи.

Цель настоящей работы заключалась в разработке волокнистых сорбентов бора, которые бы не уступали их гранульным аналогам и могли быть использованы в виде картриджей, в том числе в малогабаритных установках очистки воды.

Волокнистые сорбенты бора были получены на основе полипропиленовых (ПП) волокон с привитым сополимером стирола и дивинилбензола путём хлорметилирования и последующей модификации N,N'-метилглюкозаминном (МГА). Сравнительные исследования сорбционных свойств полученных ионитов и гранульного борселективного сорбента PURESIN PS 470 (Китай) проводили в статических условиях из модельного раствора, содержащего 0,004 М Н₃ВО₃ на фоне 0,1 М NaCl. Массовое соотношение сорбента и раствора 1:400. Определение бора в растворе до и после сорбции проводили с использованием методов титрования бора щёлочью в присутствии маннита [2] и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Сорбцию бора из раствора характеризовали величинами сорбции *S*, степени извлечения *R* и коэффициента распределения *D* между ионитом и раствором [3].

Результаты и обсуждение. По результатам сорбционных исследований (рис. 1 и табл. 1) можно сделать следующие выводы. Сорбционные характеристики сорбентов бора с МГА: гранульного PURESIN PS 470 и волокон ФИБАН на основе хлорметилированного полипропиленового (ПП) волокна с привитым сополимером стирола и дивинилбензола (ДВБ) находятся на одинаковом уровне.

Причём, сорбционная ёмкость сорбентов ФИБАН на слабосшитых волокнах (0,5 и 1,0 % ДВБ)

немного выше, а на более сшитых (2,0 и 4,0 % ДВБ) немного ниже, чем на гранульном сорбенте PURESIN. Возможно также влияние на сорбционные свойства волокнистых сорбентов содержания в привитых образцах хлорметильных групп, по которым происходит присоединение МГА.

Таблица 1. Физико-химические и сорбционные свойства волокнистых и гранульного сорбентов бора

Образец	ДВБ, %	Cl, %	W, г Н ₂ O/г	CE, мг/г
ФИБАН МГА №26	0,5	18,7	0,31	12,8
ФИБАН МГА №29	1,0	18,7	0,29	11,5
ФИБАН МГА №25	2,0	~12	0,29	7,9
ФИБАН МГА №28	4,0	17,4	0,29	9,6
PURESIN PS 470			0,72	9,9

Примечание. W – набухание образцов в форме свободного основания, CE – сорбционная ёмкость образцов по бору

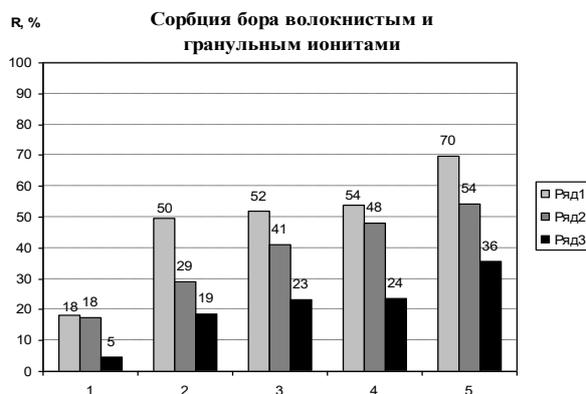


Рис. 1. Степени извлечения бора из модельного раствора волокнистыми сорбентами: МГА №26 (ряд 1), МГА №25 (ряд 3) и гранульным сорбентом PURESIN PS 470 (ряд 2). Номера по оси X отражают время сорбции: 1 – 0,5 часа, 2 – 2 часа, 3 – 4 часа, 4 – 6 часов, 5 – 24 часа

Выводы. Разработаны волокнистые аналоги гранульных сорбентов бора с МГА, обладающие близкими сорбционными характеристиками и имеющие преимущества, как в скорости сорбции, так и возможности их использования в виде картриджей.

- Самбурский Г.А. Анализ технико-экономических проблем удаления бора из природной воды // Вестн. МИТХТ. — 2011 (6), № 4, 118—125
- Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методы анализа природных вод. — М.: Недра. — 1970
- Грачек В.И. и др. Сорбционные свойства нового волокнистого хелатного ионита // Весці НАН Беларусі. Серыя хімічных навук. — 2020 (56), № 2, 206—211

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАНУЛЯТА

А.Н. Радюк, П.Л. Лукатенок

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь; ana.r.13@mail.ru

Введение. Круговая экономика – это бизнес-модель, которая минимизирует потребление сырья и образование отходов [1].

Модель круговой экономики обычно состоит из трех основных принципов: проектирование без отходов и загрязнений, сохранение продуктов и материалов высочайшего качества и восстановление природных систем. Кроме того, эта круговая система может быть достигнута с помощью структуры 9 R [2].

Круговая экономика создаёт замкнутый цикл процесса, в котором образующиеся отходы обрабатываются как сырьё на последующих этапах производства [1].

Основной идеей замкнутого ресурсного цикла является то, что отходы производства и потребления должны снова превратиться в сырьё, а это сырьё снова необходимо преобразовать в продукт [3].

Основная часть. Одним из вариантов превращения отходов в сырьё и дальнейшее преобразование в продукт является производство гранулята отходов полиуретанов посредством замкнутого цикла переработки и реализации его на предприятии ЧПУП «Обувное ремесло». Основной сферой деятельности данного предприятия является производство деталей низа обуви с использованием вторичных ресурсов. Предприятие предполагает использовать 5 тонн образующихся отходов полиуретанов, среди которых: облой, литники, выпрессовки, «сталактиты», бракованные подошвы и прочее и около 70 тонн отходов, получаемых от других предприятий.

На основе этих отходов можно получить новый продукт – гранулят отходов полиуретана, который можно использовать и реализовать на сторону как в виде готового продукта, так и в виде изделий, изготовленных на его основе.

Получение гранулята как готового продукта осуществляется посредством операций, представленных на рисунке 1. Полученный продукт является конечным для дальнейшего использования в производстве.

Получение гранулята как побочного продукта предполагает после повторного дробления (резки) осуществлять изготовление изделий традиционными методами переработки пластмасс: литье на термопластавтоматах, образующиеся при этом отходы повторно вовлекаются в производственный процесс, тем самым «замыкая» цикл переработки.

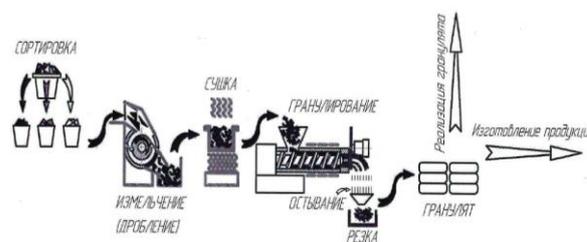


Рис. 1. Технология получения гранулята

Полученный гранулят можно использовать как полимерную матрицу, модификация которой позволит обеспечить выпуск изделий с заданными свойствами. Основным направлением модификации свойств композиционных полимерных материалов является использование стабилизаторов и пластификаторов для получения различных монолитных по структуре деталей низа обуви, порообразователей для получения пористых подошв обуви и наполнителей – волокнисто-наполненных подошв обуви.

В таблице 1 представлены физико-механические свойства исходного гранулята отходов ППУ (ППУгр) и полимерной основы (ПО), содержащей помимо отходов ППУ стабилизатор кальция и индустриальное масло.

Таблица 1 – Физико-механические свойства образцов

Образец	ρ , г/см ³	H, усл. ед.	V_i , мм ³ /м	ϵ , %	σ , МПа	E, МПа
ППУгр	1,22	88	1,04	120	16,2	19,4
ПО	1,23	86	0,86	140	15,0	24,2

Анализируя полученные данные, можно отметить, что применение модификаторов уменьшает износ и увеличивает упругие свойства композита.

Заключение. Представленная технология позволяет получить однородный по свойствам гранулят, а модификация его различными добавками – обеспечивает различный комплекс свойств под товары определённого назначения.

1. Pęczek E, Pamuła R, and Białowiec A. Recycled Waste as Polyurethane Additives or Fillers: Mini-Review // *Materials*. — 2024; 17(5):1013
2. Chairat S. and Gheewala Sh. Life cycle assessment and circularity of polyethylene terephthalate bottles via closed and open loop recycling // *Environ Res*. — 2023 Nov 1;236(Pt 1):116788
3. Novikova O., Vladimirov I., and Bugaeva T. Expansion of the Fuel and Energy Balance Structure in Russia through the Development of a Closed-Loop Recycling // *Sustainability*. — 2021; 13(9):4965.

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ И ПРОДУКТОВ РЕЦИКЛИНГА ШИН ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.Н. Усова, В.Н. Коваль, С.А. Герасименко

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; viktoriya.usovav@mail.ru

Введение

Ежегодно в мире образуется огромное количество отходов в виде вторичных полимерных материалов, из которых значительная часть приходится на отработанные автомобильные покрышки. Для решения проблемы по утилизации полимерных отходов активно создаются и совершенствуются технологии по использованию вторично переработанных материалов. Одним из актуальных направлений в технологии утилизации является инновационный подход, основанный на использовании вторичного кордного волокна в сочетании с отходами разных типов полимерных материалов в производстве различных конечных продуктов по экструзионно-прессовой технологии (ЭПТ). Наиболее важными преимуществами ЭПТ являются возможности получения крупногабаритных изделий из вторичных композитов неконтролируемого состава с изменяющейся в широких пределах вязкостью расплава при более низких давлениях, действующих на элементы оснастки, что позволяет существенно упростить конструкцию пресс-формы по сравнению с литьевыми формами и обеспечивает одновременно снижение их стоимости и увеличение срока службы [1].

Цель работы – создание инновационных композиционных материалов на основе полимерных отходов и вторичного кордного волокна для получения изделий строительного назначения по экструзионно-прессовой технологии.

Материалы и методы исследований

В настоящей работе объектами исследования служили вторичное кордное волокно (ВКВ), образующееся после отделения резиновой крошки при переработке утилизированных шин, и отходы полимерных материалов, основная часть которых представляет собой полиолефины. В качестве компатибилизатора для совместимости компонентов смеси использовали уникальный модификатор, разработанный в ИММС НАН Беларуси.

Компаундирование композитов осуществляли путём смешения компонентов в расплаве. Для этого использовали экструзионно-грануляционную линию на базе двухшнекового экструдера «TSSK-35/40» («Zhangjiagang Jorbin Machinery Co.», КНР). Образцы для оценки показателей механических свойств материалов изготавливали на термопластавтомате

«EN-30» («Cheng Heng Industrial Co.», Тайвань) с диаметром шнека 35 мм и объёмом впрыска 30 см³ [2].

Показатели механических свойств материалов при растяжении определяли согласно ГОСТ 11262 при скорости перемещения подвижного захвата 50 мм/мин на универсальной машине «AGS-X» (Shimadzu, Япония).

Определение коэффициента трения проводили согласно ГОСТ 11629 при скорости скольжения 0,05 м/с и нагрузке 1,5 МПа. В качестве контртела использовали ролик диаметром 40 мм из стали 40Х твёрдостью 30 HRC и образец композита в виде вкладыша с размерами 20×10 мм.

Испытания на абразивный износ материала проводили согласно ГОСТ 11012 на машине «APGi 613.10» («Fritz Heckert», ГДР) по абразивной бумаге P80 с зернистостью 180–212 мкм. Путь трения составлял 44 м при скорости 0,30 ± 0,05 м/с и нагрузке 6 Н.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований влияния рецептурного состава и технологических режимов получения смесей вторичного кордного волокна с полимерными отходами на свойства конечных полимерных композитов показали, что они обладают высокими деформационно-прочностными показателями, повышенной ударной вязкостью, атмосферно- и абразивостойкостью, а также улучшенной технологичностью. Улучшенный комплекс свойств разработанных смесевых композитов обусловлен тем, что за счёт введения в их объём вторичных волокон кордной ткани шин, представляющих собой полиамидные и полиэфирные нити, обеспечивается эффективное армирование конечного материала. Эти обстоятельства позволяют применять данный вторичный композит для изготовления в изделия строительного назначения.

1. Патент 14871 РБ. Машина для формования изделия из полимерного материала по экструзионно-прессовой технологии; патентообладатель ИММС НАН Беларуси. N а 20081110; заявл. 2008.08.25; опубл. 2010.04.30. / Герасименко С.А., Песецкий С.С., Коваль В.Н.
2. Коваль, В.В. Разработка композитов на основе вторичного кордного волокна для дорожного строительства / В.Н. Коваль, Се Юнгуан, С.А. Герасименко, Цзян Бо, В.Н. Адериша, Ян Цзянь, В.В. Дубровский // Полимерные материалы и технологии. — 2021, № 4, 17—23

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ В ЗАДАЧАХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

В.М. Шаповалов

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь; shapovalov@mpri.org.by

Предпосылкой устойчивого развития Республики Беларусь в экономике и в качестве жизни нынешних и будущих поколений является обеспеченность их ресурсами, так как экстенсивный рост потребления ресурсов способствует определённой сырьевой зависимости экономики и приводит к обострению экологических проблем, связанных с воздействием на окружающую среду. Становление технологически развитой державы, интеграция в мировую экономику невозможны без поиска способов эффективного и экологически обоснованного использования природных и техногенных ресурсов. Эта задача может быть решена за счёт создания ресурсосберегающих и экологически чистых технологий и материалов, обеспечивающих решение экологических проблем и охрану окружающей среды.

Полимерные отходы представляют собой огромный рынок ценного сырья, способного заменить первичное сырьё. Примером реализации такого подхода представляется рециклинг вторичных полимерных материалов, развиваемый в ИММС НАН Беларуси. Решение этих проблем позволит создавать новые перспективные многокомпонентные полимерные системы на основе вторичного полимерного сырья, обеспечивающие эффективную утилизацию полимерных отходов, в том числе, разнородных, и получение на их основе качественной продукции. Захоронения полимерных отходов могут приводить к загрязнению почвы, воды и опасному воздействию на живые организмы. Примером таких материалов являются одноразовые пластиковые пакеты, которые стали мировой экологической проблемой, прежде всего, в мировом океане. Их замена на биоразлагаемые материалы представляется хорошей альтернативой, например, изготовленные из полилактида, что предполагает их разложение на окись углерода и воду. Одним из примеров таких композиций являются материалы с использованием растительных производных, в частности, древесная мука, гречневая и рисовая шелуха, льнокостра и др.

В ИММС НАН Беларуси с 80–90-х годов XX века проводятся исследования по созданию высоконаполненных композитов (до 70–80 мас. %) на основе термопластичных полимеров и лигноцеллюлозных наполнителей (древесина, целлюлоза,

лигнин, сельскохозяйственные культуры и др.) методом экструзионного компаундирования, в частности, древеснополимерных композитов (ДПК).

Примером экологически чистых технологий являются фильтрационные системы. Особенно это касается предприятий топливно-энергетического и машиностроительного комплекса. Существует проблема очистки воздуха от конденсата (воды). Аналогичные проблемы существуют и при производстве и применении адсорбционных систем, применяемых для сбора различных загрязнений, в том числе разливов нефтепродуктов. В Институте предложено решать этот вопрос путём комбинированных подходов, включающих использование новых разновидностей волокнисто-пористых фильтрующих материалов, подвергнутых тем или иным видам физического или физико-химического модифицирования. Вариантами реализации такого подхода являются решения по гибриднему наполнению полимерной матрицы функциональными модификаторами, по использованию смесей полимеров, в том числе компатибилизированных, а также по применению высокоэнергетического физического воздействия на волоконный материал.

В ИММС НАН Беларуси проводятся разработки создания биосовместимых полимерных покрытий на текстильные сосудистые импланты. В результате найдены решения по поиску альтернативных биологических материалов и разработка модифицированных сосудистых кондуитов путём нанесения композиционных полимерных материалов, обладающих антимикробным потенциалом, снижающих адгезионные свойства бактерий и препятствующие образованию микробной биоплёнки на поверхности кондуита.

Представленные материалы относятся к понятию «зелёных технологий» и должны удовлетворять их основным принципам в композиционном материаловедении. Применительно к «зелёной инженерии» 12 принципов охватывают некоторые из наиболее важных технологических процессов и направлены на развитие важных методологий, отвечающих за установление нового мышления научно-инженерных сотрудников и содействующих изменению парадигмы: от экстенсивного к устойчивому развитию с акцентом на максимальное сохранение природы и, соответственно, человека.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2025)

24—27 июня 2025 г., Гомель, Беларусь

TEMPERATURE-SENSITIVE MEMBRANES FUNCTIONALIZED WITH PEGYLATED POLY(N-ISOPROPYLACRYLAMIDE)-BASED MICROGELS FOR PROTEIN FILTRATION

A.A. Fedorenko¹, T.V. Plisko¹, S.V. Kostjuk², K.S. Burts¹, and A.V. Bildyukevich¹

¹Institute of Physical Organic Chemistry, Minsk, Belarus; sashfedorenko@gmail.com

²Sorbonne Universite, CNRS, IPCM, Equipe Chimie des Polymeres, Paris, France

Modern membrane science aims to develop interactive membranes capable of altering their properties in response to environmental stimuli. The approach to design such membranes involves functionalization with thermo- or pH-responsive microgels. These hydrogel-modified membranes are expected to demonstrate reduced protein fouling. PEGylation of microgels enhances their hydrophilicity, thereby decreasing protein adsorption on their surface. The aim of this study was to develop “smart” ultra- and microfiltration membranes with reversible thermo-responsive behavior.

Materials and methods. *N*-isopropylacrylamide and polyethylene glycol with a terminal methacrylate group (500 g/mol) were used as co-monomers for microgel synthesis in a 10:1 weight ratio. An ultrafiltration polysulfone membrane with a molecular weight cut off of 300 kDa (PS-300) and microfiltration polyamide 0.2 μm membrane (PA-0.2) developed by the Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, were selected as substrates for modification. Microgels were immobilized on the membrane surface via dead-end filtration of aqueous solutions containing synthesized microgel, polyvinyl alcohol ($M_n=27$ kDa), glutaric aldehyde, and hydrochloric acid at a trans-membrane pressure of 0.1 MPa. The modified membranes were subsequently impregnated with glycerol and dried at 50 °C that results in crosslinking of the polyvinyl alcohol matrix and fixation of the microgel on the surface and within the pores of the membranes. Reference membranes were treated only with polyvinyl alcohol to account for surface hydrophilization (PS-300 and PA-0.2). Filtration of bovine serum albumin (BSA) was carried out for 30 minutes at 20 and 40 °C. After filtration at both temperatures the permeate and retentate were collected for analysis, and membranes were cleaned by water filtration at 0.1 MPa and 50 °C for 15 min.

Results and discussion. It was found that the synthesized microgel exhibited thermo-responsive behavior, with particle size decrease from 375 nm at 20 °C down to 115 nm at 50 °C, as measured by dynamic light scattering technique. As expected, the modified membranes also demonstrated thermo-responsive properties (fig. 1). The membranes' water permeability coefficient (L_v^0) which takes into account viscosity of the feed medium was used to reliably compare membrane performance at different temperatures. The L_v^0 of the PS-300 membrane stays almost constant between 20 and 50 °C. In contrast, the pristine PA-0.2 membrane demonstrated significant decline in L_v^0 with the increase in temperature, that is presumably

due to polymer network relaxation and pore shrinkage at elevated temperature. For both PS-300 and PA-0.2 membranes modified with microgels (PS-300 MG and PA-0.2 MG) L_v^0 increased with the rise of temperature. Initially L_v^0 of both modified membranes decreases to approximately 30 L m⁻² h⁻¹ mm² s⁻¹ at 20 °C, indicating that swollen microgels hindered water flow by occupying membrane pores. As the temperature approached 35 °C, the microgels began to collapse and their size is reduced. This change in microgel size led to a rise in L_v^0 . Notably, L_v^0 increases by a factor of 4 for PS-300 MG and by a factor of 38 for PA-0.2 MG membrane when the temperature of the feed water increases up to 50 °C.

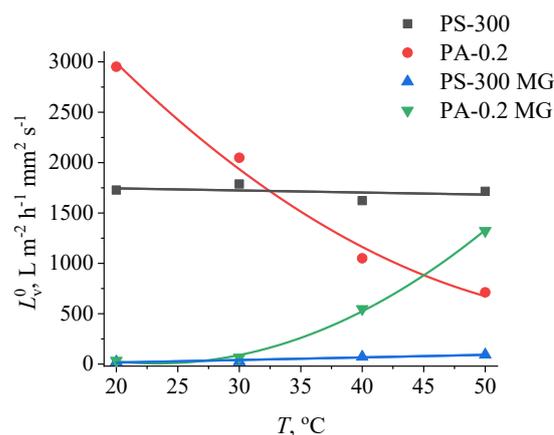


Fig. 1. Membrane permeability coefficient as a function of temperature

Table 1 presents the rejection of BSA (R_{BSA}) and the flux recovery ratio (FRR) of the microgel-modified membranes. The rejection of both membranes decreased to zero as the temperature increased up to 40 °C. Furthermore, subsequent cleaning with hot water (50 °C) in filtration mode resulted in a high FRR . These results indicate that the developed microgel-modified membranes demonstrate reversible temperature-dependent flux and rejection of BSA and high antifouling performance which makes them promising for the separation of multi-component protein mixtures.

Table 1. Rejection of BSA and flux recovery ratio of microgel-modified membranes

Membrane	R_{BSA} (20 °C), %	R_{BSA} (40 °C), %	FRR , %
PS-300 MG	65	0	100
PA-0.2 MG	51	0	83

NEW METHOD OF PRODUCTION OF SOLID LUBRICANT COATINGS WITH DENSE STRUCTURE OF WS₂ FOR THE SPACE INDUSTRY

V. Levchenko^{1,2,3,4*}, J. Yu^{1,2,3,4}, P. Zhang^{1,2,3,4}, P. Ying^{1,2,3,4},
J. Wu^{1,2,3,4}, A.Ya. Grigoriev^{2,5}, D. Gutsev^{2,5}, N.K. Myshkin^{2,5}, and T. Yang^{1,2,3,4}

¹School of Materials Science and Engineering, Taizhou University, Taizhou, China; vladlev@yahoo.com

²International Joint Institute of Advanced Coating Technology, Taizhou University, Taizhou, China

³Wenling Research Institute of Taizhou University, Taizhou, China

⁴Zhejiang Provincial Key Laboratory for Cutting Tools, Taizhou University, Taizhou, China

⁵Metal-Polymer Research Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Purpose. As part of international cooperation, a new technology for the production of solid lubricants based on WS₂ has been developed for the space industry. This article explores and describes the tribological properties of these lubricants.

Technology and materials. The solid lubricant coatings with dense structure WS₂ were produced using MAIP/HIPIMS composite deposition using an ion-arc/magnetron sputtering composite coating machine that was developed at the International Joint Institute of Advanced Coating Technology in conjunction with Beijing Powertech Technology Co., Ltd., Beijing, China [1]. Pure Ti targets (99.9 % purity) for MAIP and WS₂ targets (99.9 % purity) for HIPIMS were selected; the working gas was Ar (purity 99.9 %). Polished stainless-steel sheets (20 mm × 20 mm × 2 mm) and monocrystalline silicon wafers (100 mm) were used as substrate materials and ultrasonically cleaned in acetone.

Before film deposition, the vacuum chamber was pumped to 5×10^{-3} Pa, with the chamber temperature raised to 100 °C. Ar gas was introduced to maintain a deposition air pressure of 0.8 Pa. Subsequently, a 5-min Ti ion-plasma cleaning was performed, with the bias voltage and frequency set at 800 V and 20 kHz, respectively. Subsequently, a Ti layer with a thickness of approximately 200 nm was deposited as a transition layer using MAIP with an arc current of 60 A. The bias voltage and frequency were set at 400 V and 40 kHz, respectively. Finally, HIPIMS was used to deposit the WS₂ thin films. The voltage, current, power, pulse frequency, and pulse width of the HIPIMS power supply were 570 V, 8 A, 1000 Hz, and 300 s, respectively. The deposition time is 60 min.

Result and discussion. The tribological properties of the deposited WS₂ thin films were analyzed at sliding frequencies varying between 5 and 25 Hz with a step size of 5 Hz, using a friction and wear testing machine in a linear reciprocating sliding mode with a load of 10 N. Fig. 1 shows the coefficient of friction (COF) of the WS₂ thin films prepared by MAIP/HIPIMS composite deposition at different sliding frequencies. As shown in the figure, the WS₂ film possesses a low COF of ~ 0.1 at sliding frequencies of 5, 10, 15, and 20 Hz. At a sliding frequency of 25 Hz, the COF curves of the thin film began to fluctuate after 1050 s before gradually increasing,

indicating that the lubrication properties of the films gradually deteriorated. The tribological properties of the WS₂ thin film prepared only using HIPIMS were tested under the same conditions at different sliding frequencies. When the sliding frequency exceeded 15 Hz, the COF curves of the thin film increased and the wear resistance deteriorated [2]. Therefore, the composite deposition imparted the WS₂ thin film with a stable and low COF and enhanced the continuous lubrication performance at higher sliding frequencies.

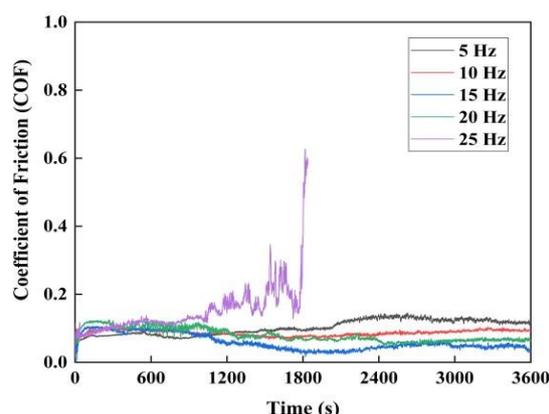


Fig. 1. COF of the WS₂ thin film at different sliding frequencies

Conclusion. The composite deposition technique reduces the adhesive wear at high frequencies while enhancing the bonding of the film, thereby improving the wear resistance of the film at high frequencies.

Acknowledgements. The authors are grateful for the financial support from the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China under grant No. LQ22E010007 and No. LTZ20E020001.

1. Yu J., Zhang P., Ying P., Lin C., Yang T., Wu J., Li C., Huang M., and Levchenko V. Tribological Properties of Hard TiB₂ Thin Films Prepared at Low Temperatures Using HIPIMS // *Coatings*. — 2024; 14(4):492
2. Ying P., Zhang P., Wu J., Huang M., Lin C., Wang T., Fang Y., and Levchenko V. Effect of applied load on the tribological properties of MoS₂-TiL/MoS₂-TiH nano-multilayer coating // *AIP Advances*. — 2020 (10), 105303
3. Yu J., Zhang P., Ying P., Lie C., Lin C., Yang T., Wu J., Li C., Wang T., Myshkin N., and Levchenko V. Tribological properties of WS₂ thin films with improved adhesion using MAIP/HIPIMS composite deposition // *J. of MRT*. — 2025 (36), 3936—3948

THERMAL STABILITY AND PROPERTIES OF (Al, Cr, Ti, Si, Y)N MULTIELEMENT NITRIDE COATINGS AFTER HIGH-TEMPERATURE TREATMENT

J. Wu^{1,2,3}, P. Zhang^{1,2,3*}, and V. Levchenko^{1,2,3*}

¹International Joint Institute of Advanced Coating Technology, Taizhou University, Taizhou, China

²Wenling Research Institute, Taizhou University, Taizhou, China

³Zhejiang Provincial Key Laboratory for Cutting Tools, Taizhou University, Taizhou, China

*Corresponding e-mail: zhangp03@126.com, vladlev@yahoo.com

Introduction. The thermal stability and properties of multielement nitride coatings, such as (Al,Cr,Ti,Si,Y)N, are critical for high-temperature applications like cutting tools, aerospace components, and industrial machinery. These coatings are designed to maintain structural integrity, oxidation resistance, and mechanical properties at elevated temperatures. (Al,Cr,Ti,Si,Y)N coatings fabricated by multiarc-ion plating exhibited superior thermal stability versus AlTiN. Annealing at 900 °C achieved peak hardness (40.8 GPa), retaining 33.7 GPa at 1100 °C, while AlTiN degraded above 800 °C. The coating's wear rate remained stable ($\sim 2 \cdot 10^{-6}$ mm³/N·m) below 1000 °C, doubling at 1100°C. Phase transition to wurtzite occurred at 1100 °C vs. 900 °C for AlTiN, demonstrating enhanced high-temperature performance.

Preparation Before deposition, the chamber was increased to 100 °C and evacuated to $5 \cdot 10^{-3}$ Pa. Cr plasma etching (60 A, -800 V, 0.3 Pa Ar) cleaned substrates for 20 min. At 500°C, (Al,Cr,Ti,Si,Y)N layers were deposited using Ar gas and -150 V pulse bias, ensuring strong adhesion.

Result and discussion Fig. 1 presents SEM micrographs of as-deposited (Al,Ti)N and (Al,Cr,Ti,Si,Y)N coatings. Both coatings exhibit dense microstructures in surface and cross-sectional views. Characteristic arc-ion-plating features, including molten droplets and surface defects [1], are visible in the top-surface morphology.

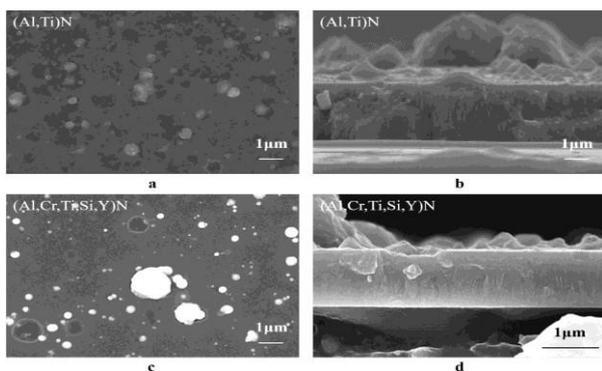


Fig. 1. SEM images showing (a, c) the surface morphologies and (b, d) cross-section of the coatings

The (Al,Cr,Ti,Si,Y)N coating exhibited superior phase stability versus (Al,Ti)N during annealing (Fig. 2). At diffraction peaks maintained consistent positions but broadened with temperature, developing arcions above 800 °C. Stress relaxation at 800 °C caused peak shifts, while 900°C annealing produced maximum (111)

peak broadening. Shoulder peaks emerged at 1000 °C, signaling spinodal decomposition without w-AlN formation. The w-AlN phase only appeared at 1100°C, evidenced by intensified shoulder peaks and new diffraction signals, indicating progressive fcc wurtzite transformation. Notably, even at 1100 °C, the original fcc peaks remained detectable with persistent shoulder features, demonstrating incomplete phase conversion. This contrasts sharply with (Al,Ti)N, which showed complete w-AlN transformation at lower temperatures [2—4].

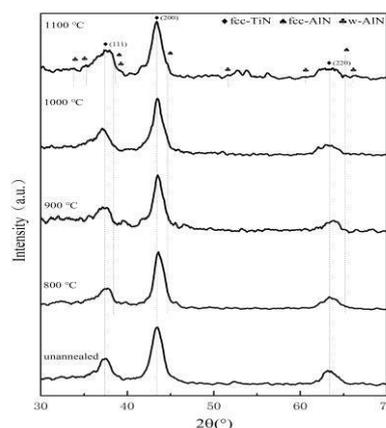


Fig. 2. GIXRD patterns of the (Al, Cr, Ti, Si, Y)N coatings annealed at different temperatures

Acknowledgements: The research was financially supported by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LQ22E010007 and No. LTZ20E020001), Wenling Key Research and Development Project (No. 2023G00007), and Taizhou Science and Technology Plan Project (No. 22gya09)

1. Panjan P., Drnvek A., Gselman P., et al. Review of Growth Defects in Thin Films Prepared by PVD Techniques // *Coatings*. — 2020 (10), 447
2. Li M., Cai F., and Zhang S. Influence of vacuum annealing on structures and mechanical properties of Al-Ti-N films deposited by multi-arc ion plating // *Current Applied Physics*. — 2013 (13), 1470—1476
3. Ying Y.P., Sun H., Zhang P., Lin Ch., Yang T., Wu J., Huang M., Wang T., Lian Z., and Levchenko V. Preparation and tribological properties of WS₂ solid lubricating coating with dense structure using HIPIMS // *Journal of Materials Research and Technology*. — 2024 (32), 530—540
4. Zhou J, Hu C, Zhang J, et al. Effect of B-doping on the mechanical properties, thermal stability and oxidation resistance of TiAlN coatings // *International Journal of Refractory Metals & Hard materials* — 2021 (98), 105531.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MULTILAYER MoN/TiN COMPOSITE COATINGS PREPARED BY HIPIMS

J. Xu^{1,2,3}, P. Zhang^{1,2,3*}, J. Wu^{1,2,3}, and V. Levchenko^{1,2,3*}

¹International Joint Institute of Advanced Coating Technology, Taizhou University, Taizhou, China

²Wenling Research Institute, Taizhou University, Taizhou, China

³Zhejiang Provincial Key Laboratory for Cutting Tools, Taizhou University, Taizhou, China

*Corresponding e-mail: zhangp03@126.com; vladlev@yahoo.com

Purpose. Study of tribological properties of multilayer MoN/TiN composite coatings obtained using HIPIMS technology.

Introduction. Monolithic TMN coatings often suffer from an inherent trade-off between hardness and toughness, resulting in premature failure under high-load or prolonged friction conditions [1, 2]. To address this challenge, TiN, MoN, and a multilayer MoN/TiN composite coating were fabricated using high-power impulse magnetron sputtering (HIPIMS). Their tribological performance was systematically evaluated under varying loads and sliding conditions. The results demonstrate that the multilayer MoN/TiN coating exhibits superior wear resistance and lower friction coefficients compared to its monolithic counterparts, highlighting its potential for advanced tribological applications.

Preparation. The multilayer MoN/TiN coatings were deposited via HiPIMS using 99.9 % pure Ti and Mo targets in an Ar atmosphere. Si wafers and WC-Co substrates (YG8) were used for characterization and mechanical testing, respectively. Prior to deposition, substrates were heated to 100 °C, etched with Ti plasma (60 A, –800 V, 0.3 Pa Ar) for 20 min, then heated to 300 °C. Layers were deposited at –150 V bias.

Result and discussion. Figure 1 shows the MoN/TiN composite coating exhibits a denser microstructure and smoother surface morphology. This enhanced structural uniformity originates from the multilayer architecture, where the alternating TiN and MoN layers generate periodic interfaces that effectively suppress columnar grain growth while ensuring more homogeneous particle distribution.

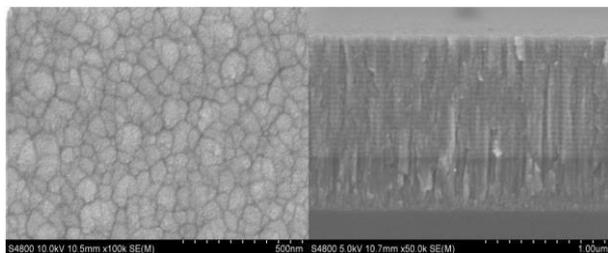


Fig. 1. SEM images of the surface morphology of the MoN/TiN coating and the cross-sectional morphology

The tribological properties of the MoN/TiN composite coating under different friction loads were tested. The wear rate W is tested by the following formula [3]:

$$W = V / (F \times L)$$

where W is the wear rate ($\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$); V are volume (mm^3); F is the applied load (N); and L is the total sliding length (m).

Friction and wear tests (Fig. 2) revealed that the MoN/TiN coating maintained a low and stable COF (~ 0.3 – 0.45) under loads up to 20 N, with wear rates considerably lower than those of the TiN and MoN coatings. Although the MoN/TiN multilayer coating exhibited substrate exposure at 25 N, its critical load capacity markedly exceeded those of monolithic TiN and MoN [4, 5].

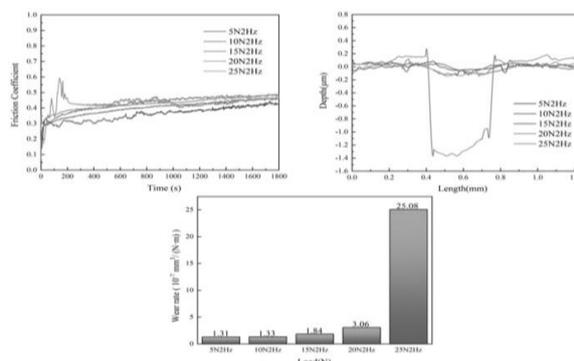


Fig. 2. The friction coefficient, wear profile and wear rate of the MoN/TiN composite coating under different loads

Acknowledgements. The research was financially supported by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LQ22E010007 and No. LTZ20E020001), Wenling Key Research and Development Project (No. 2023G00007), and Taizhou Science and Technology Plan Project (No. 22gya09)

1. Wang T., Zhang G., Ren S., et al. Effect of nitrogen flow rate on structure and properties of MoN_x coatings deposited by facing target sputtering // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2017 (701), 1–8
2. Czettl C., Schleinkofer U., and Michotte C. Coating Applications for Cutting Tools // *Comprehensive Hard Materials*. — 2014 (1), 453–469
3. Ying Y.P., Sun H., Zhang P., Lin Ch., Yang T., Wu J., Huang M., Wang T., Lian Z., and Levchenko V. Preparation and tribological properties of WS₂ solid lubricating coating with dense structure using HIPIMS // *Journal of Materials Research and Technology*. — 2024 (32), 530–540
4. Wu B., Gao S., Xue W., et al. Designing TiB₂/Cr multilayer coatings on Ti6Al4V substrate for optimized wear resistance // *Surface Science and Technology*. — 2024 (2), 1–18
5. Wang T., Zhang J., Li Y., et al. Self-lubricating TiN/MoN and TiAlN/MoN nano-multilayer coatings for drilling of austenitic stainless steel // *Ceramics International*. — 2019 (45), 24248–24253

STUDY ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF DENSE AND HARD TiB₂ THIN FILMS PREPARED USING HIPIMS

J. Yu^{1,2,3}, P. Zhang^{1,2,3*}, J. Wu^{1,2,3}, and V. Levchenko^{1,2,3*}

¹International Joint Institute of Advanced Coating Technology, Taizhou University, Taizhou, China

²Wenling Research Institute, Taizhou University, Taizhou, China

³Zhejiang Provincial Key Laboratory for Cutting Tools, Taizhou University, Taizhou, China

*Corresponding e-mail: zhangp03@126.com; vladlev@yahoo.com

Purpose. Study of tribological properties of dense and hard TiB₂ thin films obtained using HIPIMS. This research would contribute to the understanding of structure-property relationships in HIPIMS-deposited TiB₂ films and their potential for demanding tribological applications.

Introduction. Titanium diboride (TiB₂) thin films have attracted significant attention due to their exceptional mechanical properties, including high hardness, wear resistance, and thermal stability. High-power impulse magnetron sputtering (HIPIMS) is an advanced physical vapor deposition technique that produces dense, hard coatings with excellent adhesion. Magnetron-sputtered WS₂ composite thin films are solid lubricants with excellent performances [1–3]. However, the low hardness of the WS₂ thin films necessitates the further improvement of their wear resistance. For this purpose, an effective strategy is to alternately deposit or co-deposit WS₂ and a hard phase, such as TiB₂, to form hard lubricant thin films [4, 5]. In this study, TiB₂ thin films were deposited at low temperature (100 °C) under the same conditions as previously prepared WS₂ thin films obtained with a dense structure and low coefficient of friction (~0.1).

Research method. Deposition of TiB₂ films at 100 degrees Celsius using HIPIMS technology. Pure Ti targets and pure TiB₂ targets were used. The deposition temperature and air pressure were 100°C and 0.8 Pa, respectively, and a Ti layer with a thickness of 0.4 μm was deposited as a transition layer to improve the adhesion between the film and substrate. The power voltage, current, pulse frequency, and pulse width of HIPIMS during TiB₂ deposition were 580 V, 85 A, 1000 Hz, and 60 μs, respectively.

Result and discussion. The TiB₂ thin film surface exhibits a dense structure and satisfactory surface quality with no obvious defects; however, the grain size is not uniform.

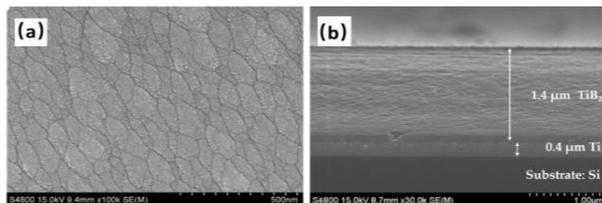


Fig. 1. SEM images of (a) the surface morphology of the TiB₂ thin film at ×100 k and (b) the cross-sectional morphology at ×30 k

HIPIMS has high deposition energy, so the deposited films always show layer growth and exhibit dense

structures. The tribological properties of TiB₂ thin films under different friction loads and frequencies were tested. The wear rate W is tested by the following formula:

$$W = V / (F \times L)$$

where W is the wear rate ($\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$); V are volume (mm^3); F is the applied load (N); and L is the total sliding length (m).

Tribological tests show that this thin film has a relatively high coefficient of friction (ranging from 0.6 to 0.8), but its wear resistance is excellent (minimum wear rate = $1.96 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$).

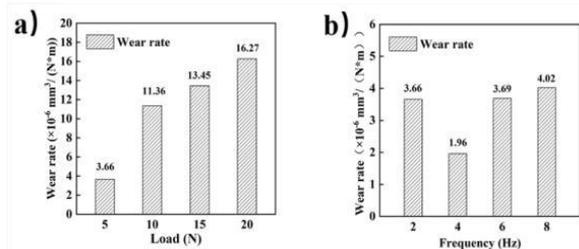


Fig. 2. Histogram of the wear rate of the TiB₂ thin film (a) under different loads at a sliding frequency of 2 Hz; (b) at different sliding frequencies under a load of 5 N

Acknowledgements. The research was financially supported by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LQ22E010007 and No. LTZ20E020001), Wenling Key Research and Development Project (No. 2023G00007), and Taizhou Science and Technology Plan Project (No. 22gya09).

1. Yu X., Deng W., and Chen X. Macroscopic superlubricity enabled by the tribopair of nc-Ag/MoS₂ and hydrogenated graphitic-like carbon films under high contact stress // *Applied Surface Science*. — 2023 (611), 155814.
2. Simonovic K., Vitu T., Cammarata A., et al. Tribological behaviour of W-S-C coated ceramics in a vacuum environment // *Tribology International*. — 2022 (167), 107375.
3. Randhawa K.S. and Prajapati J.B. Hygroscopicity Analysis and Tribo-mechanical Characterizations of Conditioned PA6/MoS₂/h-BN Hybrid Composite // *Journal of inorganic and organometallic polymers and materials*. — 2023 (33), 625–635
4. Ying P., Sun H., Zhang P., Lin Ch., Yang T., Wu J., Huang M., Wang T., Lian Z., and Levchenko V. Preparation and tribological properties of WS₂ solid lubricating coating with dense structure using HIPIMS // *Journal of Materials Research and Technology*. — 2024 (32), 530–540
5. Jin-long L., Hong-xuan L., Li J., Xiao-hong L., and Ding-jun Z. Tribological Properties of TiB₂ Doped WS₂ Composite Films in Wide Temperature Range // *Surface Technology*. — 2023, (52), 235–245

MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Cu40Zn-Ti₃AlC₂ COMPOSITES BY POWDER METALLURGY

S. Zhou¹, F. Peng¹, T. Yang^{1,2,3,4*}, L. Wu⁵, J. Wu^{1,2,3,4}, P. Ying^{1,2,3,4}, P. Zhang^{1,2,3,4}, Ch. Lin^{1,2,3,4},
Y. Fu^{1,4}, Z. Tu^{1,4}, T. Wang^{1,4}, X. Zhang⁶, N.K. Myshkin⁷, and V. Levchenko^{1,2,3,4*}

¹School of Materials Science and Engineering, Taizhou University, Taizhou, China

²International Joint Institute of Advanced Coating Technology, Taizhou University, Taizhou, China

³Wenling Research Institute, Taizhou University, Taizhou, China

⁴Zhejiang Provincial Key Laboratory for Cutting Tools, Taizhou University, Taizhou, China

⁵Tiangong Aihe Co., Ltd., Danyang, China

⁶Ningbo Boway Alloy Material Co., Ltd., Ningbo, China

⁷Metal-Polymer Research Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

*Correspondence e-mail: yangtaotzc@tzc.edu.cn; vladlev@tzc.edu.cn

Purpose. Research on Cu-MAX composites has been extensive, confirming the benefits of MAX as a reinforcing material [1, 2]. However, studies on Cu40Zn-MAX composites are scarce. The unique layered structure of MAX is believed to be beneficial to the mechanical properties and machinability of Cu40Zn brass. Therefore, this study aims to prepare Cu40Zn-Ti₃AlC₂ composites and investigate the effects of Ti₃AlC₂ on the microstructure, mechanical properties, and tribological properties of Cu40Zn brass.

Method of study. A hardness test was conducted using a micro-Vickers hardness tester at a load of 0.2 kg (HV 0.2) and a loading time of 15 s. A three-point bending test was carried out on samples with a dimension of 3×4×25 mm using an electronic universal testing machine at a crosshead speed of 0.2 mm/min. The tribological performance of Cu40Zn-Ti₃AlC₂ composites was characterized using a universal abrasion tester by dry reciprocating sliding at a force of 2 N, frequency of 5 Hz, stroke length of 5 mm and total time of 5 min. An AISI 52100 ball with a diameter of 6.3 mm was chosen as the counterpart. The morphology of the wear track was observed by a white-light interference 3D microscope and analyzed using Mountains Map Imaging Topography 9 software equipped with MFT-5000. The wear constant W was calculated as follows:

$$W = V / (F \cdot L),$$

where V is the volume loss of the composites, F is the applied load and L is the total sliding distance.

Materials and methods. Water-atomized Cu40Zn powders and Ti₃AlC₂ powders with purities better than 99% were used as raw materials. Cu40ZnxTi₃AlC₂ (x = 0, 0.5, 1, 3, 5 wt.%) composites (abbreviated as M0, M0.5, M1, M3, M5, respectively) were prepared using high-energy ball milling followed by hot-pressing (HP) sintering. Powder mixtures of Cu40Zn and Ti₃AlC₂, with a total mass of 100 g were ball-milled by a high-energy planetary ball mill with stainless steel jars and GCr15 balls under the protection of an argon atmosphere. The milling speed, ball-to-powder ratio and total milling time were 200 rpm, 14:1 and 10 h, respectively. To avoid the serious cold welding of powders, 1 wt.% stearic acid (SA) was added as a process control agent (PCA). The milled

powders mixtures were hot-pressed at a sintering temperature of 750 °C, pressure of 30 MPa and holding time of 1 h. After HP sintering, cylindrical samples of 30 ± 1 mm in diameter and 15 ± 1 mm in height were received.

Result and discussion. Cu40Zn-Ti₃AlC₂ composites were fabricated by high-energy milling followed by hot-pressing sintering. The effects of the Ti₃AlC₂ content (0, 0.5, 1, 3, 5 wt.%) on the microstructure and mechanical properties were investigated. The conclusions are as follows:

(1) The sintered Cu40Zn-Ti₃AlC₂ composites are mainly composed of α and β phases. ZnO is found in samples M0 and M0.5, which can be suppressed by Ti₃AlC₂. The β content increases with the increasing Ti₃AlC₂ content due to the outward diffusion of the β -forming element Al from Ti₃AlC₂ to the surroundings.

(2) The hardness of Cu40Zn-Ti₃AlC₂ composites increases significantly with the increasing Ti₃AlC₂ content due to the suppression of soft ZnO, the strengthening effect of hard Ti₃AlC₂, the solid solution strengthening of Al and the increased hard β content.

(3) The flexural strength of Cu40Zn-Ti₃AlC₂ composites increases with the Ti₃AlC₂ content, while the plasticity increases first and then decreases. Proper Ti₃AlC₂ content can improve both the strength and plasticity of the composites by suppressing soft ZnO, bearing load during the deformation process and adjusting the contents of ductile α and strong β reasonably. Meanwhile, excessive Ti₃AlC₂ is harmful to the plasticity of the composites due to the high β content and its damage to the matrix continuity.

Acknowledgements. The research was financially supported by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LQ22E010007 and No. LTZ20E020001), Wenling Key Research and Development Project (No. 2023G00007), and Taizhou Science and Technology Plan Project (No. 22gya09).

1. Salvo C., Chicardi E., Hernández-Saz J., Aguilar C., et al. Microstructure, electrical and mechanical properties of Ti₂AlN MAX phase reinforced copper matrix composites processed by hot pressing // Mater. Charact. — 2021 (171), 110812
2. Zhao H., Feng Y., Qian G., Huang X., Guo S., and Sun X. Effect of Ti₃AlC₂ Content on Electrical Friction and Wear Behaviors of Cu-Ti₃AlC₂ Composites // Tribol. Lett. — 2019 (67), 96

УЛУЧШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И АБРАЗИВОСТОЙКОСТИ РЕЗИН НА ОСНОВЕ НАТУРАЛЬНОГО КАУЧУКА И ПОЛИОКСАДИАЗОЛЬНЫХ ВОЛОКОН СИЛАНОМ И НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫМИ КАУЧУКАМИ

В.Н. Адери́ха, Н.А. Марусенко, В.Н. Коваль

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь, vнад@tut.by

Введение. Важнейшими показателями качества шин грузовых авто, работающих в условиях бездорожья, являются стойкость к проколу, порезу, раздиру, абразивному изнашиванию. К числу перспективных способов повышения характеристик протекторных резин является усиление нано- и микроволокнами, модифицирование многофункциональными соединениями и низкомолекулярными каучуками (НМК), способными снизить вязкость сырых смесей, улучшить диспергирование компонентов и прочность их связи с матрицей. Ранее [1, 2] было обнаружено, что отдельное введение 2 % Si69 не влияет, но совместно с волокном Арселон (Арс) существенно повышает степень сшивки, малый модуль M10 (до 200 %), прочность при растяжении, твёрдость и абразивостойкость (до $\approx 17\%$) резин по сравнению с исходной, при этом эффект от введения НМК был меньше, чем от Si69. Представляло интерес продолжить исследование влияние Si69 и природы НМК на характеристики резин.

Цель работы – исследовать влияние повышенного содержания Si69 в сочетании с НМК и Арс на механические свойства и абразивостойкость резин на основе натурального каучука.

Объекты и методы исследований. Использовали короткие полиоксадиазольные волокна Арселон (Арс), низкомолекулярный гидроксилированный 1,4-цис полибутадиев марки Ефродиев Диол-73 (далее Диол), эпоксицирированный СКДН-НЭ и не содержащий активных групп СКДН-Н(Н) Ефремовского ЗСК, тегулерод ТУ 347, силан бис-[(3-триэтоксисилил)-пропил]-тетра-сульфид Si69, ZnO, S, 2-меркаптобензтиазол, натуральный каучук SVR-10. Резиновые смеси готовили в смесителе закрытого типа, механические свойства изучали методами статических и динамических механических испытаний; скорость абразивного изнашивания определяли на машине барабанного типа.

Результаты и их обсуждение. При содержании 4 мас. % Si69 введение Арс повышает прочность и удлинение при растяжении (рис. 1), а разбавление НК добавками Диол и СКДН-Н(Н) хотя и снижают их, но сохраняет на более высоком уровне по сравнению с исходным НК. В области малых деформаций составы с Арс отличаются повышенными модулями, при этом введение СКДН-Н(Н) и Диол на них мало влияет, а введение эпоксицирированного НМК СКДН-НЭ повышает.

Скорость абразивного изнашивания W с введением Арс, НМК и Si69 снижается (рис. 2). В отсутствие Si69 НМК+Арс снижают её на $\approx 6\%$, при 2 %

Si69 на $\approx 9\text{--}17\%$, при 4 % Si69 на $\approx 30\%$ (зависимости 1–3) по сравнению с исходной резиной, при этом корреляция между модулем M10 и W , отмеченная в [2] сохраняется. Данные ДМА свидетельствуют о незначительном влиянии модифицирования на фактор потерь.

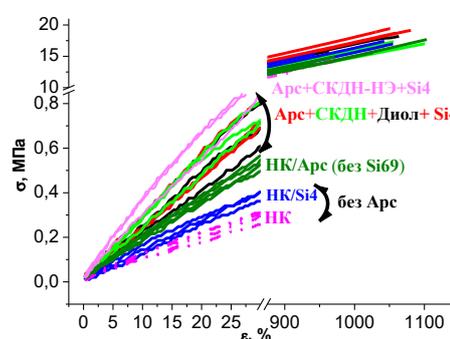


Рис. 1. Зависимости σ - ε при растяжении резин без Si69 (НК, НК/Арс) и с 4 % Si69 (НК/Si4, Арс, Арс+СКДН, Арс+Диол, Арс+СКДН-НЭ+Si4)

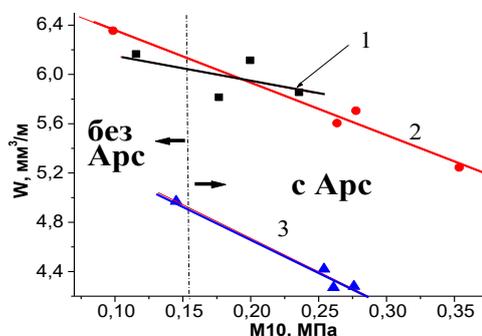


Рис. 2. Зависимость скорости абразивного изнашивания резин от содержания Si69. 1 – 0% 5, 2 – 2%, 3 – 4%

Заключение. Показано, что увеличение содержания Si69 до 4 мас. % повышает прочность и абразивостойкость как исходной, так и волокноармированных резин, при этом использованные НМК в последних эффективны в отсутствие силана, а по мере роста содержания Si69 их влияние на обсуждаемые показатели снижается.

1. Адери́ха В. Н., Коваль В. Н., Марусенко Н. А. Усиление резины на основе натурального каучука и технического углерода полиоксадиазольным волокном, силаном и низкомолекулярными каучуками // Полим. мат. техн. – 2023 (9), № 4, 50–59
2. Адери́ха В.Н., Марусенко Н.А. Абразивный износ резин на основе натурального каучука и полиоксадиазольного волокна // Трение и Износ. — 2024 (45), № 2, 89–100

ЛИОФОБНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Д.В. Брель¹, В.Ю. Шумская¹, А.З. Скороход²

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь; brel.dmitriy@mail.ru

Постановка задачи. В процессе лазерной переработки политетрафторэтилена (ПТФЭ) в вакууме при получении волокнисто-пористого материала (ВПМ) «Грифтекс» [1, 2] значительная часть распыляемого материала остаётся в виде полидисперсных частиц, осаждающихся на стенках вакуумной камеры. Использование данного материала представляет актуальную задачу, направленную на повышение экономической и экологической целесообразности процесса.

В данной работе предложен способ формирования функциональных слоев путем закрепления полидисперсных продуктов лазерной переработки ПТФЭ на подложке с использованием расплава полиэтилена (ПЭ) в качестве связующего агента.

Цель работы – исследовать возможность использования полидисперсных продуктов лазерной абляции ПТФЭ для получения нового материала и сравнить его характеристики с ВПМ «Грифтекс» и блочным ПТФЭ.

Материалы и методы. Для получения лиофобного материала использовали: полидисперсные продукты лазерной переработки ПТФЭ (размер частиц 0,2–600 мкм); подложка – сетчатая ткань (ячейка 300–320 мкм, нить 100 мкм) из полиэтилентерефталата (ПЭТФ); связующее – мелкодисперсный (100–150 мкм) порошок ПЭ.

Способ получения материала заключается в следующем: порошок ПЭ наносили и приплавляли к поверхности подложки при помощи ИК-нагрева. Затем на сетку с ПЭ наносили частицы ПТФЭ, прикладывали постоянную нагрузку и нагревали до температуры плавления ПЭ для закрепления частиц ПТФЭ в расплаве. Незакрепленные частицы ПТФЭ удаляли.

В качестве основных исследуемых характеристик в данной работе были выбраны лиофобность и морфология поверхности материалов.

Степень лиофобности определяли при помощи измерения краевого угла смачивания методом сидячей капли. Использовали следующие жидкости: дистиллированная вода, глицерин и 1-бромнатфалин.

Морфологию покрытия изучали на растровом электронном микроскопе «VEGA II LSH» («Tescan Instruments Analytical», Чехия).

Результаты и обсуждение

Изучена степень лиофобности поверхности исследуемых материалов (табл. 1).

Все исследованные материалы демонстрируют значительную гидрофобность (углы смачивания водой >90°), при этом «Грифтекс» и разработанный

ВПМ проявляют гидрофобные свойства.

Разработанный материал уступает «Грифтексу» на 5–7% по значениям краевого угла смачивания для всех тестируемых жидкостей, но превосходит блочный ПТФЭ на 20–25%, благодаря развитой морфологии поверхности.

Снижение показателей смачивания может быть связано с наличием полиэтиленовой матрицы, умеренно снижающей лиофобность, а также менее развитым рельефом поверхности материала.

При оценке морфологии материалов, отчётливо видно, что разработанный ВПМ имеет высокоразвитую структуру, как и ВПМ «Грифтекс» (рис. 1).

Таблица 1 – Значения краевого угла смачивания

Материал	Значение угла смачивания, °		
	вода	глицерин	1-бромнатфалин
ВПМ «Грифтекс»	137,5	134,7	131,4
Разработанный ВПМ	130,1	126,5	122,7
Блочный ПТФЭ	108,2	84,5	71,9

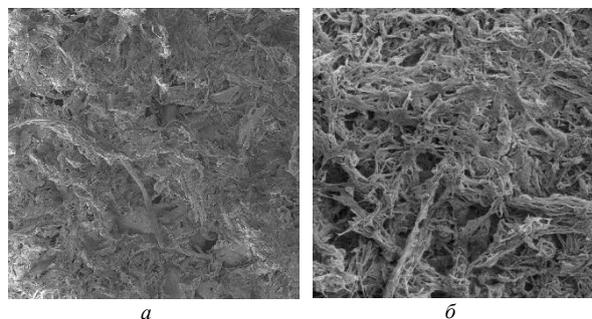


Рис. 1. Внешний вид поверхности исследуемых материалов: а – разработанный ВПМ; б – ВПМ «Грифтекс»

Стоит отметить высокую степень поровой структуры, однако в случае с разработанным ВПМ наблюдаются зоны с пониженной пористостью. Это связано с тем, что полиэтилен заполняет собой часть пор подложки и тем самым оказывает влияние на лиофобность данной поверхности.

- Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Рябенко И.Л. Фторопластовый волокнисто-пористый материал «Грифтекс» и фильтры «Гриф» // Материалы первой международной научно-практической конференции. «Трансфер технологий в свободных экономических зонах. Тенденции. Теория и практика. Транстех 2002» Гомель, май 2002. — 2002 (2), 132–133
- Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Калинин Л.А., Рябенко И.Л., Толстомятов Е.М., Красовский А.М. Лазерная абляция политетрафторэтилена // Российский химический журнал. — 2008 (52), № 3, 97–105

СВОЙСТВА ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА И СТЕКЛОПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ПРЕССОВАНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ СВОБОДНЫМ СПЕКАНИЕМ

А.С. Брундуков, П.Н. Гракович, И.В. Коваль

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и полимерные композиционные материалы (ПКМ) на его основе применяются в тяжело нагруженных ответственных узлах различного технологического оборудования. Это обусловлено уникальным комплексом свойств физико-механических и теплофизических свойств [1], однако высокая дороговизна исходного сырья и трудности в переработке делают его применение существенно ограниченным.

В связи с этим актуальным является разработка и применение альтернативных, более простых методов переработки термопласта, при реализации которых будет сохраняться высокий уровень его эксплуатационных характеристик.

Цель работы. Определение модуля упругости и плотности ПЭЭК и стеклонаполненных композитов на его основе, полученных методом холодного прессования со свободным спеканием (ХПСС).

Материалы и методы исследований. В работе использовали порошок ПЭЭК со средней фракцией частиц 75 мкм, наполненный неапретированным стекловолокном (СВ) с диаметром 14 мкм и длиной 50 мкм. Образцы были спрессованы на холоду и термически обработаны в печи в свободном состоянии.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139–69 после механической обработки. Модуль упругости при квазистатическом сжатии цилиндрических образцов со скоростью 2 мм/мин определяли по ГОСТ 4651–2014.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлены зависимости изменения модуля упругости при сжатии E и плотности от концентрации СВ в матрице ПЭЭК. С увеличением концентрации СВ плотность композитов увеличивается и при наполнении 30 мас. % соответствует уровню импортных экструзионных материалов [2].

Зависимость модуля упругости от концентрации СВ имеет тенденцию к росту. При этом значения модуля упругости для ненаполненного и наполненного 30 мас. % СВ ПЭЭК находятся на одном уровне с аналогами, которые были получены методом экструзии [3].

Тенденция к увеличению физико-механических характеристик при увеличении концентрации

наполнителя свидетельствует об отсутствии пор в полученных материалах и применимости метода ХПСС для переработки ПЭЭК и ПКМ на его основе.

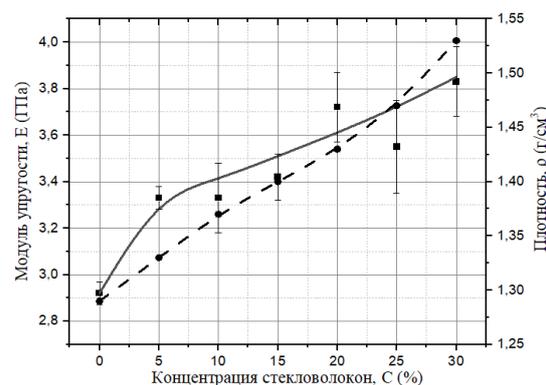


Рис. 1. Зависимости модуля упругости E и плотности ρ от концентрации стекловолокон C . Примечание: —■— зависимость модуля упругости E от концентрации C наполнителя; - -●- - зависимость плотности ρ от концентрации C наполнителя

Заключение. Модуль упругости и плотность ПЭЭК и ПКМ на его основе, которые были получены методом ХПСС, находятся на высоком уровне и соответствуют импортным аналогам. Тенденция к росту физико-механических характеристик с увеличением концентрации стеклонаполнителя сохраняется до наполнения 30 мас. %.

Применение ХПСС метода может упростить переработку ПЭЭК в сравнении с классическими методами (экструзия, литье под давлением, горячее прессование и др.), для которых требуется дорогостоящее сложное технологическое оборудование, а также существуют ограничения по номенклатуре выпускаемой продукции.

Ссылки на использованные источники

- Lyu H., Jiang N., Li Y., and Zhang D. Enhancing CF/PEEK interfacial adhesion by modified PEEK grafted with carbon nanotubes // *Composites Science and Technology*. — 2021 (210), no. April, P.108831
- Брундуков А.С., Гракович П.Н., Шилько И.С. Влияние степени наполнения стекловолокном на механические свойства композитов на основе полиэфирэфиркетона // *Полимерные материалы и технологии*. — 2025 (11), № 1, 64—69
- Брундуков А.С., Гракович П.Н., Шилько И.С. Сравнение механических характеристик полиэфирэфиркетона и стеклонаполненных композитов на его основе при статическом сжатии // *Полимерные материалы и технологии*. — 2024 (10), № 2, 83—88

ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ СИЛИКАТНОГО И УГЛЕРОДНОГО ТИПА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПОКСИДНЫХ КОМПАУНДОВ

С.Н. Бухаров¹, В.П. Сергиенко¹, В.К. Меринов¹, А.Р. Алексиев²

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; sbuharov@mpri.org.by

²Институт механики Болгарской академии наук, София, Болгария

Введение. Вязкоупругие свойства полимерных компаундов во многом определяют уровень гиротермических напряжений в конструкциях микроэлектронных устройств, а, следовательно, их надёжность и ресурс. Прогнозирование вязкоупругого поведения герметизирующих эпоксидных компаундов в условиях воздействия циклических климатических и эксплуатационных факторов является актуальной и трудноразрешимой проблемой в микроэлектронике. Работы над решением этих проблем ведутся исследовательскими центрами ведущих мировых производителей эпоксидных компаундов.

В реальных условиях эксплуатации в результате резонансных эффектов электронные компоненты могут подвергаться высоким динамическим нагрузкам в широком диапазоне частот, поэтому представляют интерес изучение вязкоупругого поведения композитов в средне- и высокочастотном диапазоне динамических нагрузок.

Цель работы — экспериментальное исследование влияния наноразмерных наполнителей на динамические механические характеристики эпоксидных компаундов методом резонансного вибрационного возбуждения в полосе частот 200–1100 Гц.

Материалы и методы. В качестве компонентов исследуемых компаундов использовали эпоксидную смолу ЭД-20 (ГОСТ 10587) и разбавитель Э-181 (ТУ 2225-606-11131395-2003). Для отверждения использовали отвердитель аминного типа Этал-45 М (ТУ 2257-045-18826195-01). Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) TUBALL (OCSiAl, РФ) в диапазоне наполнений 0,2–1,0 мас. % и монтмориллонит (МР) KSF (Sigma Aldrich Chemie GmbH, Швейцария) в диапазоне наполнений 1–10 мас. %, а также смесь этих нанонаполнителей (в соотношениях массовых долей: 0,2 : 1,0; 0,5 : 5,0; 1,0 : 10,0) использовали в качестве наполнителей силикатного и углеродного типа. Образцы для испытаний в виде прямоугольных балок размером 300×25×5 мм получали путём заливки в соответствующие формы с последующей выдержкой в течение 72 ч при температуре 20 ± 2 °С.

Исследование динамических механических характеристик проводили резонансным методом Оберста на установке «ETA Oberst Beam Method System» («Mecanum», Канада). Особенностью выбранного метода исследования состоит в возможности получения частотных зависимостей в диапазоне средних и высоких частот.

Результаты и их обсуждение. Динамические механические характеристики, представлены на рис. 1, демонстрируют влияние типа и концентрации силикатных и углеродных наномодификаторов на частотные зависимости вязкоупругих свойств эпоксидных компаундов испытанных образцов.

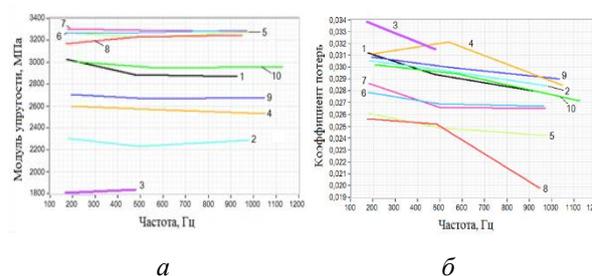


Рис. 1. Влияние типа и содержания наномодификаторов на частотные зависимости вязкоупругих свойств эпоксидных компаундов: динамический модуль упругости (а); коэффициент механических потерь (б)

Показано, что введение нанонаполнителей углеродного и силикатного типа приводит к взаимно противоположным по характеру влияния на динамические механические характеристики результатам. Наибольший рост динамического модуля упругости в исследуемой полосе частот 200–1100 Гц обеспечивает введение 5–10 мас. % МР. Обратный эффект наблюдается при использовании добавок углеродного типа: максимальные значения коэффициента потерь и одновременно минимальные значения динамического модуля упругости достигаются при концентрации 0,5 мас. %, ОУНТ. Максимальный рост коэффициента потерь достигается в диапазоне концентраций углеродных нанотрубок 0,5–1,0 мас. % (образцы 3 и 4, рис. 1) и составляет 9,6–12,1 % по сравнению с исходным образцом. При введении комбинированного наполнителя (МР+ОУНТ) его влияние на вязкоупругие свойства снижаются с ростом концентрации. Таким образом, использование комбинированного наполнителя, по сравнению с раздельным введением целевых добавок, является нецелесообразным.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, проект T23MЭ-040.

1. ASTM E756-05. Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials. US: ASTM International. — 2023

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЛЛОИДНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МАСЛЯНЫХ ЛИЗОЛЕЙ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ

Е.Н. Волнянко¹, К.А. Вислоух², Е.В. Воробьева²

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; volniano@mail.ru

²Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

Цель работы: исследование методами ИК-спектроскопии и УФ-ВИД-спектроскопии коллоидной устойчивости масляных лиозолей (МЛ), содержащих наноразмерные частицы, при воздействии ультразвука.

Материалы и методы. Для проведения экспериментов по оценке влияния воздействия ультразвука на агрегативную и седиментационную устойчивость масляных дисперсных систем использовали модельные системы на основе масла вазелинового фармацевтического ГФХ ст. 481 и минерального масла селективной очистки, не содержащего функциональных присадок, КС-19. В качестве дисперсной фазы использовали наноразмерные частицы: углеродные частицы различных аллотропных форм и гексагональный нитрид бора.

Наноразмерные частицы помещали в масла и подвергали механическому и ультразвуковому (УЗ) диспергированию дисперсной фазы. Механически частицы диспергировали, применяя магнитную мешалку. УЗ сонообработку частиц в маслах проводили, используя ультразвуковую ванну SONOREX («BANDELIN Electronic»), колебаниями резонансной частоты 35,5 кГц при повышенной температуре 50 °С в течение 20 мин до получения МЛ с равно распределёнными частицами. Для качественной оценки коллоидной стабильности МЛ применяли седиментационный метод, основанный на оценке объёма осадка, выпадающего в течение заданного промежутка времени. Седиментацию наблюдали в бюксах с притёртой крышкой. УФ-ВИД-спектры лиозолей получали на спектрофотометре UV VIS PB 2201 («Солар»). ИК-спектры снимали на Фурье-спектрофотометре Vertex 70 («Brüker»).

Результаты и их обсуждение

Визуально установлено, что и минеральное, и вазелиновое масла после УЗ сонообработки становятся мутными. Очевидно, что сонообработка меняет молекулярную структуру масел, вероятнее всего, разрушая парафиновые и другие молекулы с большой молекулярной массой, а также их межмолекулярные связи. Это предположение подтверждается УФ-ВИД-спектрами, из которых получено, что и вазелиновое, и минеральное масло после механической и после УЗ сонообработки достигают 100%-го поглощения на длине волны около 700 нм и 1000 нм соответственно.

Информация, полученная методом ИК-спектроскопии, позволяет получить не только качественные, но и количественные данные о коллоидной стабильности МЛ. ИК-спектры МЛ, полученных механическим воздействием и УЗ сонообработкой имеют принципиальные отличия. В спектре масел, подвергшихся УЗ сонообработке, обнаружена дополнительная оптическая полоса поглощения 1603 см⁻¹. Появление полосы в ИК-спектрах связано с вибрациями углерод-углеродных связей. На рисунке показана часть спектра, выделенная и увеличенная область волновых чисел и показаны характерные пики, которые появились после УЗ сонообработки. Это указывает на то, что в результате сонообработки формируются коллоидно устойчивые МЛ, в которых наряду с действием структурно-механического фактора агрегативной устойчивости дисперсных систем, вероятно, основную роль играет адсорбционный фактор. Наноразмерные частицы, имеющие развитую поверхность и высокую поверхностную энергию способны под УЗ воздействием адсорбировать масло, в результате чего стабилизироваться

Наиболее устойчивой оказалась система маслонитрид бора, с которой использовали частицы марки HeBoLub® 030 – готовый продукт в виде стабилизированного масляного лиозоля. УЗ воздействие позволило получить пространственно однородные дисперсные системы с редиспергированной дисперсной фазой. Коллоидно-устойчивые МЛ наблюдали в течение более 15 дней.

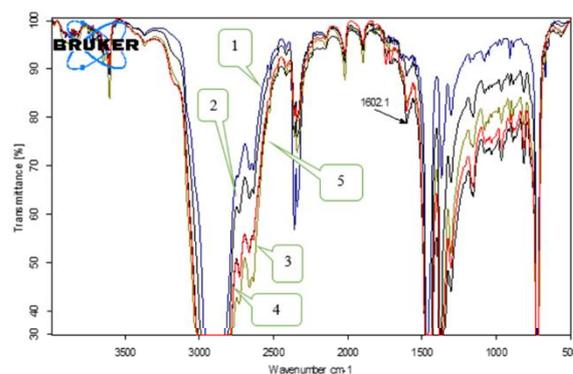


Рисунок. ИК-спектры МЛ после УЗ сонообработки: 1 – нитрид бора; 2 – активированный углерод; 3 – графеноподобный углерод; 4 – многостенные углеродные нанотрубки; 5 – гексагональный нитрид бора

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАКТЕРИАЛЬНЫЕ КУЛЬТУРЫ *AZOTOBACTER CHROOCOCCUM* И *ESCHERICHIA COLI* M-17

Ф.А. Григорьев¹, Д.И. Мисюля², Ю.М. Юркова^{1,2}

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; *grigoriev.feodor@gmail.com

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. В условиях глобального стремления к устойчивому развитию и снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду особую актуальность приобретают исследования экологической безопасности технических материалов, включая смазочные. Традиционные нефтесодержащие пластичные смазочные материалы (ПСМ), несмотря на свои высокие эксплуатационные характеристики, могут оказывать негативное воздействие на биологические системы [1]. В этой связи разработка и внедрение биоразлагаемых аналогов на основе растительного сырья представляет собой перспективное направление, требующее комплексной оценки их влияния на живые организмы [2].

Особый научный и практический интерес представляет изучение воздействия таких материалов на микроорганизмы, играющие ключевую роль в природных экосистемах. В частности, азотфиксирующие бактерии (например, *Azotobacter chroococcum*) критически важны для поддержания почвенного плодородия, а индикаторные штаммы (такие как *Escherichia coli* M-17) широко используются для оценки санитарного состояния окружающей среды [3].

Цель исследований. Изучить влияние пластичных смазочных материалов с дисперсионной средой на основе растительного сырья на бактериальные культуры *Azotobacter chroococcum* и *Escherichia coli* M-17.

Материалы и методы. В качестве объекта исследований был выбран ПСМ ЭКСМ-1 (ТУ ВУ 400084698.328-2024), представляющего собой смесь рапсового технического, касторового технического и льняного пищевого масел с добавлением антиокислительной присадки, загущённая 12-гидроксистеаратом кальция. Для оценки влияния ПСМ на бактериальные культуры, в качестве последних были выбраны *Escherichia coli* M-17 (кишечная палочка) и *Azotobacter Chroococcum* (азотобактер).

Результаты и их обсуждение. Основой для оценки воздействия на живые организмы и природную среду ПСМ являлись такие виды бактерий, как кишечная палочка и азотобактер. Кишечную палочку выращивали в мясо-пептонном агаре (2 г мясного пептона, 1,5 г агара на 100 г среды), а азотобактер – на синтетической твёрдой (1,5 мас. % агарозы) безазотной питательной среде Эшби [4].

Для оценки влияния ПСМ на бактерии, образец ПСМ растворяли в гексане в концентрациях 10 и 20 мг/мл. Полученный раствор вносили на питательную среду непосредственно после нанесения на неё культур бактерий. Экспериментально была подтверждена инертность гексана на бактерии. Полученные бактериальные культуры содержались при температуре 23–25 °С, в течение 48–168 ч.

Результаты воздействия растворов ПСМ на кишечную палочку оценивали по прошествии 48 ч, после внесения (рис. 1, а). Оба образца, с двумя разными концентрациями не оказали видимого воздействия на кишечную палочку.

Оценку воздействия растворов ПСМ на азотобактер производили по прошествии 168 ч. Можно отметить, что, введённые в среду растворы ПСМ различных концентраций также не оказали негативного воздействия на бактериологическую культуру.

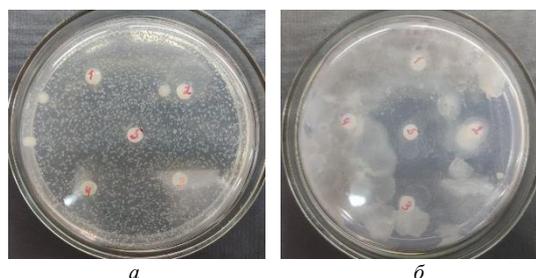


Рис. 1. Культуры микроорганизмов с введёнными в них растворами ПСМ. а – кишечная палочка с 20 мг/мл раствором ПСМ после 48 ч; б – азотобактер с 20 мг/мл раствором ПСМ после 168 ч

По прошествии 168 ч, в образцах азотобактера наблюдались точки с интенсивным ростом микроорганизмов, что указывает на отсутствие бактериостатического действия образцов исследуемого ПСМ.

Выводы. Предложена методика оценки влияния ПСМ на окружающую среду. Проведена оценка влияния ПСМ на основе растительного сырья на бактерии вида *Escherichia coli* M-17 и *Azotobacter chroococcum*. По результатам исследования выявлено, что разработанные ПСМ не оказывают негативного действия на микроорганизмы. Данная методика может быть использована для оценки воздействия смазочных материалов и других технических жидкостей на окружающую среду, в качестве оценки экологической безопасности.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 4.2.3 НИР 1 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Многофункциональные и композиционные материалы»

1. Muller M.M. et al. Environmental compatibility of lubricants // Journal of Cleaner Production. – 2020 (256), 120451
2. Smith J., Brown A. Biodegradable lubricants: production and applications. – London: Springer. — 2019
3. Петров К.Д. Микробиологический мониторинг окружающей среды. – М.: Академия. — 2022
4. Методы общей бактериологии: в 3 т. / под ред. Ф. Герхардта и др.; пер. с англ. под ред. Е. Н. Кондратьевой, Л. В. Калакуцкого. — М.: Мир. — 1983 (1)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФОКУС-СТЕКИНГА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СУПЕРМАКРОФОТОГРАФИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ, ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗЛОМОВ КОМПОЗИТОВ

М.М. Гут, И.С. Шилько

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; gutm@mail.ru

Введение

При фотосъёмке научных образцов различных материалов сложной формы в диапазоне размеров от 1 мм до 100 мм глубина резкости очень мала и не позволяет получить резкое изображение всего образца на единичном снимке. Для этих целей подходит метод фокус-стекинга, который позволяет объединить множество кадров с разными точками фокусировки в одно полностью резкое изображение. В настоящее время этот метод в науке используется для получения снимков поверхностей минералов, мелких деталей растений, насекомых.

Цель

Целью работы является апробация метода фокус-стекинга для получения резких фотографий по всему полю кадра при съёмке поверхностей трения, волокнисто-пористых материалов, изломов полимерных композиционных материалов.

Результаты и обсуждение

В книге [1] приведено описание различных способов съёмки наполненных волокнами композиционных материалов с помощью оптического микроскопа. Однако так можно получить резкое изображение только достаточно плоских образцов. Для съёмки образцов сложной формы требуется дорогостоящий лазерный конфокальный микроскоп. В 2005–2006 годах в связи с бурным развитием цифровой фотографии появились первые компьютерные программы для получения супермакрофотографий методом фокус-стекинга. В этом методе используется любая зеркальная или беззеркальная фотокамера, на которую с использованием макрокольца или макромежа устанавливаются как обычные фотообъективы, так и объективы от фотоувеличителей или микроскопные объективы. В зависимости от требуемого масштаба съёмки могут использоваться различные оптические схемы. Чем меньше снимаемый объект и чем сложнее его форма, тем большее число кадров с различными точками фокусировки требуется сделать. На практике для получения множества кадров требуется обеспечить перемещение образца или фотоаппарата, закреплённых на площадке с микрометрической подачей.

Была собрана фотоустановка, состоящая из зеркального фотоаппарата Nikon D3200 с макромежом Canon BELLOWS FL, жёстко закреплённым на алюминевую пластину. Через переходник на макромеж был установлен объектив от фотоувеличителя ВЕГА-

11У. Пластина с макромежом струбциной прижималась к краю стола. Снимаемые образцы находились на регулируемой по высоте площадке, установленной перед объективом на платформе с микрометрической подачей. Съёмка серии кадров велась с использованием пульта дистанционного управления для избежания вибрации. Масштаб съёмки составлял примерно 6.5 мм по длинной стороне кадра. В зависимости от рельефа поверхности для одного образца требовалось сделать от 5 до 20 единичных кадров при последовательном перемещении образца на платформе к объективу. Затем полученные серии кадров загружались в программу Helicon Focus, в которой получали готовое резкое изображение по всему полю кадра. В качестве примера на рис. 1 приведена фотография волокнисто-пористого материала, полученного путём лазерной абляции ПТФЭ в вакууме на подложке из органзы.



Рис. 1. Волокнисто-пористый ПТФЭ

Заключение

Получены супермакрофотографии поверхностей трения полимерных композиционных материалов, поверхностей волокнисто-пористых материалов, используемых для изготовления фильтров, поверхностей изломов ряда полимерных композитов. Это позволило произвести сравнительный визуальный анализ поверхностей трения, получить представление о размерах и форме волокон ПТФЭ, образующихся при лазерной абляции в вакууме, а также оценить равномерность распределения волокон на изломах композитов. Метод фокус-стекинга показал отличный результат для получения резких фотографий малоразмерных образцов сложной формы.

1. Clarke A.R. and Eberhardt C.N. Microscopy techniques for materials science. — CRC Press. — 2002

ТРИБОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО СНЕГУ

Д.М. Гуцев, В.Г. Кудрицкий

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь; gucevd@mail.ru

Цель. Широкое использование полимерных материалов и композитов на их основе затрагивает все сферы нашего хозяйства. В частности, использование полимерных скользящих слоёв в таком спортивном инвентаре как лыжи уже является традиционным. Однако постоянно разрабатываются новые композиционные материалы потенциально способные в данных условиях обеспечивать лучшие механические и триботехнические свойства. Кроме того, применение полимерного скользящего слоя актуально при использовании мобильных транспортных средств в условиях крайнего севера, что подтверждается разработкой соответствующих технических решений [1, 2]. Оперативное сравнение триботехнических характеристик разрабатываемых материалов – весьма актуальная задача [3]. Таким образом, целью данной работы была разработка и изготовление испытательного оборудования для определения триботехнических характеристик исследуемых материалов по снегу.

Описание. Разрабатываемое оборудование относится к испытанию материалов трением, в частности к способам измерения коэффициента трения трущихся пар при температурах от плюс 5 до минус 30°C и должно обеспечивать возможность измерения триботехнических характеристик исследуемых материалов при трении по опорной поверхности, состоящей из снега или льда при указанных температурах при различных нагрузках.

При разработке трибометра учитывали, что в процессе испытания должен регистрироваться момент трения, возникающий при вращении опорной поверхности диска с сформированным на ней снегом или льдом и скользящей поверхностью образца, прижатого к этой поверхности с заданным усилием и при контролируемой температуре.

В разработанном трибометре пространственная рама 1 (рис. 1), изготовлена из профильной трубы 50×50×3 мм, обеспечивающая высокую жёсткость конструкции и сконструирована таким образом, чтобы обеспечивать возможность расположения диска с сформированным на ней снегом или льдом в горизонтальном или вертикальном положении. В процессе проведения испытаний рама опирается на виброопоры 2, установленные в двух плоскостях. Перемещение прибора осуществляется путём подъёма трибометра на механизмах перемещения колёсных опор 3. Регулировка и поддержание частоты вращения обеспечивается встроенным в цепь питания частотного преобразователя. Система нагружения на исследуемый образец представляет собой консольно закреплённую резьбовую штангу с перемещаемыми

наборными грузами 4. Контроль создаваемой нагрузки на испытываемый образец 5 производится по данным, получаемым от тензометрической балки, установленной в узел нагружения 6. В данный узел нагружения встроена вторая тензометрическая балка, регистрирующая момент трения возникающий при вращении диска 7 с сформированным снежным покрытием. Все процессы происходят при постоянном контроле температуры образца и температуры окружающей среды посредством термодатчиков. Вращение диска обеспечивается электродвигателем 8.

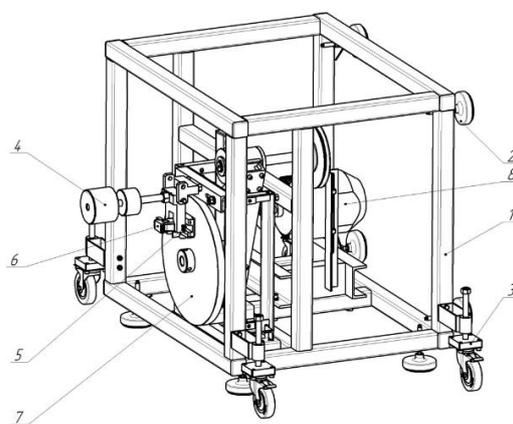


Рис. 1. Трибометр для измерения триботехнических характеристик по снегу: 1 – рама, 2 – виброопоры, 3 – колёсные опоры, 4 – груз, 5 – образец, 6 – узел нагружения, 7 – диск, 8 – электродвигатель

Технический результат достигается за счет регистрации триботехнических характеристик исследуемого образца при его взаимодействии, с требуемой нагрузкой, с вращающимся диском, на котором сформирован снежный покров или наледь при постоянном контроле заданной температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» задание 4.2.3 НИР 1.

1. Полоз для грузовых саней: патент 13691 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) В64С 25/52 / Д.М. Гуцев, Н.К. Мышкин, В.Г. Кудрицкий; заявитель ИММС НАН Беларуси. – № u20240181; опубл. 05.04.2025 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2025, № 2
2. Транспортные сани: патент 13690 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) В62В 13/16 / Д.М. Гуцев, Н.К. Мышкин, В.Г. Кудрицкий, А.А. Гайдашев; заявитель ИММС НАН Беларуси. – № u 20240180; опубл. 05.04.2025 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2025, № 2
3. Родненков, В.Г. Влияние мезогенных добавок на триботехнические свойства фторпарафинов / В.Г. Родненков, Б.И. Купчинов, В.Я. Матюшенко // Трение и износ. — 2007 (26), № 5, 477–484

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИАМИДА 6, СОДЕРЖАЩЕГО АНТИПИРИРУЮЩИЕ ДОБАВКИ

А.А. Давыдов, С.П. Богданович

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; davidov_aa@tut.by

Введение. Одним из наиболее распространённых термопластов, промышленно производимых в Республике Беларусь, является полиамид 6 (ПА6). Весьма важная область его применения – композиты, обладающие повышенной стойкостью к горению и предназначенные для изготовления изделий, используемых как внутри помещений, так и снаружи.

Следует отметить, что хотя на рынке модификаторов доступен большой марочный ассортимент антипирирующих добавок (АД), их влияние на реологические и механические свойства полиамида 6, в том числе при использовании поверхностно-активных веществ, предназначенных для улучшения диспергируемости АД и, как следствие, повышение их эффективности, изучено недостаточно и зачастую в различных условиях либо получения композитов, либо изготовления образцов.

Цель. Оценить влияние антипирирующих добавок различного типа на реологические и механические свойства композитов на базе ПА6, полученных в одинаковых условиях.

Материалы и методы. Матричным полимером являлся ПА6 для изделий, контактирующих с пищевыми продуктами по ТУ РБ 500048054.037-2002 (ОАО «Гродно Азот»), а поверхностно-активной добавкой – низкомолекулярное полярное соединение, хорошо совместимое с ПА6. В качестве АД использовали меламина МА («Borealis AG», Австрия), меламинцианурат МЦ FR-6120 («Bromine Compounds», Израиль), бромсодержащий антипирен FR-1410 (КНР), аммоний, содержащий тройной полифосфат марки AZC-50 разработанный и синтезированный НИИ ФХП БГУ. В ряде испытаний использовали катализатор карбонизации на базе переходного металла.

Получение композитов осуществляли экструзионным компаундированием по технологии, описанной в [1]. Экспериментальные образцы изготавливали литьём под давлением.

Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине модели AGS-X (Shimadzu Corporation, Япония) в соответствии с ГОСТ 11262.

Показатель текучести расплава (ПТР) определяли по ГОСТ 11645 на приборе Dynisco LMI 5000, США.

Ударную вязкость по Шарпи без и с надрезом оценивали по ГОСТ 4647 с использованием копра маятникового типа РТ 560J (маятник GB4J), Китай.

Результаты и их обсуждение. В ПА6 добавляли 18 мас. % модификатора (АД). Введение указанной концентрации позволяло получить повышенную стойкость к горению композиций в не зависимости от типа использованной АД, в том числе ПВ-0. В ряде случаев, дополнительный прирост указанного показателя достигался с использованием инициатора карбонизации.

Для всех использованных АД наблюдался рост ПТР, величина которого определялась типом антипирена. Наибольший прирост указанного показателя достигнут при использовании AZC-50 и составил ≈ 8 раз.

Практически все полученные композиционные материалы обладали повышенной жёсткостью. В большинстве случаев их модуль упругости был несколько выше, чем у ненаполненной полимерной матрицы. Некоторые АД (МЦ, AZC-50) работали как весьма эффективные армирующие наполнители, превышая указанный показатель более, чем в 1,5 раза.

Влияние АД на относительное удлинение не однозначно: одни из них практически не оказывали воздействия на данный параметр, сохраняя его на уровне ненаполненного ПА6, а другие – резко снижали (до ≈ 70 раз), приводя к образованию весьма хрупких композиций.

Почти все использованные АД снижали предел текучести при растяжении, причём максимальное снижение не превышало 35 %.

Выводы. АД оказывают заметное влияние на комплекс реологических и механических характеристик, изменяя некоторые из них в разы (модуль упругости, ПТР) и даже десятки раз (относительное удлинение при разрыве). Все полученные композиты при использовании 18 % наполнении АД позволили получить материалы с повышенной стойкостью к горению, в том числе и высшей категории – ПВ-0. Показано, что дополнительное повышение категории стойкости к горению может быть достигнуто введением незначительных количеств катализатора карбонизации.

Авторы благодарят Селевича Анатолия Феликсовича, сотрудника НИИ ФХП БГУ, за предоставленную для исследования АД.

1. Давыдов А.А., Ванг Ж., Богданович С.П., Ли К., Цай Ф. Самозатухающие композиты на базе полипропилена и термопластичного полиуретана для электрических кабелей // Полимерные материалы и технологии — 2022 (8), № 1, 24—31, DOI: 10.32864/polymmattech-2022-8-1-24-30

ОПЫТ, ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПНЕВМОЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ И СМЕСЕЙ

С.В. Зотов, В.А. Гольдаде, М.А. Коваленко, К.В. Овчинников, В.М. Шаповалов

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь; zotov-1969@mail.ru

Введение. Пневмоэкструзия (аэродинамическое выдувание расплава полимеров с получением волокнисто-пористых материалов (ВПМ), *melt-blowing*) развивается в ИММС НАН Беларуси с 1970-х гг. Известны закономерности этой технологии, включая влияние параметров процесса на структуру и комплекс свойств волокон. К числу ценных специфических свойств *melt-blown* волокон относится физическая активность [1]. Однако до сих пор мало верифицируемых данных о пневмоэкструзии расплавов композитов. Даже если возникает необходимость совместить ценные свойства в ВПМ фильтрационного назначения или усилить физическую активность волокон, используют послойное комбинирование волокнистых структур [2], не добиваясь достижения этих свойств в единой структуре.

Цель работы – исследование технологии пневмоэкструзии многокомпонентных расплавов.

Материалы и методы. Материалы: полипропилен 4445S (ПП, ПТР = 4 г/10 мин), полиэтилен 15803-020 (ПЭ, ПТР 1,5–2,5 г/10 мин), пневмоэкструзионные отходы ПП и ПЭ, нативный или абляционный фторопласт (Ф-4), полилактид Biopolymer 4043D (ПЛА, ПТР = 4 г/10 мин), ПЛА FY 201 (ПТР = 20 г/10 мин), монтмориллонит ММ (дисперсность 125 мкм). Применяли экструзию компонентов с гранулированием, после чего из композиционного расплава формировали *melt-blown* ВПМ [1, 3].

Результаты и обсуждение. Получены ВПМ из смеси волокнистых отходов пневмоэкструзии (ПП + 20 мас. % ПЭ). Исходили из важности рециклинга этих отходов. Сформированы образцы ВПМ в виде ваты (рис. 1). Их структура сравнима со структурой полимерного сорбента по ТУ РБ 400052235.059-2000. Также получены ВПМ в виде холста из смеси ПП и Ф-4 (2 мас. %). Нативный Ф-4 имеет высокую дисперсность и легко смешивается с гранулами ПП. Волокноподобные отходы абляции Ф-4 обладают электростатическим зарядом, что определяет перспективу реализации межфазных взаимодействий в композитах с их содержанием.

Впервые методом пневмоэкструзии получены ВПМ в виде ваты из смеси ПЛА 4043D + 2 мас. % ММ. Технологические режимы корректировали с целью добиться оптимального волокнообразования из расплава ПЛА – нового для пневмоэкструзии материала. Также с использованием односопловой и многосопловой экструзионных головок изготавливали ВПМ в виде цилиндрических заготовок (картриджей) на основе ПЛА FY 201. Отработанные режимы формирования новых ВПМ обладают патентоспособностью. Удалось изготовить формостабильные картриджи двух типов (рис. 2). Структура новых ВПМ

несколько отлична от указанных в ТУ РБ 03535285.051-99 на полимерные фильтры, но может быть оптимизирована в ходе дальнейшего развития технологии пневмоэкструзии композитов.

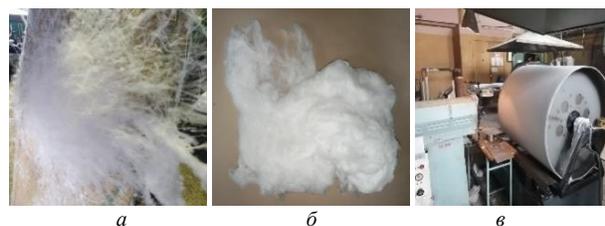


Рис. 1. Пневмоэкструзионная переработка смесевых композитов: а – момент формирования смесевой ваты ПП + ПЭ; б – смесевой ВПМ ПП + ПЭ; в – формирование смесевых холста ВПМ ПП + Ф-4



Рис. 2. ВПМ в виде картриджей из ПЛА FY 201: а – с применением односопловой головки; б – многосопловой головки

Заключение. Впервые методом пневмоэкструзии многокомпонентных расплавов изготовлены новые ВПМ. Далее могут быть созданы перспективные сорбенты на базе полимерного вторсырья, фильтры с физической активностью, а также новые полностью биологически разлагаемые фильтры. Межфазные взаимодействия в композиционных ВПМ могут осуществляться за счёт электрической поляризации на границах раздела фаз.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы (задание 4.2.2, НИР 2).

1. Pinchuk L., Goldade V., Makarevich A., and Kestelman V. Melt blowing: equipment, technology, and polymer fibrous materials. — Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg. — 2002
2. Шумская В.Ю., Гракович П.Н., Зотов С.В., Шаповалов В.М., Григорьев А.Я. Тенденции и перспективы использования полимерных волокнисто-пористых фильтров в составе средств индивидуальной защиты органов дыхания для предупреждения вирусной инфекции COVID-19 // Полимерные материалы и технологии. — 2022 (8), № 3, 6—23
3. Гольдаде В.А., Зотов С.В., Гарбарук В.Ю., Коваленко М.А., Шаповалов В.М. Волокнисто-пористые полимерные материалы для фильтрации воздуха и газов (Обзор) // Полимерные материалы и технологии. — 2025 (11), № 1, 6—25

РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК С ГИБРИДНОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ

А.В. Ивахник, В.И. Жорник

Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь;
itmol@mail.ru

Пластичные смазочные материалы (ПСМ) с гибридной дисперсной фазой (ГДФ), представляют собой комбинацию загустителей различных типов (например, мыльный загустителя и высокодисперсные неорганические (или органические) частицы). Смазочные материалы с ГДФ характеризуются комплексом улучшенных эксплуатационных свойств, к которым относятся: повышенная температура каплепадения, высокая механическая и коллоидная стабильность, хорошие противоизносные и противозадирные свойства. Так же при синтезе данных материалов часто удаётся добиться снижения себестоимости [1, 2].

В общем случае синтез ПСМ, имеющего ГДФ, содержащую наряду с мыльным загустителем также и ультрадисперсные частицы (немыльный компонент), состоит в предварительном введении частиц не мыльного компонента в дисперсионную среду, их механической активации и диспергирования до необходимых размеров. Далее происходит химическая активация путём введения в образовавшуюся масляную суспензию сырья, необходимого для формирования мыльного компонента ГДФ (т. е. кислот и щелочей). После этого технологический процесс протекает по традиционной схеме с участием активированных ультрадисперсных частиц немыльного компонента в формировании структуры ГДФ. При этом в процессе нагревания и перемешивания реакционной массы и протекания различных химических реакций происходит совместная механическая, термическая и химическая активация компонентов, способствующая появлению прочных физических и химических связей между элементами дисперсной фазы и образованию её гибридного строения.

Целью данной работы является анализ аспектов применения теории формирования ГДФ в различных типах пластичных смазок.

Одним из наиболее практически проработанных направлений создания ПСМ с ГДФ является синтез ПСМ, в которых в качестве мыльного компонента использованы простые и комплексные литиевые соли 12-гидроксистеариновой и борной кислот.

При использовании в качестве немыльного компонента агломератов углеродных частиц ультрадисперсных алмазов ключевым моментом стало диспергирование агломератов частиц в дисперсионной среде на кавитационном диспергаторе до размеров частиц 20–100 нм, их обезвоживания путём нагрева суспензии до температуры 115–120 °С и участия их в качестве центров структурообразования ГДФ. Как в случае простых, так и в случае применения

комплексных литиевых солей удалось добиться синтеза уникальной структуры дисперсной фазы, отличающейся разветвлённым и сложным характером. По сравнению с традиционным способом введения добавок в практически готовую смазку на стадии охлаждения удалось добиться повышения температуры каплепадения на 35–50 °С, коллоидной стабильности на 5–7 %, загущающего эффекта на 10–15 %.

При применении частиц гексагонального нитрида бора BN с комплексными литиевыми солями также важным являлась его термообработка для обезвоживания. Полученные ПСМ отличался увеличенной коллоидной стабильностью на 3–5 %, каплепадение изменилось незначительно на 10–15 °С, однако наблюдалось выраженное повышение загущающего эффекта на 30–45 %.

Уникальным является применение в терморасширенного графита (ТРГ) в простых литиевых смазках. Традиционным способом ввести ТРГ в ПСМ очень сложно так как даже 1 мас. % ТРГ превышает объём смазки, в который его требуется ввести, в несколько раз. ПСМ с ГДФ на основе ТРГ и литиевой соли имеет сверхвысокую температуру каплепадения (свыше 350 °С), отличную коллоидную стабильность 5–6 % и значительное повышение загущающего эффекта на 180–200 %.

Промышленно внедрено использование в качестве немыльного компонента в литиевых смазках полимеров, а именно сополимера этилена и полипропилена. В результате при применении 0,3 мас. % сополимера было достигнуто повышение коллоидной стабильности на 45–50 %.

Смазка с ГДФ на основе частиц немыльных частиц диатомита и перлита и комплексных кальциевых солей промышленно освоена и показывает увеличение температуры каплепадения на 35–40 °С и коллоидной стабильности на 3,0–5,0 % в сравнении с комплексной кальциевой смазкой УНИОЛ.

Комплексная сульфонат кальциевая смазка с немыльными частицами карбоната кальция и комплексными кальциевыми солями стеариновой и уксусной кислот отличается высокой температурой каплепадения (свыше 300 °С) и уникальной механической стабильностью (изменение пенетрации менее 10 ед. после 100000 ударов в чашке пенетрометра).

1. Ивахник, А.В. Пластичные смазочные материалы на основе бинарной дисперсной фазы повышенной нагрузочной способности — Дис. ... канд. техн. наук. — 2014.
2. Moving forward...can lubricating grease be produced in a more efficient way / Mehdi Fathi-Najafi, John Kay. — NLGI Spokesman. — 2019

АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ Ti-Cu НА ПОВЕРХНОСТИ УРЕТРАЛЬНЫХ КАТЕТЕРОВ

А.Ф. Ильющенко, Р.П. Голодок, А.М. Тарайкович,
В.В. Савич, М.А. Андреев, О.О. Кузнечик

Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск, Беларусь; savich.vadim@gmail.com

При введении уретрального катетера, представляющего собой полимерную трубку, человеку, испытывающему проблемы с функционированием мочеиспускательной системы, образуется естественная граница раздела между внешней поверхностью трубки и тканями слизистой оболочки уретры. Эта граница может служить каналом проникновения внутрь организма человека различных инфекций. Инфекция может также попасть и через канал катетера. Чтобы снизить вероятность такого проникновения на внешние и внутренние поверхности трубок катетера наносят покрытия, обладающие антисептическими свойствами. Как показано в работах [1–3], такими свойствами в отношении золотистого стафилококка и кишечной палочки могут обладать покрытия, содержащие медь. Однако, чтобы снизить негативное влияние меди на здоровье человека, её рекомендуют использовать в химически связанном состоянии, например, титановых сплавах (в дальнейшем – Ti-Cu сплавах) с массовым содержанием меди 5–10 % [1].

Целью данной работы является разработка перспективного метода нанесения покрытий Ti-Cu сплава на внешние и внутренние поверхности уретральных катетеров.

Материалы и методы исследований. Были использованы катетеры из латекса, силикона и ПВХ наружным диаметром 4,7 мм и толщиной стенки 0,7 мм. Для нанесения покрытий Ti-Cu на внешнюю поверхность катетеров применялся метод вакуумного распыления по схеме несбалансированной магнетронной системы с рассеиванием магнитного поля в сторону подложки при напряжённости электрического поля в пределах $E = 10^7\text{--}10^9$ В/м и плотность тока в пределах $j = 10\text{--}100$ А/м². В качестве распыляемой мишени использовали формовку, получаемую электроимпульсным спеканием и вакуумным допеканием шихты на основе порошка титана с добавками порошка меди в пределах 5–10 %. В качестве рабочего газа при магнетронном распылении использовали аргон. Процесс проводили на установке вакуумного распыления ННВ 6.6.И1.

Для нанесения антибактериальных покрытий на внутренние поверхности уретральных катетеров использовали сольватационное осаждение из суспензии тонкодисперсных металлических частиц Ti и Cu. Особенность этой суспензии – вязкий гель на основе жидкого силикона. В этой суспензии молекулы жидкого силикона при смачивании поверхности частиц дисперсной металлической фазы образуют молекулярный двойной электрический слой с изменённым поверхностным потенциалом по отношению к

другим окружающим их вне слоя молекулам жидкого силикона и отвердителя, образующих эмульсию. Это приводит к возникновению по отношению к поверхности частиц дисперсной фазы эффекта экранировки, а к другим молекулам жидкого силикона и отвердителя, находящимся во взаимодействии с этим молекулярным слоем, – эффекта сольватации. На рис. 1 представлена микроструктура покрытия Ti-Cu на наружной поверхности катетера, а на рис. 2 – на внутренней.

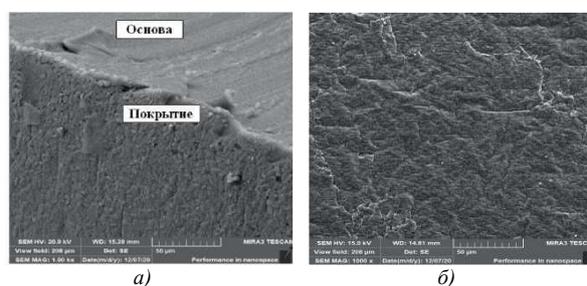


Рис. 1. Структура полученных магнетронным распылением покрытий Ti-Cu на наружной поверхности катетеров, $\times 1000$: а – излом; б – внешняя поверхность

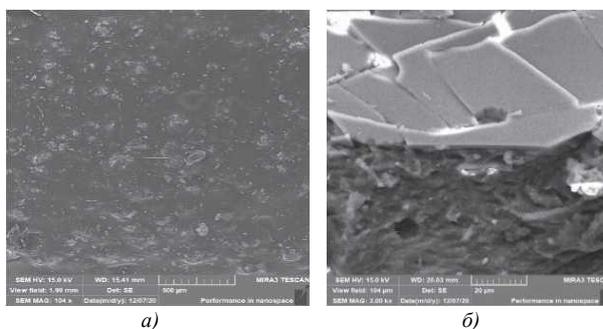


Рис. 2. Структура полученных сольватационным осаждением покрытий Ti-Cu на внутренней поверхности катетеров: а – внешняя поверхность; б – излом

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект T20КИ-020.

1. Effect of Cu content on the antibacterial activity of titanium-copper / J. Liu [et al.] // Materials and Engineering: C. — 2014, no. 35, 392–400
2. The anti-bacterial activity of titanium-copper sintered alloy against *Porphyromonasgingivalis* *in vitro* / B. Bai [et al.] // Dental Materials Journal. — 2016, no. 35 (4), 659–667
3. Шут, В. В. Физические и антибактериальные свойства ультрадисперсных порошков меди / В. В. Шут, С. Е. Мозжаров, В. В. Ячненко // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та: химич. технология и экология. — 2016, № 2 (31), 97–105

Триботехнические свойства фрикционного материала на основе волокон различной природы для узлов трения, работающих со смазочным материалом

А.Ф. Ильющенко, А.В. Лешок, А.Н. Роговой

Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск, Беларусь; sdilav@tut.by

Одной из основных проблем машиностроения является создание узлов и механизмов, обладающих высокими эксплуатационными требованиями, ресурсом работы, надёжностью. Решением данной проблемы может способствовать разработка новых составов материалов [1]. Фрикционные материалы на основе волокон различной природы обладают высоким и стабильным значением динамического коэффициента трения, сравнимого со значением статического коэффициента трения, высокой износостойкостью, низкой стоимостью [2]. В качестве наполнителей данной группы фрикционных материалов используются углеродные, базальтовые волокна и стекловолокно, выбор которых определяется нагрузочно-скоростными режимами, эффективностью передачи крутящего момента. Большое многообразие узлов трения, условий их работы требует разработки индивидуальных составов фрикционных материалов [3].

Цель исследований – исследование триботехнических свойств фрикционного материала на основе стекло, базальтового, углеродного волокон для узлов трения, работающих со смазочным материалом.

Материалы и методы исследований.

Объектом исследования являлся фрикционный материал со стекловолокном полученным измельчением материала Isover Master-Standart Twin 50x1220x8250; базальтового волокна, полученного из картона No Brand ОБМ-К-Ф, углеродного волокна марки М. Волокна измельчались в водном растворе. Для пропитки сформованного материала использовалось два состава: 70 % спиртовой раствор связующего СФП-012А и лак кремнийорганический КО-85. Сушку образцов проводили для первого пропитывающего состава при температуре – 210 °С – 220 °С в течение – 30 мин, для второго состава – 200 °С – 220 °С, 3 ч. Триботехнические испытания проводились на стенде типа «ИМ-58» в условиях смазки маслом типа «А».

Результаты исследований и их обсуждение.

Использование пропитывающего состава на основе связующего СФП-012А обеспечивает более высокое значение динамического коэффициента трения, из-за высокой механической прочности, чем лака КО-85. Для фрикционного материала со стекловолокном, при плотности 0,5-1,1 г/см³ и пропитке СФП-012А коэффициент трения увеличился с 0,050 до 0,076, износ при этом снизился с 25 мкм/км до 5 мкм/км. При использовании лака КО-85

коэффициент трения составил 0,045 до 0,074, износ увеличен на 20 % – 35 % в сравнении с СФП-012А.

Присутствие в составе базальтового волокна оксидов с высокой твёрдостью показывает повышенное значение коэффициента трения в сравнении со стекловолокном. Так, для фрикционного материала, содержащего базальтовое волокно, пропитанное связующим СФП-012А и имеющего плотность 0,5–1,1 г/см³ коэффициент трения увеличился с 0,056 до 0,084.

Углеродное волокно показывает наименьшее значение коэффициента трения в исследуемом интервале плотности. Изменение пропитывающего состава оказало наибольшее влияние на разброс в значениях коэффициента трения. Так, при использовании пропитки на основе СФП-012А коэффициент трения увеличился с 0,038 до 0,069, для КО-85 – с 0,026 до 0,054.

Анализ зависимости изменения коэффициента трения за один цикл торможения показал, что в случае стекло- и базальтового волокон в начальный момент контакта поверхностей фиксируется пик коэффициента трения. Его наличие вызывает динамическую нагрузку, что недопустимо. В случае углеродного волокна пик отсутствует, идёт плавный рост коэффициента трения. Полученные данные позволили сделать предположение, что совместное использование волокон различной природы позволяет управлять не только величиной коэффициента трения на этапе буксования, но и плавностью вхождения пары трения в зацепление.

Результаты исследования поверхности стального контртела показали на равномерный износ. В случае применения в составе фрикционного материала стекло- и базальтового волокна присутствуют направленные дорожки трения, характерные абразивному износу. В случае углеродного волокна, следы абразивного износа выражены в меньшей степени.

Работы выполнены в рамках задания 4.1.42 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы».

1. Альгин, В. Б., Поддубко С.Н. Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин. — Минск: Бел. наука. — 2019
2. Нилов А.С., Кулик В.И., Гаршин А.П. Анализ фрикционных материалов и технологий изготовления тормозных колодок для высоконагруженных тормозных систем с дисками из керамического композиционного материала // Новые технологии. — 2015, № 7, 57–58
3. Ильющенко А.Ф., Лешок А.В., Дьячкова Л.Н. Спеченные фрикционные материалы на основе меди для работы в условиях граничного трения. — Минск: Медисонт. — 2021

УЛУЧШЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОКТОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ж.В. Кадолич¹, С.В. Зотов², А.А. Кашперов¹, Д.С. Чувашов³, И.А. Галушкин¹

¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь; Kadolich@gstu.by

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь;

³ООО «Я ваш доктор», Гомель, Беларусь

Введение. Малоподвижный образ жизни, неправильное питание, инфекции, травмы, плохая генетика и экология, влияние производственных факторов – все это может послужить появлению у человека очень распространенных в настоящее время заболеваний проктологического характера [1]. Лечение таких «деликатных» заболеваний может включать медикаментозную терапию и хирургическое вмешательство. Для диагностики и врач-проктолог использует различное оборудование и инструментарий: лапароскопы, колоноскопы, эндоскопы, anosкопы, лазерные аппараты, электрокоагуляторы и т.д. Для каждой из этих позиций имеется своя статистика относительно удельного веса использования и представленных на рынке разновидностей. Совершенствование конструкции проктологических инструментов с обеспечением возможности производства на территории нашей страны – важная задача, ускорить решение которой возможно при условии привлечения специалистов технического профиля, владеющих знаниями в области аддитивных технологий. Применение последних является не только мировым трендом, но и соответствует ряду позиций Указа Президента Республики Беларусь от 01.04.2025 № 135 «Приоритетные направления научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026–2030 гг.».

Цель работы – усовершенствование конструкции одноразового полимерного anosкопа с использованием средств и методов компьютерного моделирования и прототипирования. Выбор рабочего объекта обусловлен тем фактом, что в данном сегменте инструментов наблюдается серьезный дефицит [3].

Результаты и их обсуждение. Anosкоп представляет собой медицинское устройство в виде тубуса, которое используется с целью диагностики и лечения проктологических заболеваний. Согласно оперативной статистике ООО «Я ваш доктор» (г. Гомель, Республика Беларусь), в медицинском центре в год проводится в среднем 420 операций с использованием anosкопа на фоне общего роста проктологических заболеваний среди населения. Для моделирования использовали программу SolidWorks 2020. Анализ полученных результатов (создано 4 рабочих варианта 3D-моделей) позволил сделать окончательный выбор в пользу конструкции с «язычками» (рисунк 1), поскольку в этом случае, используя медицинский пластырь, возможно приклеить anosкоп за выступающие части к коже пациента.

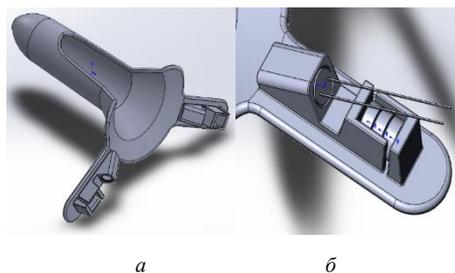


Рис. 1. 3D-модель модернизированного одноразового anosкопа с «язычками» (а) и сборка осветительной части (б)

Технологический процесс 3D-печати разрабатывали в программе Ultimaker Cura. Результатом работы стало изделие весом 43 г (с obturatorом), время 3D-печати которого при условии использования FDM-технологии и ABS-пластика в качестве материала для 3D-принтера составило 2 ч 45 мин. Принцип построения по технологии FDM заключается в послойном «выращивании» изделия из предварительно расплавленной пластиковой нити. ABS-пластик устойчив к воздействию на него таких веществ, как щёлочь, соль, кислоты [4]. Ориентировочная себестоимость нового anosкопа (на июнь 2023 года) составляет 1,5 бел. руб. (без элементов освещения).

Заключение. Продемонстрированы возможности 3D-печати полимерного одноразового anosкопа. Оптимизация конструкции основывалась на ряде известных для проктологов критериев и включала несколько вариантов, из которых выбран наиболее функциональный. Предложенный вариант дизайна способен обеспечить максимальный комфорт для пациента Тот факт, что с 2016 года [2] в Беларуси началось бурное развитие работ в области 3D-технологий, позволяет надеяться на перспективность разработок, решающих проблемы импортозамещения в области медицины.

1. Алексеев С.А., Гинюк В.А. Основы колопроктологии: учебное пособие. — Минск: Вышэйшая школа. — 2019
2. Дубровский В.В. [и др.] Опыт разработки материалов и изделий медицинского и технического назначения с использованием аддитивных технологий // Полимерные материалы и технологии. — 2020 (6), № 2, 78–85
3. Anosкопы – Режим доступа: <http://medtehural.ru/oborudovanie/proktologicheskoe-oborudovanie/anoskopy>. – Дата обращения: 10.08.2023.
4. Панарин Е.Ф. Полимеры в медицине и фармации: учебное пособие. — СПб.: Изд-во Политехнического университета. — 2008

ПОЛИМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СОДЕРЖАЩИЕ КОМПЛЕКСЫ РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Д.Л. Коваленко, А.В. Семченко, В.В. Сидский, В.Е. Гайшун,
В.В. Васькевич, А.А. Маевский, К.Д. Данильченко

Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

В настоящее время большой интерес представляет разработка органических полимеров в качестве перспективных материалов для гибких, биоразлагаемых, биосовместимых и экологически чистых оптоэлектронных устройств. Известные полимеры – поливинилацетаты низших альдегидов отличаются высокой адгезией к различным материалам (в том числе к металлам и минеральному стеклу), обладают хорошей химической стойкостью, прозрачностью, бесцветны и светостойки.

Поливинилбутираль имеет наиболее широкое применение среди других поливинилацетатов благодаря удачному комплексу свойств: хорошей растворимости, высокой адгезии к металлам (в том числе и цветным), совместимости с другими плёнкообразователями, достаточной термостойкости. разработка золь-гель технологии формирования нанокomпозитных органо-неорганических материалов, содержащих комплексы редкоземельных элементов для гибридных фотоэлектрических солнечных элементов.

В данном исследовании поливинилбутираль использовался в качестве матрицы при получении активных слоёв солнечных элементов. Проведены исследования закономерностей процесса формирования плёнкообразующих растворов, а также основные процессы, происходящие в золь-гель системах при добавлении комплексов солей металлов. Описаны факторы, влияющие на скорость протекания этих процессов. Установлены оптимальные отношения исходных компонентов для прохождения полных реакций гидролиза и поликонденсации и формирования стабильных плёнкообразующих растворов, используемых для получения материалов.

Формирование и синтез нанокomпозитных органо-неорганических материалов, содержащих редкоземельные элементы, проходит в три этапа:

- подготовка исходного раствора;
- введение в состав солей редкоземельных элементов;
- формирование тонкой плёнки на подложке (нанесение, отжиг).

Схема процесса, отражающая технологию получения легированных нанокomпозитных материалов, представлена на рис. 1.

Для формирования однородных плёнок методом центрифугирования, исходные растворы должны обладать определённой вязкостью от 3 сСт (мм²/с) до 9 сСт (мм²/с). При большей вязкости

затрудняется растекание раствора, что приводит к образованию.

Проведены исследования физических свойств полученных полимерных композитов, содержащих редкоземельные элементы. Установлено влияние исходного состава и режимов формирования на адгезию полученных материалов к подложке. Определена механическая прочность получаемых полимерных композитов методом истирания.



Рис. 1. Схема получения нанокomпозитных материалов, легированных редкоземельными элементами

1. Poortmans J. and Arkhipov V. Thin film solar cells: Fabrication, characterization and application. — Leuven, Belgium: John Wiley & Sons, Ltd. IMEC. — 2006
2. Sidsky V.V. [et al.] Photoactive and Structure Properties of ZnO:XMgO Nanocomposite Sol-gel Films on the Surface of Silicon // Research and Education: Traditions and Innovations. Lecture Notes in Networks and Systems. — Singapore: Springer. — 2022 (73), 227–235

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ ПОЛИПРОПИЛЕН-ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИД

М.А. Коваленко¹, С.В. Зотов¹, А.А. Павлов², В.А. Гольдаде¹, М.Э. Борисова²

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

²Высшая школа высоковольтной энергетики, СПб политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Высокую эффективность очистки газов и жидкостей в составе фильтроэлементов показали волокнисто-пористые материалы (ВПМ) из полимерных композитов и смесей полимеров. Исследования последних лет показали, что электрические свойства полимерных фильтрующих материалов оказывают существенное влияние на эффективность фильтрации [1].

Цель работы – исследование электрических свойств образцов из композитов на основе смесей полипропилена и полифениленсульфида. В работе рассмотрены электрические свойства как в волокнистых, так и в плёночных образцах.

Материалы и методы. В работе использованы полипропилен (ПП) марки 4445S ($T_{пл} = 160$ °С) и полифениленсульфид (ПФС) марки NHU-PPS ($T_{пл} = 230$ °С). Для наиболее равномерного распределения ПФС в ПП использовали метод двухшнековой экструзии. Экструдированный полимерный прут охлаждали и дробили, а полимерные гранулы использовали для изготовления образцов. Испытывали образцы двух видов: i) из волокнисто-пористых материалов (ВПМ), полученных по технологии melt blowing; ii) из плёнок, полученных методом горячего прессования. Толщина образцов ВПМ составляла 1–1,5 мм, толщина полимерных плёнок составляла 150–170 мкм. Исследовали образцы из материалов следующих составов: 1) чистый ПП (без наполнителя); 2) ПП 90 мас. % + ПФС 10 мас. %; 3) ПП 80 мас. % + ПФС 20 мас. %; 4) ПП 65 мас. % + ПФС 35 мас. %. Электрические свойства полимерных смесей оценивали двумя методами: по изменению эффективной поверхностной плотности заряда (ЭППЗ) и методом термоактивационной токовой спектроскопии по токам термостимулированной деполяризации (ТСД). Полярность и величину ЭППЗ определяли с помощью измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1.

Результаты и обсуждение. Предполагая, что релаксация приповерхностного гомозаряда происходит за счёт собственной проводимости диэлектрика, температурную зависимость проводимости материалов рассчитывали по формуле:

$$\gamma(T) = \frac{-\varepsilon_0 \beta}{U_s(T)} \frac{dU_s}{dT}, \quad (1)$$

где β – скорость нагрева, К/с, ε – диэлектрическая проницаемость смеси.

Диэлектрическая проницаемость материалов была рассчитана по формуле Лихтенеккера [2]:

$$\lg \varepsilon = \theta_1 \cdot \lg \varepsilon_1 + \theta_2 \cdot \lg \varepsilon_2, \quad (2)$$

где ε_1 и ε_2 – диэлектрические проницаемости компонентов, θ_1 и θ_2 – объёмные концентрации первого и второго компонентов. Результаты расчёта с учётом плотностей ПП и ПФС приведены в табл. 1.

Таблица 1. Диэлектрическая проницаемость плёнок ПП и смесей

Материал	Чистый ПП	ПП+10% ПФС	ПП+20% ПФС	ПП+35% ПФС
ε	2,20	2,25	2,30	2,39

Установлено, что величина ЭППЗ образцов ВПМ до обработки в коронном разряде колеблется в диапазоне от $-0,2$ до $+0,7$ мкКл/м². Это так называемый *технологический заряд*. Он присутствует во всех образцах и обусловлен технологическими особенностями изготовления образцов. После обработки в коронном разряде зафиксирован существенный рост ЭППЗ, при этом, с увеличением содержания ПФС в композиции от 10 до 35 %, ЭППЗ растёт (до $-3,0$ и $-6,2$ мкКл/м²). Величина технологического заряда *плёночных образцов* из композиции ПП+ПФС лежит в диапазоне от $-0,12$ до $-0,3$ мкКл/м². Максимальное значение ЭППЗ после обработки в коронном разряде составляет $-2,3$ мкКл/м², что значительно меньше, чем у образцов из ПВМ. Объяснить это различие можно тем, что структура ПВМ содержит большое количество воздушных включений – пор (межволоконное пространство). Локальные электрические поля в этих порах могут значительно превышать напряжённость внешнего электрического поля, достигая величины электрического пробоя воздуха. Это приводит к резкому увеличению числа носителей заряда, которые адсорбируются на волокнах, вызывая дополнительную поляризацию материала и приводя к увеличению ЭППЗ.

Показано, что у ПП электропроводность плавно уменьшается с ростом температуры, а у композитов на графиках $\lg y$ от обратной температуры наблюдается излом при температуре примерно 110–115 °С. Высокотемпературный участок кривой характеризует собственную проводимость диэлектрика. Низкотемпературную проводимость можно характеризовать как «структурно чувствительную», или примесную.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы.

- Zhang H., et al. Design of electret polypropylene melt blown air filtration material containing nucleating agent for effective PM_{2.5} capture // RSC Advances. — 2025, no. 10. doi: 10.1039/C7RA10916D
- Богородицкий Н.П., Волокобинский Ю.М., Воробьев А.А., Тареев Б.М. Теория диэлектриков. Учебник для вузов. — М., Л.: Энергия. — 1965

ВЛИЯНИЕ ЭПОКСИДИРОВАННОГО СОЕВОГО МАСЛА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИСУЛЬФОНА, НАПОЛНЕННОГО САЖЕЙ

И.Н. Ковалёва, В.В. Дубровский, Н.А. Марусенко

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; innakov@tut.by

Введение. Полисульфон (ПСФ) – термопластичный полимер, обладающий высокой термической стабильностью, механической прочностью и стойкостью к химическим воздействиям. Благодаря этим свойствам он широко применяется в аэрокосмической, медицинской и электротехнической промышленности. Введение сажи в матрицу ПСФ улучшает поверхностную электропроводность материала, что расширяет его применение в антистатических покрытиях, электродах и ЕМИ-экранировании [1, 2]. Однако модификация свойств таких композитов остаётся актуальной задачей.

Цель работы – изучить влияние добавок эпоксидированного соевого масла (ЭСМ) на механические и электрофизические свойства композитов на основе полисульфона, наполненного сажей.

Материалы и методы. В качестве базового полимера использовали полисульфон UDEL P3500 (Solvay S.A., Бельгия), в качестве наполнителя – технический углерод (сажа) OMCARB CH85 (ООО «Омсктехуглерод», РФ), в качестве модификатора – эпоксидированное соевое масло ESO-Top (Zhejiang JIAOO Enprotech Stock CO., LTD, Китай).

Составы исследуемых композитов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Составы композитов

Обозначение материала	Состав, мас. частей		
	ПСФ	Сажа	ЭСМ
ПСФ/0	100	0	0
ПСФ/5	95	5	0
ПСФ/10	90	10	0
ПСФ/15	85	15	0
ПСФ/5/2,5	95	5	2,5
ПСФ/10/5	90	10	5
ПСФ/15/7,5	85	15	7,5

Составы смешивали в расплаве при температуре 320 °С при помощи двухшнекового экструдера TSSK-35/40. Образцы типа 1А (ГОСТ 11262-2017) изготавливали литьём под давлением на термопластавтомате EN-30 (Cheng Heng Industrial Co.). Испытания на механическую прочность проводили по ГОСТ 11262-2017 на разрывной машине AGS-X (Shimadzu Corporation), ударную вязкость по Шарпи по ГОСТ 4647-2014 (ISO 179/1 eU) на маятниковом копре PIT 550J (Wance), поверхностное и объёмное сопротивление определяли при помощи резистивметра Hiresta-UX MCP-HT800 (Nittoseiko Analytech Co., Ltd), показатель текучести расплава определяли

на приборе 5MPCA (Ray-Ran Test Equipment Ltd) при 340 °С и нагрузке 2,16 кг.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 приведена зависимость показателей свойств композитов ПСФ/сажа от концентрации сажи. Видно, что модуль упругости материалов увеличивается пропорционально содержанию сажи, при этом, для концентрации 5% наблюдается небольшой упрочняющий эффект. При более высоких концентрациях сажи происходит снижение прочности у составов, не содержащих ЭСМ. В то же время составы, модифицированные ЭСМ, сохраняют прочность во всем интервале концентраций сажи, что объясняется улучшенным диспергированием наполнителя в объёме.

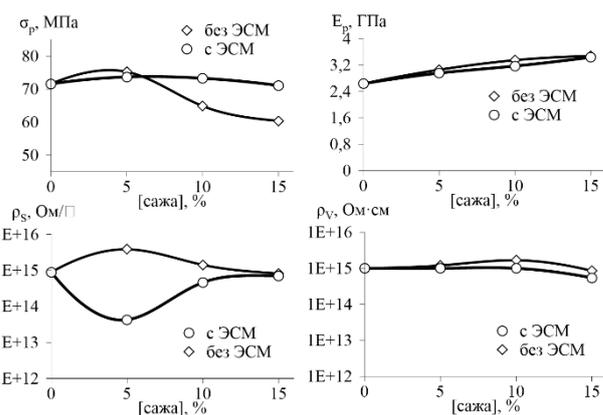


Рис. 1. Зависимость прочности (σ_p) и модуля (E_r) при растяжении, поверхностного (ρ_s) и объёмного (ρ_v) сопротивления композитов на основе ПСФ, наполненных сажей, от содержания сажи

Очевидно, концентрации 15 % недостаточно для существенного изменения объёмного сопротивления материала, однако для материала ПСФ/5/2.5 наблюдается снижение поверхностного сопротивления на 2 порядка, что можно связать с миграцией наполнителя на поверхность в присутствии ЭСМ. При более высокой концентрации наполнителя из-за роста вязкости миграция затруднена.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, проект T25MЭ-024.

1. Kaushal A. and Singh V. Electromagnetic interference shielding response of multiwall carbon nanotube/polypropylene nanocomposites prepared via melt processing technique // Polym. Compos. — 2021 (42), no. 3, 1148—1154
2. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. — Санкт-Петербург: Научные основы и технологии. — 2011

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОРОШКОВ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И КАРБИДА БОРА

С.А. Ковалёва, И.С. Веремей, В.И. Жорник, И.И. Таран, М.А. Белоцерковский

Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;
sveta_kovaleva@tut.by

Композиты на основе полиэтиленов, наполненных карбидом бора, представляют собой перспективный материал для создания гибких, лёгких и экологически чистых изделий, а также покрытий с повышенной прочностью и износостойкостью. Кроме того, высокая способность бора к поглощению тепловых нейтронов делает эти композиты многообещающими для применения в области радиационной защиты [1, 2]. Увеличение содержания наполнителя способствует улучшению функциональных свойств полимерного композиционного материала, однако может негативно сказаться на его механических характеристиках. Одной из причин этого является недостаточная адгезия частиц наполнителя к матрице, что делает необходимым их химическое или механическое модифицирование. Применение обработки в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице позволяет добиться равномерного распределения высокодисперсных частиц наполнителя в полиэтилене и увеличить его концентрацию до 70–90 мас. % [2].

В отличие от сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) полиэтилен высокого давления (ПЭВД) обладает разветвлённой структурой и имеет более низкие значения кристалличности, плотности и прочностных свойств, но характеризуется высокими показателями эластичности и текучести расплава, хорошо перерабатывается.

Цель работы – исследование влияния концентрации карбида бора на структуру и технологические свойства порошков механосинтезированных композитов ПЭВД/В₄С.

Использованы исходные коммерческие порошки ПЭВД (Wenzhou Huate Hot Melt Co., Ltd., размер частиц ~ 210 мкм, степень кристалличности $\chi \sim 48\%$) и карбида бора В₄С (LTS, чистота 99,8 %, размер частиц ~ 40 мкм). Механическая активация (МА) смеси ПЭВД+хВ₄С ($x = 10, 20, 30$ и 40 мас. %) проведена в планетарной шаровой мельнице «Активатор 2S» с энергонапряжённостью 0,9 Вт/г в атмосфере аргона в течение 20 мин. Исследования фазового и структурного состояния выполнены на дифрактометре D8 Advance (Bruker, Германия) с излучением $\text{CuK}\alpha$. Спектральный анализ проведен на ИК-Фурье спектрометре Nicolet iS10 (ThermoScientific, США) методом нарушенного полного внутреннего отражения на кристалле алмаза с учётом поправки. Степень кристалличности оценивалась по соотношению оптических плотностей полос поглощения 730 см^{-1} и 720 см^{-1} .

Установлено, что при МА частицы В₄С с увеличением их концентрации в смеси больше измельчаются и фрагментируются: размер частиц уменьшается от 10–25 мкм до 4–15 мкм при 40 %, а размер кристаллитов уменьшается от 164 до 32 нм. При МА формируется фаза, обогащённая бором В_{6,5}С. Композиционные частицы имеют чешуйчатую форму и сильно разветвлённую морфологию поверхности, что отражается на снижении насыпной плотности композиционных порошков с увеличением содержания В₄С от 0,32 до 0,25 г/см³ (насыпная плотность исходного полиэтилена – 0,34 г/см³). Из-за высокой абразивной способности карбида рентгенографически определяется намол железа 6–8 мас. %.

С увеличением концентрации В₄С от 10 до 40 мас. % степень кристалличности ПЭВД снижается с 39 до 22 %. Снижается интенсивность полос поглощения, обусловленных колебаниями концевых метильных групп δCH_3 , винилиденовых групп $=\text{C}=\text{CH}_2$ $\omega_{\text{CH}_2} = 888\text{ см}^{-1}$ и ω_{H} винильных групп $\text{RHC}=\text{CH}_2$ 908 см^{-1} , а в композитах с 40 мас. % В₄С последние исчезают, что может указывать на формирование химической связи полимера с карбидом. После нагрева до 105 °С кристалличность полимера частично восстанавливается (45–33 %), но винилиденовых групп нет. Отмечается снижение количества концевых метильных групп, что, предположительно, указывает на стойкость к удару и сдвигу при обработке в мельнице из-за высокой сегментальной подвижности макромолекул. Полос С-О, которые указывали бы на окислительную деструкцию полимера, не обнаружено.

Таким образом, увеличение концентрации В₄С (до 40 мас. %) в композитах ПЭВД при МА приводит к снижению размера частиц наполнителя (до 4–15 мкм) и степени кристалличности полимера (с 48 % до 22 %). МА обеспечивает формирование однородных порошков с улучшенными технологическими свойствами, перспективных для создания радиационно-защитных и износостойких материалов.

1. Avcioğlu S., Buldu-Akturk M., Kaya F., etc. Processing and properties of boron carbide (B₄C) reinforced LDPE composites for radiation shielding // *Ceramics International*. — 2020 (46), 343–352
2. Жорник В.И., Ковалева С.А., Григорьева Т.Ф., и др. Формирование структуры высоконаполненных композитов на основе СВМПЭ в условиях механической активации для получения радиационно-защитных материалов // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2019, № 4, 70–78

ИЗУЧЕНИЕ КРАТЕРА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ПОСРЕДСТВОМ 3D-СКАНИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ ИЗЛУЧЕНИЕМ CO₂-ЛАЗЕРА

Я.А. Ковалёва, П.Н. Гракович, А.В. Шаповалов

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Совершенствование технологии лазерной абляции имеет научную значимость во многих отраслях знаний. Эффекты, связанные с образованием при этом волокнистых продуктов, несут информацию о механизме разложения этого полимера. Так, в области материаловедения — это разработка способа получения дисперсных частиц с уникальными свойствами из термопластов. В области физики и химии полимеров — совершенствование технологии процесса и установление закономерностей взаимодействия лазерного излучения с полимерами и др. [1–3].

Цель работы. Получить объёмные характеристики и скорость роста кратера образцов политетрафторэтилена, полученных при различном времени облучения CO₂-лазера, посредством 3D-сканирования.

Материалы и методы исследований. Лазерная абляция образцов политетрафторэтилена проводилась на вакуумной установке ВУП-4 при различном времени выдержки под непрерывным излучением CO₂-лазера. Одновременно при облучении проводился мониторинг изменения массы образца с помощью микровесов, на которых размещался облучаемый образец. Сканирование поверхности образцов проводилось с помощью оптического 3D-сканера RangeVision Neopoint (Россия, принцип сканирования – ИК структурированный подсвет, 3D точность – до 50 мкм), расчёт и исследование поверхности – в программном обеспечении сканера – RV 3D Studio.

Результаты и их обсуждение. В таблице 1 представлена часть полученных объёмных характеристик кратера политетрафторэтилена при разном времени облучения. Установлено, что при увеличении времени облучения более 30 с кратер растёт более чем в два раза быстрее, при этом скорость потери массы начинает снижаться. Также кажущаяся плотность удалённого материала до 30 с соответствует плотности фторопласта, однако при облучении свыше 30 с она снижается. Все это вместе косвенно говорит о том, что после 30 с облучения рост волокон из кратера уменьшается, появляется ещё одна фаза – вязко-текучая, которая стекает по стенкам на дно, о чем свидетельствует скорость потери массы, а также кажущаяся плотность.

На рисунке 1 представлено графическое изображение изменения формы кратера политетрафторэтилена во время лазерной абляции. Сканирование производилось на остывших образцах. Диаметр каждого

кратера больше, чем диаметр луча лазера. Таким образом, мы можем утверждать, что во время облучения лазером образец расширяется. А также можно предположить, что в образце на глубине, равной разнице между диаметрами кратера и луча лазера, происходит деструкция, которая даёт дальнейшие продукты – волокна и сополимеры.

Таблица 1. Объёмные характеристики кратера политетрафторэтилена при различном времени облучения

t, с	5	15	30	45	90	120
V, мм ³ /с	1.92	2.71	2.83	4.72	4.65	4.55
V _m , мг/с	4.80	7.13	7.83	8.51	8.00	7.29
ρ _к , мг/мл	2.5	2.63	2.77	1,80	1,72	1,60

Примечание. t – время облучения, V – скорость роста объёма кратера, V_m – скорость потери массы, ρ_к – кажущаяся плотность удалённого материала

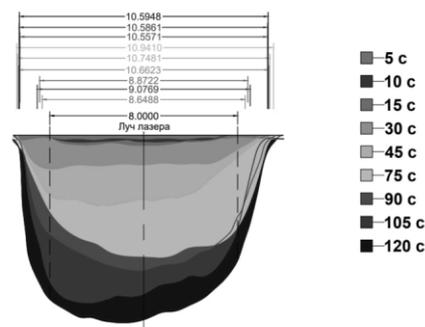


Рис. 1. Графическое изображение изменения формы кратера

Заключение. Применение нового 3D-метода исследования объёма кратера и его формы позволило рассчитать скорость роста кратера и потери массы образца, что даёт возможность управлять параметрами времени облучения лазером политетрафторэтилена с целью совершенствования технологии процесса получения волокнисто-пористых материалов.

- Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Калинин Л.А., Рябченко И.Л., Толстопятов Е.М., Красовский А.М. Лазерная абляция политетрафторэтилена // Российский химический журнал. — 2008 (52), № 3, 97–105
- П.Н. Гракович [и др.] Формирование пористых слоёв политетрафторэтилена путём лазерной абляции // Взаимодействие излучений с твёрдым телом: м-лы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, Беларусь, 21-24 сент. 2021 г. / редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. — Минск: БГУ. — 2021, 47–51
- Cozzens R. F. Infrared laser ablation of polymers / Cozzens R. F., Fox R. B. // Polymer Engineering & Science. — 1978 (18), no. 11, 900–904

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩИХ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЭПОКСИДНЫХ ГРУПП, АРМИРОВАННЫХ ХАОТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СТЕКЛЯННЫМИ ВОЛОКНАМИ И ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

В.И. Колесников¹, В.В. Бардушкин^{2,3}, И.В. Лавров^{2,3},
А.П. Сычев^{1,4}, А.А. Сычев¹, В.Б. Яковлев^{2,3}

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Зеленоград, Россия

³Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия

⁴Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия; alexc_sap@mail.ru

Цель

Целью работы является построение модели и проведение численных расчётов эксплуатационных (эффективных) характеристик – модуля Юнга и коэффициента Пуассона – полимерных антифрикционных композитов (ПАФК) с учётом состава и объёмных долей их компонентов.

Материалы и методы

Рассматриваются ПАФК на основе связующих с высоким процентным содержанием эпоксидных групп – ЭПАФ (35%), УП-610 (33%) и ЭХД – (28%). Указанные связующие перспективны для создания высокопрочных и термостойких трибокомпозитов. Исследуемые ПАФК армируются хаотически ориентированными в пространстве материала волокнами бесщелочного стекла (БЩС) и дисперсными добавками политетрафторэтилена (ПТФЭ).

Моделирование опирается на обобщённое сингулярное приближение теории случайных полей [1, 2]. На основе полученного в работе соотношения для вычисления компонент тензора эффективных модулей упругости для ПАФК рассматриваемой структуры проведены исследования и расчёты влияния изменений объёмных долей волокон БЩС и включений ПТФЭ на эксплуатационные упругие характеристики (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) модельных трибокомпозитов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены результаты численных расчётов значений модуля Юнга E^* (ГПа) и коэффициента Пуассона ν^* модельных ПАФК от изменения объёмной доли $\nu_{\text{БЩС}}$ волокон БЩС. Объёмная доля $\nu_{\text{ПТФЭ}}$ включений ПТФЭ при моделировании полагалась равной 0.05.

На рис. 2 приведены результаты численных расчётов значений модуля Юнга E^* (ГПа) и коэффициента Пуассона ν^* модельных ПАФК от изменения объёмной доли $\nu_{\text{ПТФЭ}}$ включений ПТФЭ. Объёмная доля волокон БЩС $\nu_{\text{БЩС}}$ при моделировании полагалась равной 0.3.

Моделирование показало: 1) увеличение концентрации волокон БЩС приводит к росту значений модуля Юнга E^* модельных ПАФК, а увеличение

концентрации ПТФЭ – к снижению значений E^* ; 2) увеличение концентрации включений любого типа приводит к снижению значений коэффициента Пуассона ν^* модельных ПАФК; 3) поскольку вариации объёмных содержаний включений любого типа приводят к значительному изменению значений эффективных упругих характеристик ПАФК, необходимы дополнительные экспериментальные исследования по оптимизации концентраций как дисперсных включений ПТФЭ, так и волокон БЩС с целью максимального улучшения трибохарактеристик рассматриваемых ПАФК без существенного ухудшения их упруго-прочностных показателей.

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 125011200153-3.

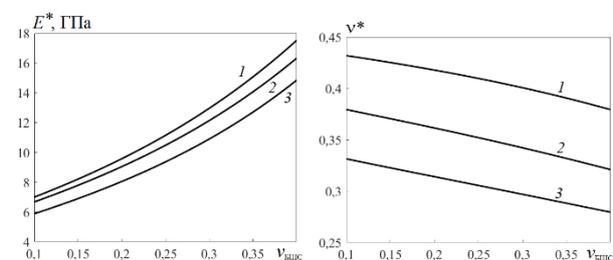


Рис. 1. Значения E^* и ν^* при увеличении $\nu_{\text{БЩС}}$: 1 – ЭПАФ; 2 – УП-610; 3 – ЭХД

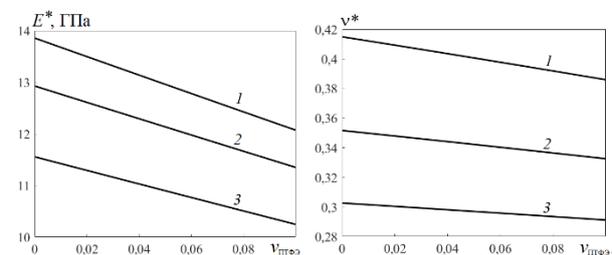


Рис. 2. Значения E^* и ν^* при увеличении $\nu_{\text{ПТФЭ}}$: 1 – ЭПАФ; 2 – УП-610; 3 – ЭХД

1. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред. — М.: Наука. — 1977
2. Колесников В. И., Бардушкин В. В., Яковлев В. Б., Сычев А. П., Колесников И. В. Микромеханика поликристаллов и композитов. — Ростов-на-Дону: РГУПС. — 2012

ВЛИЯНИЕ АЗОТФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО АНТИПИРЕНА НА СТОЙКОСТЬ К ТЕРМООКСИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ И ГОРЕНИЮ ПОЛИЭТИЛЕНА

Ю.М. Кривогуз, А.А. Давыдов, В.В. Шевченко, О.А. Макаренко

Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; yurikriv@tut.by

Введение

Проблема снижения горючести полиэтилена (ПЭ) является актуальной, поскольку к крупнотоннажным полимерам предъявляются повышенные требования относительно сохранения свойств в условиях пожара. Существует несколько способов замедления процессов горения полимерных материалов, в том числе и материалов на основе ПЭ. Одним из основных считается введение в состав полимерных композитов огнезамедляющих веществ, которые называются антипиренами. Известен целый ряд антипиренов, которые понижают горючесть ПЭ. К их числу можно отнести азот-фосфорсодержащие замедлители горения, которые часто используют в комбинации с синергистами. Поскольку огнестойкость полимеров непосредственно связана с их термостабильностью, то определённый интерес представляют исследования термостабильности наряду с огнестойкостью композиций на основе ПЭ, содержащих азот-фосфорсодержащие антипирены.

Цель работы – оценка характера влияния азот-фосфорсодержащего антипирена на термоокислительную деструкцию и горение ПЭ.

Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследования использовали полиэтилен высокой плотности (ПЭВП, марка 276-73; производство ОАО «Казаньоргсинтез», РФ). В качестве замедлителей горения были выбраны азотфосфорсодержащий антипирен (АФП) с массовым содержанием фосфора 13,0 мас. % и борат цинка (БЦ) (молекулярная (брутто) формула: $2ZnO \cdot 3V_2O_5 \cdot 3,5H_2O$). Подготовка образцов заключалась в смешении компонентов в двухшнековом экструдере TSSK-35/40 с последующей грануляцией полученного композиций. Общая концентрация антипиренов в исследуемых композициях составляла 23,0 мас. %. Эффективность действия замедлителей горения оценивали по скорости горения в соответствии с ГОСТом 28157-2018. Процесс термоокислительной деструкции изучен методом термогравиметрического (ТГ) анализа на приборе STA 449 Jupiter фирмы «Netzsch» при следующих условиях: скорость нагрева 4 °С/мин, нагрев осуществлялся в диапазоне 25–500 °С, в токе воздуха с объёмным расходом 20 см³/мин.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены ТГ кривые исследуемых ПЭ композитов.

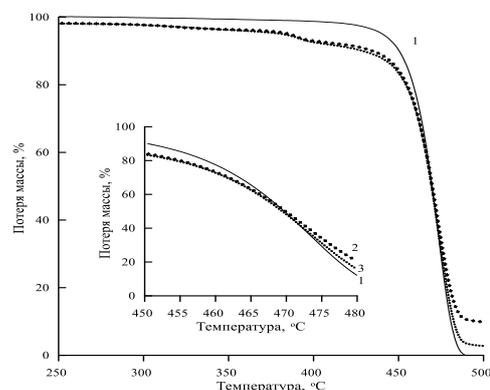


Рис. 1. ТГ кривые исходного ПЭ и ПЭ композитов, содержащих антипирены. 1 – ПЭ; 2 – ПЭ+АФП; 3 – ПЭ+АФП+БЦ

На ТГ кривой исходного ПЭ наблюдается одна ступень потери массы. ТГ кривые ПЭ+АФП и ПЭ+АФП+БЦ характеризуются двумя ступенями потери массы (рис. 1). Первая ступень обусловлена сублимацией антипиренов, которая наиболее активно происходит интервале температур 300–400 °С. На второй ступени происходит деструкция самого ПЭ. При этом начало деструкции ПЭ, содержащего антипиренирующие добавки, происходит при более низкой температуре по сравнению с исходным ПЭ. Как следует из рисунка, используемые в исследованиях замедлители горения снижают термическую стабильность ПЭ. Однако следует отметить, что добавки антипиренов ускоряют процесс коксообразования на поверхности ПЭ, что подтверждается увеличением количества твёрдого остатка при 500 °С (рис. 1).

При проведении испытаний на горючесть исходного ПЭ наблюдается активное распространение пламени с интенсивно падающими каплями расплава. Введение антипиренирующих добавок в объем ПЭ заметно снижает скорость горения и существенно замедляет каплепадение. Наблюдаемые изменения обусловлены, видимо, формированием в присутствии антипиренов на поверхности тестовых брусков коксоподобного слоя, препятствующего диффузии горючих продуктов в зону горения.

Таким образом, добавки исследуемых в данной работе антипиренов снижают температуру начала деструкции ПЭ. При введении антипиренов интенсивнее протекает процесс коксообразования, что способствует снижению скорости горения ПЭ и замедлению каплепадения.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант № T25B-005).

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 45

В.Г. Кудрицкий¹, Д.М. Гуцев¹, Е.Г. Акунец², А.В. Максименко³, И.В. Царенко²

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

²Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

³Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Беларусь

Цель работы. Оценить влияние технологических параметров процесса лазерной обработки поверхности стали 45 на её триботехнические характеристики и разработку рекомендаций для получения максимальной износостойкости.

Материалы и методы исследований. Исследуемые образцы — шайбы диаметром 40 мм, толщиной 10 мм из стали 45с параметром шероховатости $R_a 2,5$.

Лазерную обработку проводили на экспериментальной технологической установке на базе твердотельного лазера TL-400 [1]. Лазерное излучение генерировалось в кристаллах алюмо-иттриевого граната АИГ: Nd³⁺. Длина волны излучения 1,064 мкм, максимальное значение средней мощности 400 Вт. Диаметр лазерного пучка на выходе из резонатора $6 \cdot 10^{-3}$ м.

Триботехнические испытания проводились с помощью микротрибометра MTU-2K7 [2] по схеме сфера-плоскость при возвратно-поступательном движении сферы-контртела относительно плоскости исследуемого образца. Износ поверхности трения определялся прямым измерением ширины дорожки трения Н.

Результаты и обсуждения.

В таблице 1 и на рисунке 1 приведены результаты триботехнических испытаний образцов в зависимости от параметров лазерной обработки поверхности.

Таблица 1. Триботехнические характеристики исследуемых образцов

N	Параметры лазерной обработки			Триботехнические характеристики		HRC	H, мкм
				Зона прира-ботки	Зона установив-шегося трения		
	I, А	τ , мс	E, Дж	f_{sp}	f		
0	0	0	0	0,6	0,75	35	511
1	60	5	0,3	0,6	0,75	45	493
2	60	10	0,5	0,46	0,73	57	487
3	60	15	0,8	0,14	0,64	66	458
4	60	20	1,0	0,12	0,20	75	390
5	60	25	1,2	0,12	0,30	67	451

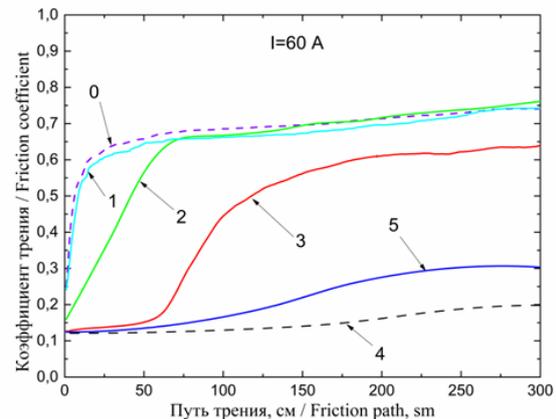


Рис. 1. Зависимости влияния режимов обработки на коэффициент трения: на рисунке «а»-0 — исходная поверхность; 1 — после обработки энергией 0,3 Дж, 60 А/5 мс; 2 — 0,5 Дж, 60 А/10 мс; 3 — 0,8 Дж, 60 А/15 мс; 4 — Дж, 60 А/20 мс; 5 — 1,2 Дж, 60 А/25 мс

В результате проведенных исследований было оценено влияние технологических параметров лазерной обработки на триботехнические характеристики стали 45.

В результате проведенных исследований удалось с помощью лазерной обработки снизить коэффициент трения поверхности в 3,5 раза и получить износостойкую ярко выраженной кристаллитную структурой и отсутствием поверхностных дефектов [3].

1. Установка для лазерной обработки: пат. РФ 34426, МПК7 В 23К 26/00, В 23К 26/02, В 23К 26/03, В 23К 26/067. заявл. 11.06.2003; опубл. 10.12.2003. / А.А. Бренько, В.Н. Мышниковец, А.В. Максименко, В.И. Рыбин, А.Н. Тучин, С.Н. Юркевич, Е.Г. Прищепов
2. Григорьев А.Я., Гуцев Д.М., Зозуля А.П., Ковалева И.Н., Кудрицкий В.Г., Мышкин Н.К., Семенов М.С. Возвратно-поступательный миллитрибометр MTU-2K7 // Трение и износ. — 2014 (35), № 6, 664—669
3. Акунец Е.Г., Гуцев Д.М., Кудрицкий В.Г., Максименко А.В., Царенко И.В. Влияние лазерной закалки на триботехнические свойства стали 45 / Трение и износ. — 2025 (46), № 2, 111—120. DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-2-111-120

ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНКАХ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА

С.М. Кулемина, Д.Э. Темнов

Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия;
sonia.kulemina@yandex.ru

Известно, что электретное состояние в полимерных материалах обуславливает их бактерицидное действие, тем самым увеличивая срок хранения продуктов [1]. Данное исследование может способствовать созданию устойчивых и экологически безопасных упаковочных материалов нового поколения, соответствующих современным требованиям.

Цель. Определить способы повышения электретной стабильности полимерных плёнок на основе полилактида.

Материалы и методы. Для проведения исследований были выбраны образцы полилактида (PLA), модифицированные различными концентрациями белой сажи в качестве наполнителя. Образцы были изготовлены в Казанском Государственном Технологическом Университете.

Исследования проводились методом термостимулированной релаксации поверхностного потенциала. Образцы поляризовались при температуре выше температуры стеклования ($T_g = 70\text{ }^\circ\text{C}$) в течение 10 минут, после чего, выключался нагрев и образцы в приложенном поле охлаждались до комнатной температуры. После чего поле отключалось и регистрировалась зависимость поверхностного потенциала от температуры при постоянной скорости нагрева $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Результаты исследования.

На рисунке 1 представлена температурная зависимость поверхностного потенциала для плёнок полилактида с содержанием 4 % белой сажи.

На полученных зависимостях видно, что спад потенциала у плёнок, поляризованных в поле положительного разряда, начинается раньше (около $60\text{--}65\text{ }^\circ\text{C}$), чем у плёнок, поляризованных в поле отрицательного разряда (около $70\text{--}75\text{ }^\circ\text{C}$). Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что глубина ловушек для отрицательного заряда больше, чем для положительного, следовательно образцы, обработанные в поле отрицательного разряда, обладают большей стабильностью. В связи с этим, дальнейшие исследования для данных образцов проводились только при отрицательном знаке короны.

Далее представлена температурная зависимость поверхностного потенциала для плёнок с разным процентным содержанием наполнителя.

Видно, что внесение белой сажи в полимерную матрицу плёнок PLA, увеличивает стабильность

электретного состояния. На основании приведенных результатов можно сделать вывод, что увеличение процентного содержания наполнителя до 4–6 % позволяет получить полимерные плёнки PLA с наилучшими электретными свойствами.

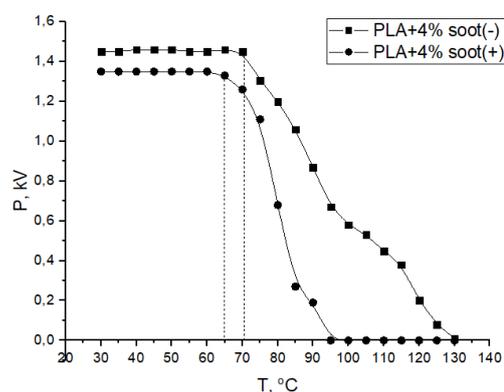


Рис. 1. Зависимость поверхностного потенциала от температуры для PLA+4% белой сажи, поляризованного в положительном и отрицательном коронном разряде

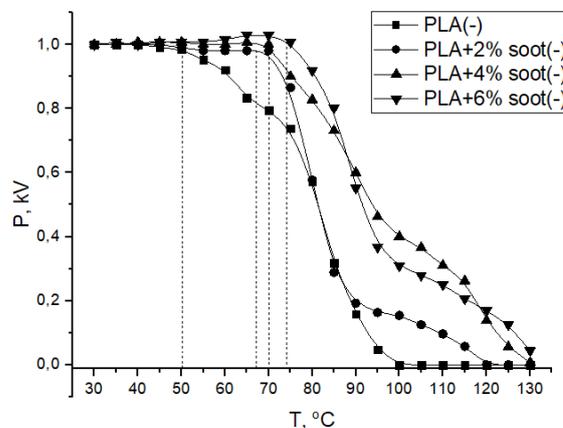


Рис. 2. Зависимости поверхностного потенциала от температуры для исходных плёнок, PLA + 2% белой сажи, PLA+4% белой сажи, PLA+6% белой сажи

Исследование выполнено за счёт внутреннего гранта РГПУ им. А. И. Герцена (проект № 57-ВГ).

Список литературы

1. Гороховатский Ю.А. Термоактивационная спектроскопия (феноменологическая теория, экспериментальная методика, примеры применения): монография. Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена. — Санкт-Петербург: Издательство РГПУ им. А.И. Герцена. — 2023

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Al-Cr-B-N

В.А. Лапицкая¹, Т.А. Кузнецова^{1,†}, Б. Вархолински², А.В. Хабарова¹, Т.В. Гамзелева³,
А. Гилевич², С.А. Чижик¹

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь; vasilinka.92@mail.ru

²Кошалинский технологический университет, Кошалин, Польша

³Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск, Беларусь

Добавление четвертого элемента (создание четырёхкомпонентных систем) в нитридные системы на основе AlCrN расширяет их функциональные свойства за счёт изменения механики поведения материалов под воздействием эксплуатационной нагрузки. Изменение механики происходит за счёт структурной перестройки многокомпонентных покрытий, которые превращаются в наноконструкты, где могут присутствовать как различные типы кристаллических решёток, так и аморфные фазы [1,2]. Добавление бора в различных концентрациях приводит к повышению микротвёрдости и износостойкости за счёт образования аморфного a-BN_x [3], а также снижает коэффициент трения покрытия за счёт образования на покрытиях сплошного слоя плёнки В₂О₃/В(ОН)₃ [3]. Также важную роль играют методы [4], параметры нанесения покрытий [5], изменяя которые можно управлять микрогеометрией поверхности и свойствами покрытий [6]. Немаловажное значение имеют и методы исследования [1]. Использование атомно-силовой микроскопии (АСМ) и наноиндентирования (НИ) позволяет с высокой точностью определять структуру и свойства покрытий в микроконтакте [1, 6]. Поэтому целью данной работы было изучение влияния параметров нанесения покрытий на микроструктуру, микромеханические и микротрибологические свойства покрытий Al-Cr-(B)-N с использованием высокоточных контактных зондовых методов.

Покрытия Al-Cr-B-N толщиной $4,4 \pm 0,1$ мкм наносились на стальные подложки методом катодного дугового испарения на установке TINA 900 M [1]. Покрытия Al-Cr-B-N осаждались при: 1) диапазоне давления азота p_{N_2} от 2 Па до 5 Па при постоянном токе дуги $I_c = 80$ А и напряжении смещения подложки $U_B = -100$ В; 2) диапазоне напряжения смещения подложки U_B от -50 до -150 В при $I_c = 80$ А и $p_{N_2} = 4$ Па; 3) изменении концентрации бора (от 0 до 20 %) при $p_{N_2} = 4$ Па, при постоянном токе дуги $I_c = 80$ А или 100 А, $U_B = -100$ В. РФА проводился с помощью рентгеновского дифрактометра Empyrean PANalytical. Морфологию покрытия анализировали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, LV 5500, JEOL) и АСМ Dimension FastScan (Bruker, США). Микромеханические и микротрибологические свойства определяли с помощью наноиндентора (НИ) Hysitron 750Ubi (Bruker, США).

С использованием АСМ и НИ были проведены исследования микроструктуры, микромеханических и микротрибологических свойств покрытий Al-Cr-(B)-N при различных параметрах осаждения покрытия (U_B ,

I_c , p_{N_2} и концентрация бора) [1]. РФА показала наличие кубической фазы CrN (c-CrN) и гексагональной фазы AlN (h-AlN). Исследования с помощью СЭМ показали, что параметры осаждения покрытия Al-Cr-B-N изменяют количество микрочастиц на поверхности. Исследования микроструктуры с использованием АСМ показали ячеистую структуру покрытий в областях, где нет микрочастиц [1]. Микромеханические свойства покрытий без бора выше, чем у покрытий, легированных бором [1]. Более высокие значения модуля упругости и микротвёрдости среди покрытий, легированных бором, получены на покрытии Al₆₀Cr₃₀B₁₀N при 100 А. Микромеханические свойства возрастают с ростом изменения давления азота и напряжения смещения на подложке. Коэффициент трения в микроконтакте и удельный объёмный износ, измеренный методом наноцарапания, уменьшаются с изменением U_B и p_{N_2} . У покрытий, нанесённых при 100 А и не легированных бором, коэффициент трения выше. Наиболее устойчивым покрытием в условиях многоциклового микроотречения оказалось покрытие Al₅₀Cr₃₀B₂₀N, что связано с низкой шероховатостью. Наименьший удельный объёмный износ получен на покрытии, легированном 10 % бора и нанесённом при 80 А: $0,23 \cdot 10^{-13}$ м³/Н·м при 80 А [1]. Таким образом, в данной работе кратко представлены результаты исследования на микро- и наноуровне структуры и свойств покрытий AlCrBN, нанесённых методом катодного дугового испарения при различных параметрах осаждения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т21МС-029.

1. Influence of the Cathode Current on the Structure, Mechanical and Microtribological Properties of Al-Cr-(B)-N Coatings / V. Lapitskaya et al. // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2025, <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11026-7>
2. Reiter A.E. et al. Investigation of the properties of Al_{1-x}Cr_xN coatings prepared by cathodic arc evaporation // Surf. Coatings Technol. — 2005 (**200**), 2114—2122
3. Cai F. et al. Microstructure evolution and high-temperature tribological behavior of AlCrBN coatings with various B contents // Surf. Coatings Technol. — 2022 (**430**), 127994
4. Jilani A., Abdel-Wahab M.S., and Hammad A.H. Advance Deposition Techniques for Thin Film and Coating // Mod. Technol. Creat. Thin-Film Syst. Coatings. — 2017
5. M.M. Al-Asadi, H.A. Al-Tameemi, A review of tribological properties and deposition methods for selected hard protective coatings // Tribol. Int. — 2022 (**176**), 107919
6. Kuznetsova T.A. et al. Effect of Atmosphere During Deposition on the Morphology, Mechanical Properties and Microfriction of Zr-Based Coatings // Adv. Struct. Mater. — 2022 (**155**), 271—319

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА БАЗОВЫХ МАСЕЛ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ НЕЧЕТКОГО TOPSIS

Л.Н. Марченко^{1,2}, В.В. Подгорная³, У.А. Зиямухамедова⁴, И.Н. Ковалёва³

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Беларусь;
marchenko@gsu.by

²Научно-образовательный математический центр «Северо-Западный центр математических исследований имени Софьи Ковалевской» Псковского государственного университета, Псков, Россия

³Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

⁴Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Введение. Выбор оптимального смазочного материала является важной задачей в промышленности, энергетике и транспорте. Современные масла должны соответствовать множеству разнородных критериев: обеспечивать низкий коэффициент трения, сохранять стабильность при экстремальных условиях эксплуатации, минимизировать износ узлов, обладать хорошими смазочными свойствами, иметь приемлемую стоимость, быть экологичными.

Базовые масла, используемые для разработки смазочных материалов, в зависимости от их вида, могут обладать различными по природе характеристиками и физико-химическими свойствами [1].

Цель работы – рассмотреть возможность применения нечёткой модели TOPSIS на примере ранжирования смазочных биоматериалов на основе их значимых характеристик и свойств.

Материалы и методы. В работе исследованы 6 видов масла: рапсовое, кокосовое, говяжий жир, И-40, ПАО-100, вазелиновое.

Определение оптимального базового масла с учётом нескольких характеристик представляет собой сложную многокритериальную задачу, где необходимо учитывать неопределённость и субъективность экспертных оценок. В работах [2, 3] используется метод TOPSIS для выбора оптимального базового масла с учётом физико-технических критериев. Однако экспертные оценки значимости характеристик (например, кислотное число, кинетическая вязкость) часто носят неопределённый характер из-за погрешностей измерений или субъективности, что делает традиционные методы многокритериального анализа ограниченными. Нечёткий метод TOPSIS позволяет эффективно находить оптимальные решения, комбинируя подходы теории нечётких множеств и классического TOPSIS и включает в себя необходимый функционал для постановки задачи, сбора экспертной информации, проведения оценок и анализа результатов, визуализацию индивидуальных предпочтений и групповых оценок, а также возможность выбора различных подходов к ранжированию исследуемых альтернатив. Все это делает возможным применение процесса группового многокритериального анализа для оптимизации выбора базовых масел при разработке смазочных материалов.

Результаты исследований и их обсуждение.

Как было показано в работе [2] наиболее значимыми свойствами являются: плотность, кинематическая вязкость и температура вспышки. В таблице приведены значения указанных свойств для исследуемых масел.

Свойства Масло	Плотность при 20 °С, кг/м ³	Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	Температура вспышки °С
Рапсовое	906,1	8,09	224
Кокосовое	925,0	8,25	232
Говяжий жир	870,0	7,38	225
Мин. И-40	890,0	8,50	200
ПАО 100	845,0	9,80	290
Вазелиновое	860,0	11,00	185

Приведённые в таблице значения проанализированы с помощью метода нечёткого TOPSIS, который представляет собой адаптацию классического метода TOPSIS для работы с неопределёнными данными, описываемыми нечёткими числами. Нечёткие оценки критериев определяются по экспериментальным данным и мнениям экспертов, физико-технические характеристики описываются нечёткими числами (треугольными и трапециевидными), что позволяет учесть погрешности и субъективность при формировании нечёткой матрицы решений. Идеальное решение представляет собой «наилучший» и «наихудший» вариант в нечёткой среде.

Выводы. Проведённое исследование позволило уточнить оптимальное масло среди растительных как базовое для разработки смазочных материалов.

1. Стрельцов В.В., Бугаев А.М. Перспективы использования в технике масел растительного происхождения // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. — 2010, 32, 47—49
2. Marchenko L.N., Kavaliyova I.N., and Podgornaya V.V. Selection of a Base Vegetable Oil for the Development of a Biodegradable Lubricant Using the TOPSIS Method // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2024 (53), no. 4, 313—320. DOI: 10.1134/S1052618824700195 (Springer, Фактор влияния журнала 0,4 (2023))
3. Md Hussain V.R., Gaval A.P. Pratap. Selection of vegetable oil based biolubricant using TOPSIS MCDM model // Materials Today Proceedings. — 2022 (62), no. 19

ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАН МЕМБРАН С ДОБАВКОЙ НЕРАСТВОРИТЕЛЕЙ В ФОРМОВОЧНЫЙ РАСТВОР

Е.А. Назаров, Т.А. Глевицкая, Е.С. Бурть, А.В. Бильдюкевич

Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;
nazevgeny@gmail.com

Ультрафильтрационные (УФ) мембраны, получаемые в основном методом инверсии фаз способом мокрого формования [1], обычно характеризуются выраженной асимметричной структурой с большим количеством макропустот, которые ухудшают механическую прочность мембран в процессе эксплуатации. Чтобы избежать образования макропустот прибегают к эффективному подходу — повышению вязкости формовочного раствора (ФР), что вызывает снижение скорости инверсии фаз путём увеличения концентрации мембранообразующего полимера, либо путём внесения добавок гидрофильных полимеров [2]. Цель данной работы заключалась в исследовании влияния добавок воды и глицерина в ФР на основе полиакрилонитрила (ПАН) на вязкость ФР, морфологию получаемых плоских УФ ПАН мембран, а также их транспортные свойства и устойчивость к загрязнению.

Материалы и методы. Для получения мембран использовали коммерческий сополимер акрилонитрила, метилакрилата и итаконовой кислоты (ПАН, $\langle M_n \rangle = 145\,000$ г/моль, ООО «АЛАБУГА-ВОЛОКНО»), глицерин (Химреактив, РФ), диметилсульфоксид (Химреактив, РФ), поливинилпирролидон $\langle M_n \rangle = 40\,000$ г/моль (Fluka, Германия). УФ-мембраны получали методом инверсии фаз, где в качестве осадительной ванны выступала вода, на подложке из полиэфирного нетканого полотна.

Результаты и их обсуждение.

Выявлено, что введение воды в ФР сужает область существования гомогенного раствора, в сравнении добавкой глицерина. Это вызвано тем, что вода является более жёстким осадителем, чем глицерин: число осаждения (Ч.О.) для воды – 14,2 г/дл, для глицерина – 33,4 г/дл. Установлено, что введение 6 мас.% воды и 13 мас.% глицерина в ФР приводит к повышению его вязкости с 21000 сР до 31300 и 47000 сР, соответственно, что способствует уплотнению структуры. В случае добавления 6 мас. % воды или 13 мас. % глицерина происходит формирование губчатой структуры (рис. 1, б, в), в то время как структура исходной мембраны характеризуется наличием большого количества макропустот в поддерживающем слое (рис. 1, а).

Показано, что удельная производительность по

воде снижается при внесении добавок воды и глицерина в ФР (табл. 1). Это вызвано уплотнением структуры формирующихся УФ-мембран (рис. 1).

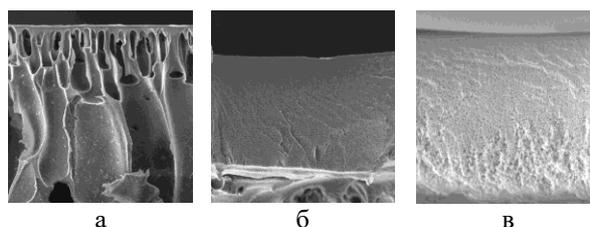


Рис. 1. СЭМ микрофотографии поперечных срезов ПАН мембран: а – исходная мембрана, б – мембрана с добавкой 6 мас.% воды, в – мембрана с 13 мас.% глицерина

Причём в случае воды данный эффект более выражен – наблюдается падение удельной производительности с 345 до 150–270 л/м²ч, а при добавке глицерина — до 310–350 л/м²ч. Уплотнение структуры мембран также вызвало повышение коэффициентов задерживания по ПВП К30. Стоит отметить также повышение устойчивости мембран к загрязнению (FRR) после фильтрации раствора ПВП.

Таблица 1. Транспортные характеристики УФ ПАН мембран

Добавка в ФР	Удельная производительность по воде, л/м ² *ч	R _{ПВП К-30} , %	FRR _{ПВП К30} , %
–	350	62	50
вода	150	71–79	67–80
глицерин	310	72–75	57–60

Таким образом, введение добавок воды или глицерина позволяет регулировать структуру и транспортные свойства ПАН мембран, без значительного повышения вязкости формовочных растворов, что перспективно для использования данных составов для получения плоских или полволоконных мембран.

- Tian L., Xing Y., Gao C., Ji S., Gong T., Bai Y., Gan F., and Wu Z. Construction of metal polyphenol network of phytic acid-Graphene oxide PES ultrafiltration membranes achieving high-efficiency separation of oil-water emulsions // J. Environmental Chemical Engineering. — 2024 (12), 114529.
- Wang Z.G., Xu Z.K., and Wan L.S. Modulation the morphologies and performance of polyacrylonitrile-based asymmetric membranes containing reactive groups: Effect of non-solvents in the dope solution // J. Membrane Science. — 2006 (278), 447–456

РОЛЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТРИБОСЛОЯ В ФОРМИРОВАНИИ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ СУПЕРКОНСТРУКЦИОННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ ПРИ ЛИНЕЙНОМ КОНТАКТЕ

С.В. Панин^{1,2}, Л.А. Корниенко¹, Д.Г. Буслевич¹, В.О. Алексенко¹, Д.Ю. Степанов¹,
С.А. Бочкарева¹, Чаньцзюнь Хе², Юань Шень², С.В. Шилько³

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия; svp@ispms.ru

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

³Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Введение. Междисциплинарные исследования конструкционных и функциональных (антифрикционных, биосовместимых, адаптивных, умных и т. п.) полимерных композитов актуальны в различных технических и медицинских приложениях. Перспективным способом «проектирования» структуры указанных неоднородных материалов является иерархическое армирование, когда свойства композита определяются взаимодополняющим вкладом наполнителей нано-, микро- и миллиметрового размерного диапазона [1]. Помимо применения современных термопластов в качестве т.н. суперконструкционных материалов, перспективно их использование в высоконагруженных узлах трения. Однако триботехнические и объёмные физико-механические характеристики этих материалов не всегда коррелируют, что во многом связано с формированием специфического приповерхностного слоя вторичных структур (трибослоя). Кроме того, следует учитывать химическое взаимодействие компонентов, оказывающее существенное влияние на коэффициент трения и температуру в контакте.

Целью исследования является оптимальное иерархическое армирование суперконструкционных термопластов, в т.ч. в зоне трибослоя, для достижения высоких антифрикционных характеристик в условиях линейного контакта.

Материалы и методы. В работе исследованы структура, механические и трибологические свойства микро- и нанокомпозитов на основе суперконструкционных термопластов (ПЭЭК, ПФС, ПЭС, ПИ, ПЭИ, ППА), различающихся химическим строением и, как следствие, способностью к формированию заданных эксплуатационных характеристик трибосопряжений. Для изменения условий трения в линейном контакте (схема «вал-колодка», сухое трение скольжения) в качестве контртела использовали металлическое (сталь ШХ15) и керамическое (ZrO_2) контртела. Наряду с типом полимерной матрицы, варьировались содержание и аспектное соотношение наполнителя (углеродных волокон), а также параметры нагрузочно-скоростного режима испытаний. Мониторинг состояния компонентов пары трения проводили по регистрируемым и отображаемым в реальном времени значениям коэффициента трения и температуры.

Результаты и их обсуждение. Показано, что вследствие массопереноса полимерного связующего, армированного фрагментами разрушенных углеродных волокон, на поверхности скольжения полимерного композита формируется ценный в трибологическом отношении композиционный трибослой. Дополнительное улучшение трибологических свойств в широком диапазоне нагрузок и скоростей скольжения достигается введением в состав композита неорганических частиц MoS_2 и графита.

Авторами предложены алгоритмы расчётного прогнозирования трибологических характеристик суперконструкционных термопластов, исходя из их состава и условий нагружения. Для определения оптимального состава наполнителей целесообразно использовать параметрический анализ, основанный на решении контактных задач с представлением неоднородного трибослоя в виде набора тонких адгезивно-связанных квазиоднородных слоёв [2]. Показана эффективность методов численного (конечно-элементного) моделирования, учитывающих шероховатость контртела, зависимость физико-механических свойств от температуры, развитие процессов трибоокисления и схватывания [1]. Наряду с указанными традиционными расчётными подходами, полезную информацию позволяют получить методы нейросетевого моделирования.

Заключение

Проведенные исследования показали значительные возможности улучшения триботехнических свойств суперконструкционных термопластов, что позволяет расширить их использование для создания узлов трения, работающих в экстремальных температурно-силовых режимах.

Благодарности. Исследование поддержано проектом FWRW-2021-0010, а также БРФФИ (проект № T24-067).

1. Panin S.V., Lyukshin B.A., Bochkareva S.A., et al. Material Design Methodology for Optimized Wear Resistant Thermoplastic-Matrix Composites Based on Polyetheretherketone and Polyphenylene Sulfide // *Materials*. — 2020 (13), no. 3, 524. [mdpi.com/1996-1944/13/3/524](https://doi.org/10.3390/ma13030524)
2. Шилько С.В., Черноус Д.А., Панин С.В. Моделирование биомеханически адекватных антифрикционного и соединительного слоев эндопротеза сустава // *Физ. мезомеханика*. — 2022 (25), № 5, 106—113. doi 10.55652/1683-805X_2022_25_5_106

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДАЕ.Н. Подденежный¹, А.А. Бойко¹, Н.Е. Дробышевская¹, В.М. Шаповалов²¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;
podd-evgen@yandex.ru²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь

Цель: разработка новых составов биоразлагаемых композиционных материалов на основе полиэфира – полилактида (ПЛА), наполненного кукурузным крахмалом (КК) и льнокострой (ЛК), получение образцов методом экструзии, изучение морфологии и структурных свойств.

Материалы и методы. Для получения биоразлагаемых материалов на основе ПЛА и КК были использованы следующие материалы: ПЛА Ingeo Biopolymer 4043D (Natureworks LLC, США), полиэтиленгликоль ПЭГ–4000, КК, ПАВ – моностеарат глицерина (МГ). TiO₂ (анатаз) применяли в качестве фотоактивного агента и красителя белого цвета. Ленты толщиной 0,5 мм вытягивали на одношнековом экструдере НААКЕ RHEOCORD 90 (Германия). Для фазового анализа использовали дифрактометр ДРОН-7 (Россия), ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ морфологии – СЭМ Vega II LSH Tescan (Чехия).

Результаты и их обсуждение. При получении композитов «ПЛА–КК» состав исходной шихты варьировали таким образом: 35–60 мас. % ПЛА, 20–55 мас. % КК, 5–15 мас. % ПЭГ, 4–5 мас. % МГ и 1 мас. % TiO₂.

Биоразлагаемый композит изготавливают по следующей схеме. Гранулы ПЛА смешивают с ПЭГ в скоростном обогреваемом турбосмесителе при температуре 80 °С, добавляют в смесь КК, выдерживают при 100 °С в течение 30 мин; далее добавляют МГ и TiO₂, продолжают нагрев и вращение до получения однородной смеси, затем охлаждают смесь до 25–30 °С и после этого шихту загружают в экструдер. Температура расплава на выходе из целевой головки 180–185 °С. На каландре формируется лента шириной 100 мм.

Наличие в исходной смеси пластификатора (ПЭГ) и ПАВ способствует формированию достаточно однородной структуры, в которой частицы крахмала статистически распределены в матрице. При увеличении концентрации крахмала до предельных значений (55 мас. %) происходит агломерация частиц наполнителя и резкое ухудшение механических свойств [1].

Исследование образцов методом РФА показало, что исходный ПЛА практически не имеет кристаллической фазы. При введении в состав композита ПЭГ и КК на дифрактограмме наблюдаются интенсивные рефлексы, которые, являются суперпозицией двух

отражений – от крахмала и кристаллической формы L-изомера ПЛА [2] (рис. 1).

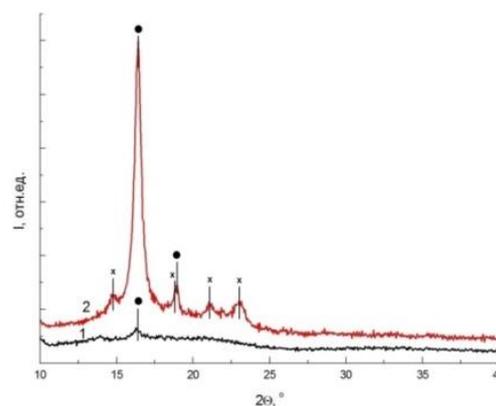


Рис. 1. Исходный ПЛА (1); композит ПЛА–КК–ПЭГ(2): ● – ПЛА/КК, x – ПЭГ

При получении композитов «ПЛА–ЛК» состав исходной шихты варьируют таким образом: 40–50 мас. % ПЛА, 30–40 мас. % порошка ЛК со средними размерами частиц 0,5 мм, 5–10 мас. % поливинилового спирта (ПВС), 8–12 мас. % ПЭГ–4000, 2–3 мас. % микроталька. ПВС применяется для улучшения совместимости ПЛА с частицами ЛК, а использование ПЭГ–4000 в качестве пластификатора и талька, как зародыше-образователя, способствует формированию L-изомера ПЛА, что повышает термостойкость композитов.

Полученные материалы полностью разлагаются в компосте в лабораторных условиях в соответствии со стандартом ISO 16929:2013 в течение 5–6 месяцев.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 8.4.1.17 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы» на 2021–2025 гг.

1. Подденежный Е.Н., Дробышевская Н.Е., Бойко А.А., Шаповалов В.М. Биоразлагаемые композиты на основе полилактида и органических наполнителей // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. — 2021, № 3, 20–26
2. Круль Л. П., Белов Д. А., Бутовская Г.В. Структура и физико-химические свойства биодegradуемых материалов на основе полилактидов // Вестник БГУ, 2011(2), № 3, 5–11

ПРИМЕНЕНИЕ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АНТИСТАТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ФТОРПОЛИМЕРОВ

В.П. Селькин, О.С. Стерехов, М.В. Карсакова

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь; selkin_v@mail.ru

Цель. Освоение промышленного производства одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) позволило снизить их стоимость на несколько порядков и сделать применение в промышленности экономически эффективным [1]. Благодаря высокому отношению длины к диаметру (при диаметре 1–2 нм усреднённая длина достигает более 5 мкм) они способны создавать при введении даже в незначительных количествах в материалы замкнутую электропроводящую сеть и являются одними из самых перспективных наполнителей при создании антистатических материалов. Целью настоящей работы было изучение возможности использования ОУНТ для получения антистатических и электропроводящих композитов на основе фторсодержащих полимеров.

Методика и материалы. Для введения в полимерную матрицу ОУНТ использовали предоставленный компанией OCSiAl концентрат, представляющий собой деагломерированные в полиэтиленовом воске ОУНТ Tuball (соотношение к воску 1:9). Концентрат вводили в наиболее распространённые плавкие фторполимеры ПВДФ и ЭТФЭ (соответственно фторопласт-2М марки П и фторопласт-40 марки П производства АО «ГалоПолимер») путём механического смешивания на шаровой мельнице и последующего прессования смеси при давлении 20 МПа при температуре 460–470 К (ПВДФ) или 580–570 К (ЭТФЭ) для получения образцов в виде плёнок. Удельное объёмное электрическое сопротивление образцов измеряли по ГОСТ 6433.2 с помощью тераомметра Е6-13А при испытательном напряжении 100 В. Предел прочности определяли по ГОСТ 14236 на испытательной машине Shimadzu Autograph AGS-1 kNX.

Результаты исследований. Результаты исследования представлены на рисунке 1. Установлено, что введение более 3 мас. % концентрата (содержание ОУНТ в композите более 0,3 мас. %) обеспечивает ПВДФ и ЭТФЭ антистатические свойства (удельное объёмное электрическое сопротивление не более $1 \cdot 10^8$ Ом·м). При содержании добавки более 5 мас. % (0,5 мас. % ОУНТ) в композите на основе ЭТФЭ и 10 мас. % (1 мас. % ОУНТ) в композите на основе ПВДФ их электрическая проводимость достигает значений полупроводников (удельное объёмное электрическое сопротивление менее $1 \cdot 10^5$ Ом·м). Увеличение концентрации ОУНТ в полимерной матрице как ЭТФЭ, так и ПВДФ более 1 мас. % не приводит к существенному изменению их электрического сопротивления. В тоже время прочность композитов с увеличением содержания концентрата снижается

по близкой к экспоненциальной зависимости (рис. 2). Разупрочнение объясняется использованием в качестве основы концентрата низкомолекулярного полиэтиленового воска.

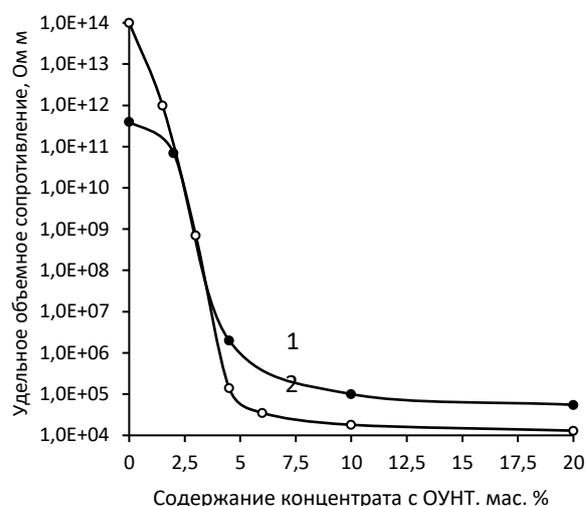


Рис. 1. Зависимость удельного объёмного электрического сопротивления ПВДФ (1) и ЭТФЭ (2) от содержания концентрата с ОУНТ

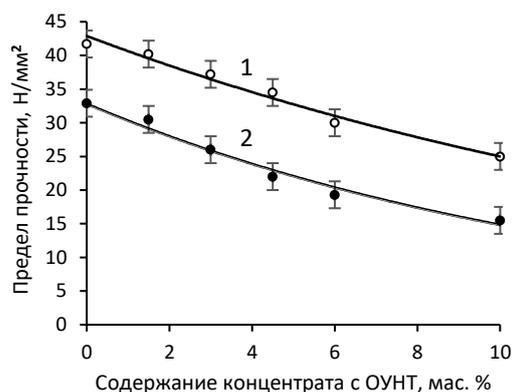


Рис. 2. Зависимость предела прочности ПВДФ (1) и ЭТФЭ (2) от содержания концентрата с ОУНТ

Выводы. Показана возможность получения с использованием концентрата с деагломерированными ОУНТ Tuball антистатических и электропроводящих (с проводимостью на уровне полупроводников) композитов на основе плавких фторполимеров (ПВДФ и ЭТФЭ).

1. Tuball. URL: [https:// www.tuball.com](https://www.tuball.com) (дата обращения: 12.05.2025).

ИЗМЕНЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ КОМПАУНДОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ПРИ ГИГРОТЕРМИЧЕСКОМ СТАРЕНИИ

В.П. Сергиенко, С.Н. Бухаров, В.К. Меринов, А.С. Тулейко

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; vitali.merinov@gmail.com

Введение. Современная электронная промышленность интенсивно осваивает технологические процессы по снижению линейных размеров базовых элементов, что позволяет уменьшить размеры корпуса чипа. Это повышает требования к герметизирующему компаунду печатной платы. В качестве матричного материала в большинстве технических решений используются эпоксидные смолы, модифицированные неорганическими наполнителями [1]. Таким образом, разработка герметизирующих компаундов, обеспечивающих снижение вероятности межфазного расслоения и растрескивания полимерных инкапсулированных электронных устройств и, тем самым, повысить надёжность и долговечность радиоэлектронной аппаратуры, является актуальным и практически важным направлением исследований.

Целью работы является исследование вязкоупругих характеристик герметизирующих компаундов на основе эпоксидной смолы при гигротермическом старении.

Материалы и методы. Подготовлены модельные эпоксидные компаунды на основе смолы ЭД-20, полимеризованные аминным отвердителем при комнатной температуре в течение трёх суток. В качестве модифицирующих надобавок использовали одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) марки OCSiAl и монтмориллонит (МР) марки KSF. Вязкоупругие характеристики материалов в зависимости от температуры и частоты в условиях гигротермических воздействий исследовали методом нерезонансного динамического механического анализа с помощью анализатора DMA-Q800 (TA Instruments, США).

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 приведены температурные зависимости тангенса угла механических потерь эпоксидного компаунда, наполненного ОУНТ в количестве 0,3 мас. %. Анализ результатов показал, что область максимальных значений тангенса угла механических потерь находится в диапазоне от 60 °С до 90 °С с небольшим отклонением для исследованных частот. Амплитудное значение максимума тангенса превышает 1,25 и наблюдается для частоты 1 Гц.

На рисунке 2 представлены температурные зависимости тангенса угла механических потерь (при частоте 1 Гц) эпоксидных компаундов, наполненных МР.

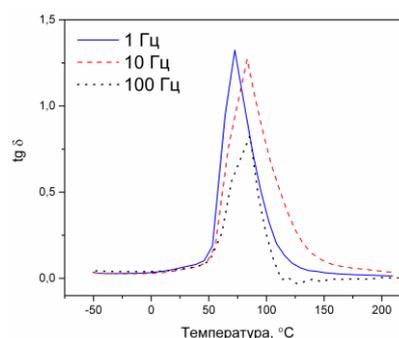


Рис. 1. Температурные зависимости тангенса угла механических потерь компаунда, содержащего 0,3 мас. % УНТ

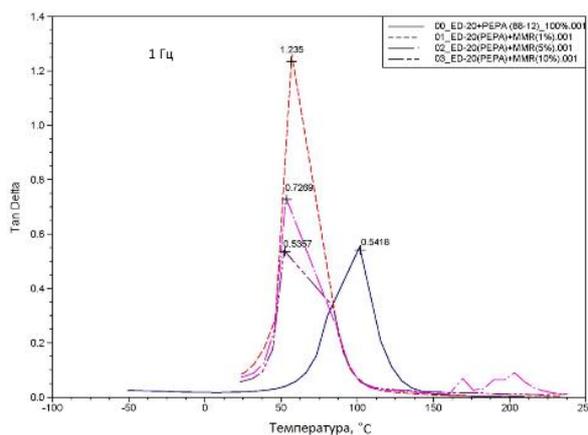


Рис. 2. Температурные зависимости тангенса угла механических потерь эпоксидных компаундов: 1 – исходный состав; 2, 3, 4 – компаунды, содержащие ММТ соответственно 1, 5 и 10 мас. %

Показано, что основным модифицирующим эффектом при введении наноразмерного силикатного наполнителя МР является смещение температурного пика максимальных механических потерь ($T_{\text{tg}\delta\text{max}}$) в область низких температур на $44,8 \div 49,0$ °С.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т23МЭ-040).

- Сергиенко В.П., Алексиев А.Р., Бухаров С.Н. Влияние углеродных и силикатных нанодобавок на частотные характеристики вязкоупругих свойств эпоксидных компаундов // Полимерные материалы и технологии. — 2025 (11), № 1, 59–64

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

В.П. Сергиенко¹, С.Н. Бухаров¹, А.С. Тулейко¹, Н.С. Абед²

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; anastasiakhmara@gmail.com

²Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиет» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

Цель

В рамках работы проведено экспериментальное исследование закономерностей звукопоглощения наполнителей природного происхождения в качестве наполнителя акустических композитов. В аспекте возможности использования данного наполнителя в открытых условиях при воздействии внешних атмосферных факторов представляла особый интерес оценка влияния температуры на частотную характеристику звукопоглощения и звукоизоляции в нормируемом диапазоне звуковых частот.

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований, позволяющих установить влияние температуры в диапазоне температур от минус 60 °С до плюс 60 °С на частотные характеристики звукопоглощения и звукоизоляции предложена серия измерений в ходе нагрева образцов в импедансной трубе при нормальных условиях после их предварительного охлаждения в жидком азоте и измерений в ходе охлаждения тестовых образцов после их нагрева в термостатическом шкафу. Измерение коэффициентов звукопоглощения и звукоизоляции проведено методом двухмикрофонных импедансных труб 4206 в соответствии с методикой стандарта ISO 10534–2. Образцы толщиной 10 мм, содержащих в качестве основного по объёму природного наполнителя рисовую шелуху и наномодифицированную эпоксидную смолу в качестве связующего, полимеризованного отвердителем аминного типа

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования влияния температуры на акустические характеристики композитов демонстрируют частотные зависимости нормального коэффициента звукопоглощения (рис. 1) и звукоизоляции воздушного шума (рис. 2).

Анализ полученных характеристик звукопоглощения на рисунке 1 показывает, что при повышении температуры на 1 °С частотный максимум звукопоглощения смещается на 8–10 Гц. Кроме того, в отрицательной области температур (рис. 1, а) отмечается практически линейный рост максимальных значений звукопоглощения с 0,86 до 0,90 при снижении температуры от 0 °С до минус 60 °С.

Анализ частотных зависимостей,

представленных на рис. 2, показывает, что в области отрицательных температур. Общая закономерность повышения звукоизоляции воздушного шума с понижением температуры установлена в области частот до 3,0–3,7 кГц (рис. 2, а), что обусловлено ростом динамического модуля упругости. В области положительных температур (рис. 2, б) повышение температуры приводит к небольшому росту звукоизоляции, связанному с увеличением тангенса потерь матричного полимера. Однако следует отметить, при температурах выше минус 20 °С уровни наблюдаемых температурных эффектов становятся сопоставимы с неопределённостью измерений применяемых акустических методов.

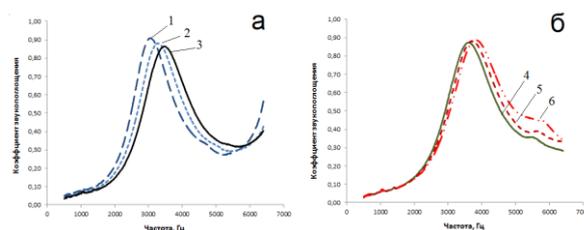


Рис. 1. Частотные характеристики звукопоглощения композитов а) нагрев образцов после охлаждения в среде жидкого азота; б) охлаждение образцов после нагрева в термшкафу: 1 – минус 60 °С; 2 – минус 20 °С; 3 – 0 °С; 4 – плюс 20 °С; 5 – плюс 40 °С; 6 – плюс 60 °С

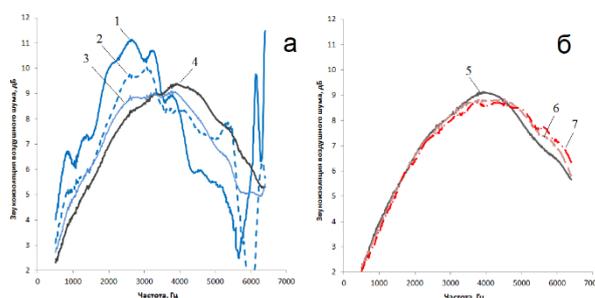


Рис. 2. Частотные характеристики показателя звукоизоляции воздушного шума композитов: а) нагрев образцов после охлаждения в среде жидкого азота; б) охлаждение образцов после нагрева в термшкафу: 1 – минус 60 °С; 2 – минус 20 °С; 3 – 0 °С; 4 – плюс 20 °С; 5 – плюс 40 °С; 6 – плюс 60 °С

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т23УЗБ-031.

МОДИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕМБРАН ДЛЯ НАНОФИЛЬТРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ γ -ЦИКЛОДЕКСТРИНА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СОЛЕЙ ЛИТИЯ ИЗ ЕГО СМЕСЕЙ С СОЛЯМИ МАГНИЯ

А.А. Степанюк, Т.В. Плиско, Е.С. Бурть, А.В. Бильдюкевич

Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Цель работы – разработка методов получения и модификации композиционных мембран для нанофильтрации для выделения солей лития из смесей с солями магния. В рамках данной работы было предложено два подхода для модификации композиционных мембран, полученных методом межфазной поликонденсации: формирование промежуточного слоя на основе γ -циклодекстрина и введение γ -циклодекстрина в селективный слой на основе полиамида.

Материалы и методы.

В качестве пористой мембраны-подложки для разработки композиционных мембран использовали ультрафильтрационные мембраны, полученные из формовочного раствора состава 20 % полисульфона (ПС), 0,5 % поливинилпирролидона ($M_n = 40$ кДа, ПВП К-30), 79,5 % N,N-диметилацетамида (ДМАА). γ -Циклодекстрины использовали для приготовления модифицирующих растворов для формирования промежуточного слоя. Нанесение промежуточного слоя проводили методом адсорбции в режиме перемешивания при контакте с селективным слоем мембраны-подложки в течении 1 часа. Концентрация γ -циклодекстрина в растворе составляла 0,3, 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 5 мас. %. Селективный слой на основе полиамида наносили методом межфазной поликонденсации на ультрафильтрационную мембрану-подложку с адсорбированным слоем γ -циклодекстрина. Для формирования полиамидного слоя методом межфазной поликонденсации использовали 4 % раствор пиперазина (ПИП) в воде и 0,24 % раствор тримезоилхлорида (ТМХ) в нефрасе С2. Для реализации второго метода модификации в раствор ПИП вводили 0,5, 1, 2 и 3 мас. % γ -циклодекстрина.

Результаты и их обсуждение. Методом прикрепленного пузырька определяли угол смачивания по воде селективного слоя мембран-подложек. Установлено снижение угла смачивания по воде с 55° для исходной мембраны-подложки до 46° при увеличении концентрации γ -циклодекстрина в модифицирующем растворе до 5 мас. %, что свидетельствует о гидрофилизации поверхности мембраны.

Исследование транспортных характеристик модифицированных ультрафильтрационных мембран показало, что удельная производительность мембран по воде при $\Delta P = 0,1$ МПа плавно снижается с $262 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ до $123 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ при увеличении концентрации γ -циклодекстрина в модифицирующем растворе с 0 до 5 мас. %.

Установлено, что при формировании промежуточного слоя на основе γ -циклодекстрина и

селективного на основе полиамида удельная производительность по воде характеризуется максимумом при концентрации γ -циклодекстрина в модифицирующем растворе 1 мас. % и достигает $112 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ при $\Delta P = 0,5$ МПа. Показано, что в процессе нанофильтрации индивидуальных солей (MgSO_4 и LiCl) коэффициент задерживания по сульфату магния увеличивается с 92 % до 98 %, а по хлориду лития уменьшается с 38 % до 22 % для мембраны с концентрацией γ -циклодекстрина в модифицирующем растворе 1,5 мас. % по сравнению с исходной мембраной.

Установлено, что максимум фактора разделения солей магния и лития (MgSO_4 и LiCl , $\text{Mg/Li} = 18$, общая концентрация – $5 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$) 34 наблюдается при концентрации γ -циклодекстрина в модифицирующем растворе 0,3 мас. %.

Установлено, что для композиционных мембран с промежуточным слоем, полученным с использованием 2 мас. % раствора γ -циклодекстрина, максимум удельной производительности по воде достигается при концентрации γ -циклодекстрина в растворе пиперазина 2 мас. % и составляет $40 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ при $\Delta P = 0,5$ МПа. Показано, что фактор разделения увеличивается с ростом концентрации γ -циклодекстрина (с 0 до 3 мас. %) в растворе пиперазина с 11 до 49 (табл. 1).

Таблица 1. Фактор разделения смеси солей (MgSO_4 и LiCl) при различных концентрациях γ -циклодекстрина в модифицирующем растворе при формировании промежуточного и селективного слоев

Концентрация γ -циклодекстрина в растворе ПИП, мас.%	Концентрация γ -циклодекстрина в растворе при формировании промежуточного слоя, мас.%	
	0	2
0	7	20
0,5	7	11
1	11	12
2	52	12
3	81	49

Установлено влияние введения γ -циклодекстрина только в селективный слой композиционной мембраны. Выявлено, что с ростом концентрации γ -циклодекстрина в растворе ПИП удельная производительность по воде проходит через максимум при концентрации 1 мас. % γ -циклодекстрина в водном растворе и достигает $42,5 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ при $\Delta P = 0,5$ МПа. Показано, что фактор разделения $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ увеличивается с ростом концентрации γ -циклодекстрина (с 0 до 3 мас. %) в растворе ПИП с 7 до 81 (табл. 1).

НАПРАВЛЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКИХ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ В РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ В СРЕДЕ ОКТАФТОРЦИКЛОБУТАНА

В.А. Стратанович, Л.Ф. Иванов, В.А. Шелестова, В.М. Макаренко,
Д.В. Брель, В.А. Ломач

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь; vitalystratanovich.mpri@gmail.com

Введение. Плазмохимическая обработка (ПХО) материалов в низкотемпературной разрядной плазме, включающая как активационное воздействие неполимеризующихся соединений [1], так и формирование функциональных нанослоев методом плазменной полимеризации [2], вызывает значимые изменения в физико-химическом состоянии приповерхностных слоёв толщиной менее 0,1 мкм. Данный подход открывает широкие возможности для направленного регулирования адгезионных характеристик как сплошных, так и волокнисто-пористых объектов. Данный подход позволяет придавать материалам требуемые гидрофобные или гидрофильные свойства, а также повышать их технологическую совместимость при создании композиционных систем [3].

В этой связи настоящее исследование имеет своей целью установление закономерностей плазмохимической обработки синтетических и углеродных волокон в условиях тлеющего разряда пониженного давления.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись полиоксадиазольные нити, ткани (ПОД), нетканые материалы и углеродные ткани, получаемые пиролизом полиоксадиазола (ПОД-УВ), а также полиэфирно-вискозный материал «Спанлейс»). ПХО ПОД-нитей проводили в разрядной плазме переменного тока при пониженном давлении в среде остаточного воздуха (ОВ) с целью активационной обработки. Остальные волокнистые материалы (ВМ) обрабатывали в разряде октафторциклобутана (ОФЦБ) с предварительной активацией в ОВ. Напуск газов осуществляли с помощью системы СНА-2. Кажущийся краевой угол смачивания (ККУС) определяли по методу сидячей капли. Капиллярность определяли непрерывным измерением массы жидкости, капиллярно поднятой образцом испытуемого материала [4].

Изучение структуры волокнистых материалов осуществлялось электронной микроскопией, а также спектроскопическими методами.

Результаты и обсуждение. При обработке ПОД-нитей в разряде остаточного воздуха наблюдается двукратное повышение капиллярности, что может быть вызвано физико-химическими изменениями, обусловленными воздействием заряженных частиц и электромагнитным излучением разрядной плазмы, изменением морфологии поверхности и прививкой функциональных кислород- и азотсодержащих функциональных групп [1], ответственных за

повышение гидрофильных свойств.

Обработка ВМ в разряде ОФЦБ приводит к формированию тонких функциональных полимеризованных фрагментов на их поверхности. Они детектируются спектроскопическими методами, электронной микроскопией и характеризуются высоким содержанием фтора (до 37 %). Величина ККУС тканей Арселон-С, иглопробивного материала «Филарс», ПОД-УВ, а также полиэфирно-вискозного нетканого материала, подвергнутых модифицированию в разряде ОФЦБ может достигать 148°, что свидетельствует об эффективной гидрофобизации. Дополнительным подтверждением этому служит значительное снижение, а в отдельных случаях полное отсутствие капиллярного подъёма тестовых жидкостей.

Таблица 1 – Поверхностные характеристики волокон после обработки в разрядной плазме

Вид материала	ККУС, °	
	Дистиллят	Глицерин
ПОД		
– Нить 100 текс (ОВ)	Капля растекается	
– Ткань «Арселон-С»	≈148°	≈127°
– Иглопробивной материал «Филарс»	≈139°	≈131°
ПОД-УВ	≈139°	≈135°
ПЭТФ-Вискоза «Спанлейс»	≈140°	≈137°

Рассмотренные в данной работе плазмохимически модифицированные ВМ могут найти практическое применение с целью совершенствования существующих и создания новых отечественных импортозамещающих полимерных композиционных и фильтрующих материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Работа выполнена в рамках задания НИР-3 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма 8.4 «Многофункциональные и композиционные материалы» и гранта НАН Беларуси № 2025-26-029.

1. Менагаришвили В.М. Кинетика и механизм взаимодействия активного кислорода с пленками полимеров: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04. — Иваново. — 1990
2. Ясуда Х. Полимеризация в плазме. — М.: Мир. — 1988
3. Шелестова В.А. Плазменное нанесение фторполимерного покрытия на углеродные волокна для улучшения свойств фторопластовых композитов // *Материалы, технологии, инструменты*. — 2010 (15), № 3, 39—51
4. Способ определения капиллярности лент, тканей, нитей и нетканых материалов и устройство для его осуществления: заявка ВУ а2024110. — Оpubл. 15.05.2024. / В.А. Стратанович, Л.Ф. Иванов, П.Н. Гракович

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ДОПАНТА НА ДИНАМИКУ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Е.М. Толстопятов, Л.А. Калинин

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Параметры лазерной абляции (ЛА) полимер - полимерных смесей в значительной степени определяются химическим строением, концентрацией и характером распределения допирующей добавки в мишени. Одним из механизмов влияния допанта на ЛА является изменение коэффициента поглощения излучения, определяющего глубину его проникновения в мишень и локальную плотность выделяющейся в ней мощности.

Цель. Получение новых результатов по абляции допированного различными добавками ПТФЭ непрерывным излучением CO₂ лазера.

Материалы и методы. Порошки ПТФЭ и допанта (ПХТФЭ, вторичный низкомолекулярный ПТФЭ, канифоль) смешивались миксером, на завершающем этапе – с добавлением гексана или этанола с целью облегчения диспергирования агломератов. Полученные смеси выдерживались при комнатной температуре в течение 2-х суток, после чего досушивались при температуре 120–140 °С в течение 2-х часов. Давление прессования смесей составляло 27 МПа. Термообработка производилась по типовым температурно-временным режимам монолитизации ПТФЭ.

Абляция проводилась несфокусированным лучом лазера ЛГН-703 мощностью 40–45 Вт в камере установки ВУП-4 при непрерывной откачке диффузионным насосом.

Динамические параметры ЛА определялись цифровым измерителем силы, создаваемой весом композитной мишени, снижающимся в ходе абляции, и реактивной силой отдачи абляционного потока. Значения силы автоматически передавались в компьютер каждые 126,5 мс.

Результаты и их обсуждение. Образец, допированный ПХТФЭ приобрёл лёгкий коричневатый оттенок. Связано это с тем, что ПХТФЭ при температуре спекания 370 °С частично разлагается. Можно предположить, что на длине волны лазерного излучения 10,6 мкм его коэффициент поглощения также изменяется; при этом следует учесть, что даже в исходном состоянии он имеет значительно более высокую поглощающую способность.

На рис. 1 приведены зависимости от времени силы, воздействующей на датчик силоизмерителя,

при абляции чистого ПТФЭ и ПТФЭ, допированного 1 вес. % ПХТФЭ. Как видно, динамические зависимости абляции этих мишеней существенно различаются. Прежде всего, введение в мишень допанта привело к существенному снижению величины начального выброса и к сдвигу его к меньшим временам от начала облучения. При этом средние скорости абляции за весь период облучения у образцов практически одинаковы.

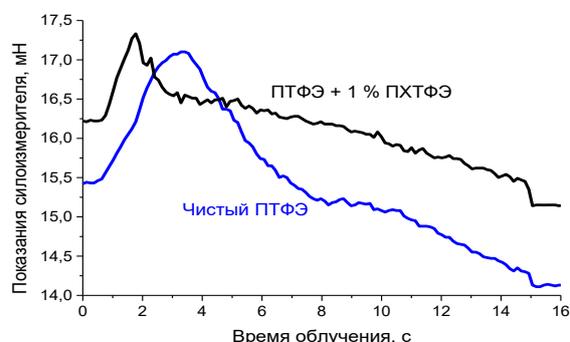


Рис. 1. Динамические зависимости абляции

Таким образом, введение допанта ПХТФЭ влияет главным образом на величину и время образования реактивного импульса отдачи абляционного потока.

Другая особенность в абляции чистого ПТФЭ заключается в формировании «плеча» на динамической кривой в интервале 8–10 с, когда показания силоизмерителя остаются практически стабильными при непрерывном уменьшении веса мишени. Предполагается, что в этом интервале снижение веса компенсируется ростом реактивной силы отдачи, происходящим вследствие образования кратера оптимальной для этого формы, обеспечивающей фокусировку импульса отдачи. В дальнейшем импульс отдачи монотонно снижается из-за роста давления абляционных газов в камере абляции.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований «Многофункциональные и композиционные материалы», подпрограммы 8.4, задания 4.2.2 НИР-3.

ТРЕНИЕ И ИЗНОС МОДИФИЦИРОВАННЫХ МДО ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Е.В. Торская^{1,2}, А.А. Хади², П.О. Буковский¹, В.Н. Малышев³

¹Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; torskaya@mail.ru

²Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

³РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

Введение. Микродуговое оксидирование позволяет получить на поверхности алюминиевых сплавов покрытия, хорошо защищающие от коррозии, износостойкие, устойчивые к различным излучениям. Но они имеют относительно высокий коэффициент трения и малую устойчивость к сдвиговой деформации. Улучшение свойств покрытий возможно при их модификации путём добавления в электролит различных добавок [1]. Целью разработчиков модифицированных покрытий во многих случаях является увеличение износостойкости покрытий и уменьшение коэффициента трения скольжения в паре с различными материалами. Добавление антифрикционного модификатора непосредственно в электролит позволяет получать МДО-покрытия с улучшенными прочностными свойствами. Одним из возможных модификаторов является мелкодисперсный фторопласт (ООО «Владфорум»).

Целью данной работы является изучение влияния типа сплава и количества полимерного модификатора на трение и износ МДО покрытий.

Материалы и методы. В работе были исследованы МДО покрытия, созданные на коммерческих сплавах Д16 и В95. В базовый электролит добавлялся полимерный модификатор в сочетании со Синтанолом от 0,5 до 6 г/л, всего восемь вариантов покрытий (образцы в виде дисков).

Испытания на трение проводились на триботестере (MFT-5000, Rtec, USA) в режиме однонаправленного скольжения шарика из карбида кремния (диаметр 10 мм) по поверхности образцов при постоянной нагрузке: 10 Н, скорости 0,1 м/с, общий путь трения – 1000 м. Радиус трека варьировался. Испытание повторялось трижды для усреднения итогового результата.

На оптическом профилометре S neox 3D (Sensofar-Tech, Spain) были получены оптические изображения дорожек трения (объектив 20X) и пятна контакта контртела.

Результаты и их обсуждение. Было получено, что линейный износ контртела составляет не более 10 мкм (рис. 1).

Были получены зависимости коэффициента трения от времени для всех образцов (рис. 2). Значения

коэффициента трения в среднем меньше, чем для контакта керамика-керамика. Они меняются в диапазоне от 0.1 до 0.5, что связано с наличием антифрикционного модификатора. В то же время, наличие модификатора в электролите способствует увеличению пористости керамического покрытия (этот эффект сильнее выражен для сплава Д16 (рис. 2)

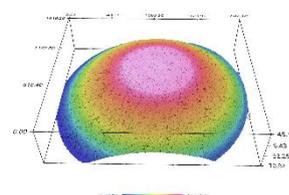


Рис. 1. Поверхность износа шарика из карбида кремния

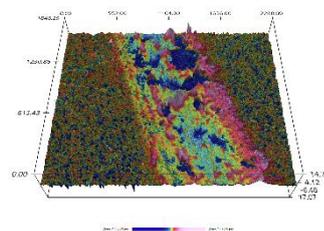


Рис. 2. Дорожка трения

Как показано на рис. 2, покрытие является износостойким (износ на уровне шероховатости) при малых концентрациях модификатора.

Таким образом, существует оптимальное, для данных условий фрикционного контакта, количество модификатора, обеспечивающее снижение трения, но не увеличивающее критически пористость покрытия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024)

1. Torskaya E., Shkalei I., Morozov A., Stepanov F., Malyshev V., Svistkov A. Structure, friction and wear of AlZn5.5MgCu based PEO coatings modified by diamond nanoparticles and silver micropowder // Tribol. Int. — 2025 (203), 110417

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИАМИДА 6, МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛИФАТИЧЕСКИМ ПОЛИКЕТОНОМ В ДВУХШНЕКОВОМ ЭКСТРУДЕРЕ

В.Н. Усова, Ю.М. Кривогуз

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; viktoriya.usovav@mail.ru

Введение

Модифицирование современных композиционных материалов на основе полиамидной матрицы позволяет существенно расширить диапазон свойств и номенклатуру конечных композитов. Весьма перспективным подходом является введение в полиамид, на стадии его переработки, различных полимерных добавок, в структуре которых содержатся функциональные группы, способные к реализации межфазных взаимодействий. К названному типу модифицирующих добавок можно отнести алифатические поликетоны (АПК). В их химической структуре содержатся алифатические фрагменты (этиленовые, пропиленовые или другие α -олефиновые) и кетонные группы, которые реакционноспособны по отношению к функциональным группам полиамидов [1, 2].

Динамические механические свойства подобных композитов изучены крайне мало. Хотя они достаточно чувствительны к составу и структурным особенностям полимерных смесей и композитов, и могут быть существенно изменены в ходе их переработки, в том числе, и методом экструзии за счёт варьирования технологическими параметрами.

Цель работы – анализ температурных зависимостей динамических механических свойств полиамида 6, модифицированного алифатическим поликетонном в двухшнековом экструдере при разных частотах вращения шнеков.

Материалы и методы исследований

В работе использовали ПА6 марки для контакта с пищевыми продуктами («Гродно Азот», РБ). Модифицирующей добавкой служил АПК марки M330F («Hyosung Corporation», Ю. Корея) в виде порошка со средним размером частиц 5–7 мкм.

Модифицирование ПА6 добавкой АПК производилось в двухшнековом экструдере «TSSK-35/40» («Zhangjiagang Jorbin Machinery», КНР) с односторонним вращением шнеков (диаметр шнеков 35 мм, $L/D = 40$, производительность 50 кг/ч, 10 секций материального цилиндра). Температура в основных зонах смешения материального цилиндра экструдера составляла 225 °С. Частота вращения шнека при этом изменялась в пределах от 150 мин⁻¹ до 550 мин⁻¹.

Измерения динамических механических характеристик, таких как динамический модуль упругости

(E') и тангенс угла механических потерь ($\text{tg}\delta$), проводили на приборе «DMA 8000» («Perkin Elmer», США) в режиме одноконсольного изгиба с частотой 1 Гц при скорости нагревания 2 °С/мин. В качестве образцов использовали бруски размером 13,0×4,8×3,2 мм, которые вырезали из рабочей части лопаток типа 5 (ГОСТ 11262), полученных литьём под давлением. Динамические механические свойства ПА6, модифицированного 3 мас. % АПК, исследовали в диапазоне от минус 150 °С до плюс 200 °С.

Результаты и их обсуждение

Образцы ПА6, модифицированные добавкой АПК в количестве 3 мас. %, обладают более высокими значениями E' по сравнению с исходным ПА6 во всем исследуемом интервале температур. В области отрицательных температур наиболее высокие значения E' характерны для ПА6, модифицированного 3 мас. % АПК при $v_{\text{ш}} = 150$ мин⁻¹, и при температуре минус 70 °С они стремятся к величине, равной 2,71 ГПа. В области положительных температур наиболее высокие значения E' характерны для ПА6, модифицированного 3 мас. % АПК при $v_{\text{ш}} = 300$ мин⁻¹. Наблюдаемые изменения в характере температурных зависимостей динамического модуля упругости для модифицированного ПА6 от $v_{\text{ш}}$ могут быть объяснены с позиций энергии межмолекулярного взаимодействия и структурной организации результирующих материалов, и свидетельствуют о влиянии $v_{\text{ш}}$ на формирование структуры посредством образования сетки физических и химических узлов, представляющих межмолекулярные взаимодействия и водородные связи. Анализ температурных зависимостей $\text{tg}\delta$ подтверждает вывод о влиянии $v_{\text{ш}}$ на интенсивность межмолекулярных взаимодействий в модифицированном ПА6 и на формирование структуры конечных материалов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант № T24M-016).

1. Белов Г. П., Новикова Е. В. Поликетоны – чередующиеся сополимеры монооксида // Успехи химии. — 2004 (73), № 3, 292–319
2. Hong Gu Kwon, Jungyeon Park, Namho Kim, Shichoon Lee, Jaeyoon Shim, Mincheol Lee, and Younggon Son. High impact strength of aliphatic polyketone/polyamide 6 blends induced by a chemical reaction // Journal of Elastomers and Plastics. — 2023 (55), no. 4. doi: 10.1177/00952443231158781

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПОКРЫТИЙ AlN И TiN МЕТОДОМ НАНОСКРЕТЧ-ТЕСТА

А.В. Хабарова¹, В.А. Лапицкая¹, С.А. Чижик¹,
А.Л. Николаев², Е.В. Садырин², С.С. Волков², С.М. Айзикович²

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь; av.khabarova@mail.ru

²Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Введение. Испытания наноскретч-тестом – это методика оценки как адгезионных, так и когезионных свойств, а также микротрибологических характеристик тонких покрытий [1]. Во многих моделях процессов трения на микроуровне рассматривают взаимодействие выступов (профиль поверхности покрытия) с некоторой поверхностью (индентором), в отличие от макротрибологии [2].

Материалы и методы исследований. Покрытия TiN и AlN нанесены вакуумно-магнетронным методом с помощью системы VSM 100 (ROBAC, Россия) на кремниевые подложки ориентации (100), на быстрорежущую сталь марки P6M5 и на инструментальную сталь марки X18H10. Концентрация азота изменялась от 1 до 3 см³/мин с шагом 0,01 см³/мин каждые 12 секунд, мощность распыления 200 Вт, температура 200 °С для покрытий TiN. Концентрация азота изменялась от 0,75 до 3,75 см³/мин с шагом 0,01 см³/мин каждые 10 секунд, мощность распыления 100 Вт при температуре 20 °С для покрытий AlN.

Микротрибологические свойства покрытий определяли наноиндентором Hysitron 750 Ubi (США) с использованием конического алмазного индентора с радиусом кривизны острия 226 нм: наносили по 3 царапины длиной 6 мкм за 15 с при постоянной нагрузке 1000, 1500, 2000 мкН – для покрытий TiN, и 50, 75 и 100 мкН – для покрытий AlN; проводили многоцикловые испытания с длиной одного прохода 6 мкм за 10 циклов длительностью 5 с/цикл при нагрузке 2000 мкН для покрытий TiN и при нагрузке 100 мкН для покрытий AlN.

Результаты и их обсуждение. По результатам определения среднего коэффициента трения $k_{тр}$ покрытий TiN и AlN при постоянных нагрузках методом нанощарапания (таблица 1) установлено, что коэффициент трения изменяется от 0,21 до 0,37 на покрытия TiN и от 0,17 до 0,27 на покрытия AlN. Повышение значений $k_{тр}$ коррелирует с увеличением значений шероховатости поверхности и изменениями физико-механических свойств. Самые низкие значения $k_{тр}$ покрытия TiN получены на кремниевой подложке – изменяются в пределах от 0,21 до 0,33, а для покрытия AlN – на подложке X18H10 – от 0,17 до 0,25.

По результатам многоциклового испытания нанощарапанием покрытий TiN при нагрузке 2000 мкН и покрытий AlN при нагрузке 100 мкН получены

значения $k_{тр}$, которые выходят на стабильные после 3 цикла трения (рисунок 1), так как на 4–10 циклах происходит уплотнение материала.

Таблица 1. Коэффициент трения покрытий TiN и AlN, полученный методом наноскретч-теста

		$k_{тр}$	$\pm k_{тр}$	$k_{тр}$	$\pm k_{тр}$	$k_{тр}$	$\pm k_{тр}$
Нагрузка		1000 мкН		1500 мкН		2000 мкН	
TiN	Si	0,205	0,036	0,266	0,059	0,330	0,085
	P6M5	0,210	0,040	0,269	0,070	0,327	0,089
	X18H10	0,222	0,049	0,304	0,072	0,366	0,099
Нагрузка		50 мкН		75 мкН		100 мкН	
AlN	Si	0,176	0,155	0,221	0,219	0,207	0,147
	P6M5	0,210	0,231	0,213	0,179	0,271	0,186
	X18H10	0,165	0,166	0,186	0,153	0,248	0,193

При испытании покрытия TiN значения коэффициента трения равномерно снижаются от 0,31–0,34 до 0,19–0,20. Многоцикловое испытание покрытий AlN отражает существенное снижение коэффициента трения – от 0,24–0,26 (при первом цикле) до 0,06–0,08 (на 10 цикле).

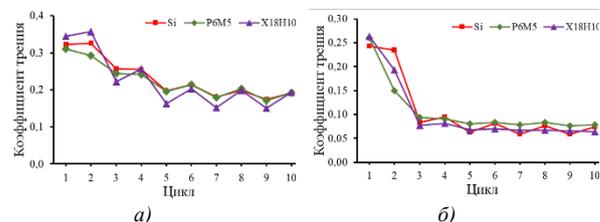


Рис. 1. Изменение коэффициента трения при многоцикловых испытаниях покрытий TiN (а) и AlN (б) методом наноскретч-теста

Заключение. При помощи наноскретч-теста изучены микротрибологические свойства покрытий TiN и AlN. Низкий коэффициент трения получен на покрытия TiN, осаждённом на P6M5 – 0,21–0,32. Низкие микротрибологические свойства получены у покрытия AlN, осаждённого на X18H10 – $k_{тр}$ при постоянной нагрузке изменяется от 0,15 до 0,19, при многоцикловых испытаниях среднее значение составляет 0,10.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ № T23РНФ-132.

- Tomastil J. and Ctvrtlik R. Nanoscratch test – a tool for evaluation of cohesive and adhesive properties of thin films and coatings // The European Physical Journal Conferences. – 2013. (48), 00027
- Лукашин А.В., Елисеев А.А. Применение функциональных наноматериалов. — Москва: МГУ. — 2007

ВЛИЯНИЕ ГИБРИДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТАЛЬКА И ЭПОКСИДИРОВАННОГО СОЕВОГО МАСЛА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА L-ПОЛИЛАКТИДА

В.В. Шевченко, Ю.М. Кривогуз, О.А. Макаренко

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь; mpri.shevchenko@gmail.com

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и динамического механического анализа (ДМА) изучено совместное влияние талька и эпоксирированного соевого масла (ЭСМ) на теплофизические и релаксационные свойства L-полилактида (ПЛА). Композиции ПЛА с тальком и ЭСМ готовились путём компаундирования данных компонентов в двухшнековом экструдере «TSSK-35/40» при температуре расплава в зонах смешения и выдавливания 190 °С. Способ компаундирования и методы исследования аналогичны представленным в публикации [1]. Количество ЭСМ в объёме ПЛА составляло 3, 5, 10, 15 и 20 % при неизменной концентрации талька 10 %. Количество талька в ПЛА составляло 1, 2, 3, 5, 10 % при неизменной концентрации ЭСМ 10 %.

Ведение ЭСМ в присутствии талька приводит к увеличению подвижности макромолекул, что проявляется в повышении температуры стеклования (T_g) при росте содержания ЭСМ (таблица 1). При этом изменение концентрации минерального наполнителя при постоянной концентрации ЭСМ не вызывает сдвига максимума пика стеклования по температурной шкале.

Таблица 1. Результаты анализа методом ДМА

№	Состав композиции	T_g , °С при частоте	
		1 Гц	10 Гц
1	ПЛА + 1% тальк + 10% ЭСМ	62,7	67,4
2	ПЛА + 2% тальк + 10% ЭСМ	62,9	66,8
3	ПЛА + 3% тальк + 10% ЭСМ	62,0	66,7
4	ПЛА + 5% тальк + 10% ЭСМ	62,2	66,8
5	ПЛА + 3% ЭСМ + 10% тальк	63,2	67,8
6	ПЛА + 5% ЭСМ + 10% тальк	63,4	67,1
7	ПЛА + 10% ЭСМ + 10% тальк	61,9	66,5
8	ПЛА + 15% ЭСМ + 10% тальк	62,4	66,8
9	ПЛА + 20% ЭСМ + 10% тальк	61,3	66,3

Из данных ДСК видно, что изменение концентрации талька при содержании ЭСМ 10 % не вызывает изменения температуры стеклования (рис. 1, а), которая остаётся в пределах 57–58 °С. При этом температура холодной кристаллизации снижается с 124 °С до 110 °С при увеличении содержания талька с 1 % до 4 %, что связано с нуклеирующим действием минерального наполнителя, частицы которого становятся центрами кристаллизации и способствуют росту количества мелких кристаллитов и тем самым повышению скорости кристаллизации.

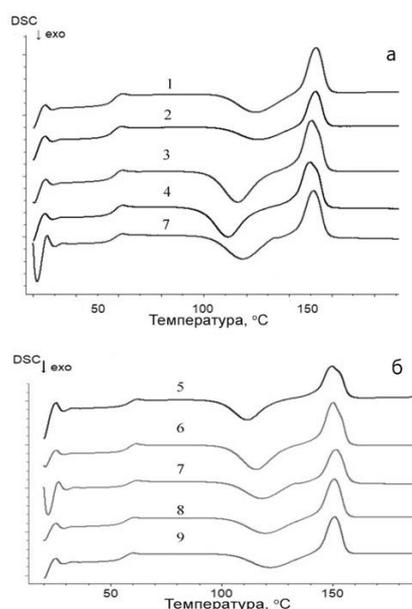


Рис. 1. ДСК-кривые нагрева

Температура плавления ПЛА снижается с ростом содержания талька, поскольку мелкие кристаллиты, сформированные в присутствии нуклеирующих частиц, плавятся быстрее.

В случае варьирования концентрацией ЭСМ при постоянном содержании талька равном 10 % характер влияния гибридного наполнителя на теплофизические свойства ПЛА меняется (рис. 1, б): наблюдается заметный рост $T_{x,кр}$ биополимера с увеличением содержания ЭСМ, тогда как другие теплофизические характеристики изменяются в меньшей степени. Обнаруженный эффект свидетельствует о том, что изменение соотношения ЭСМ и талька способно оказывать влияние на баланс между нуклеирующей способностью и способностью ограничивать подвижность макроцепей гибридного наполнителя. Вероятно, что при повышенном соотношении ЭСМ/тальк формируется такая структурная организация гибридного наполнителя, которая затрудняет холодную кристаллизацию и повышает значения $T_{x,кр}$ ПЛА.

1. Кривогуз Ю.М., Шевченко В.В., Макаренко О.А. Изучение воздействия модификаторов различной природы на теплофизические и релаксационные свойства L-полилактида. Часть I. Влияние талька и эпоксирированного соевого масла // Полимерные материалы и технологии. — 2023 (9), № 4, 75–82

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНТАКТНЫХ ПЕН НА ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ

С.В. Шилько¹, Д.А. Черноус^{1,2}, Цян Чжан³, Кай Сунь³

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

³Факультет материаловедения и техники, Харбинский технологический институт, Харбин, Китай

Введение. Синтактные пены (СП), образованные введением стеклянных микросфер в металлическую или полимерную матрицу, используются в качестве конструкционных, тепло- и электроизоляционных материалов пониженной плотности. В последние годы на основе СП создаются «умные материалы», обладающие свойством самозалечивания структурных повреждений (разрушение микросфер инициирует полимеризацию присутствующего в них реагента). Моделирование СП методами микромеханики затрудняется следующими причинами:

1. Внешний радиус большинства изготавливаемых в настоящее время стеклянных микросфер в десять раз и более превышает их толщину. При подобном соотношении размеров компонент композита существенно снижается точность расчётных оценок механических характеристик СП на основе статистического подхода и метода самосогласования.

2. Условие прочности СП нарушается в момент начала разрушения микросфер. Однако данному моменту может предшествовать переход части материала матрицы в пластическое состояние. При этом существенно затрудняется использование аналитических методов для описания дальнейшего деформирования композита.

3. Расчёт предела прочности синтактной пены при сжатии предполагает возможность разрушения микросфер, как тонкостенных оболочек, вследствие потери устойчивости.

4. При определении эквивалентных характеристик рассматриваемых СП следует учитывать вязкость полимерной матрицы.

Ранее авторами был выполнен микромеханический анализ СП на металлической матрице [1] с привлечением трёхфазной модели дисперсно-наполненного материала [2].

Целью исследования является построение и апробация модифицированной методики расчётного определения модулей упругости и предела прочности синтактной пены на полимерной матрице, позволяющей учесть отмеченные выше особенности.

Результаты и их обсуждение. В отличие от классической расчётной схемы дисперсно-наполненного композиционного материала, включения СП представляют собой сферические оболочки, внутренняя поверхность которых свободна от нагрузки. Было проведено сопоставление результатов использования различных методик определения характеристик композиционных материалов с известными экспери-

ментальными данными для синтактной пены на эпоксидной матрице [3]. Показано, что применение методов самосогласования и моментных функций приводит к существенно (на 20 % и более) завышенным значениям эквивалентного модуля Юнга. Для методики, основанной на трёхфазной модели, отклонение расчётного модуля Юнга от экспериментального значения не превышает 6 %.

Учёт вязкости материала матрицы в рамках трёхфазной модели осуществляется на основе упруго-вязкоупругой аналогии. Данный подход позволил адекватно интерпретировать различие в характере зависимости экспериментально определяемых статического и динамического модулей упругости СП на эпоксидной матрице от объёмной доли наполнителя (микросфер).

Трёхфазная модель композита позволяет прогнозировать значения не только упругих характеристик, но и предела прочности синтактной пены. Рассматривались три варианта начала разрушения композита: (1) появление трещин в стеклянной оболочке; (2) переход части материала матрицы в пластическое состояние; (3) потеря устойчивости оболочек микросфер. Установлено, что для синтактной пены на эпоксидной матрице при пористости микросфер менее 92 % характерен первый механизм разрушения. Если пористость микросфер превышает 92 %, реализуется третий механизм. Среднее относительное отклонение полученных расчётных оценок предела прочности от известных из литературных источников экспериментальных значений не превышает 10 %.

Заключение. Разработана методика расчётного определения упруго-прочностных характеристик синтактных пен, позволяющая комплексно учесть основные отличительные особенности структуры и свойств данного композита. Результаты сопоставления расчётных значений с известными экспериментальными данными для синтактной пены на эпоксидной матрице свидетельствуют о правомерности использования разработанной методики.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке БРФФИ (проект № T24-067).

1. Shil'ko S.V., Chernous D.A., Zhang Q., Lin Y., and Choe H. Uni-axial Compression Model for a Metal-Matrix/Hollow-Microsphere Composite Synthesized by Pressure Infiltration // *Mechanics of Materials*. — 2020 (144), 103349 (7 p.)
2. Christensen R. *Mechanics of Composite Materials*. — New York: John Wiley & Sons. — 1979
3. Swetha C. and Kumar R. Quasi-Static Uni-Axial Compression Behaviour of Hollow Glass Microspheres/Epoxy Based Syntactic Foams // *Materials & Design*. — 2011 (32), 4152—4163

ВЛИЯНИЕ ПОЛИПАРАКСИЛИЛЕНОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Ю. Шумская, Д.В. Брель, Л.Ф. Иванов, В.А. Стратанович, Е.М. Толстопятов, Л.А. Калинин
Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь; viktoriya-shumsk@mail.ru

Введение. Тенденции развития производства фильтрующих элементов для очистки промышленных технологических сред определяются требованиями к повышению эффективности фильтрации за счет снижения перепада давления, уменьшения размеров, увеличения прочности, повышения производительности, увеличения срока эксплуатации [1, 2]. Расширение сферы применения фильтроматериалов возможно за счёт использования материалов с адаптированными к фильтруемой среде поверхностными свойствами. Наиболее рациональным является модифицирование ВПМ с использованием газозфазных / плазменных методов обработки. Интерес представляет модифицирование ВПМ методом пиролизической полимеризации полипараксилилена, обладающим рядом преимуществ, таких как высокая конформность, возможность создания покрытий в труднодоступных местах.

Цель работы. Изучение влияния полипараксилиленового покрытия на поверхностные, физико-механические свойства ВПМ. Обоснование выбора режимов вакуумно-пиролизической полимеризации.

Материалы и методы. В качестве исследуемых ВПМ использовали: фильтровальную борсиликатную стеклоткань с классом фильтрации Н13, изготовитель Xiamen R&J Filtration Co., Ltd, материал «Грифтекс» (Гр) (производства ИММС НАН Беларуси) (ТУ РБ 400084698.138-2004), полученный методом газодинамической вытжки расплава политетрафторэтилена (Фторопласт-4, ГОСТ 10007) в вакууме.

Нанесение полипараксилилена проводили путём сублимации димера циклоди-*n*-ксилилена при 120 °С с последующим пиролизом в реакторе при температуре 600 °С и осаждением из газовой фазы полимера в вакуумной камере на установке У-150, варьируя массу загрузки сублиматора – 1, 2, 4 г. Измерение краевых углов смачивания (КУС) и поверхностной энергии проводили по методу сидячей капли (тестовые жидкости: дистиллированная вода, глицерин, 1-бромнафталин, масло ТП-22). Капиллярность определяли по высоте подъёма жидкости по образцу, а также по набору массы образца, погруженного в жидкость (вода, масло ТП 22). Физико-механические характеристики определяли по ГОСТ Р 53226-2008 на разрывной машине «СОМТЕН 94 С».

Результаты и их обсуждение. При исследовании КУС установлено, что нанесение покрытия при минимальной загрузке димера в сублиматор (1 г) влияет на снижение КУС для воды и глицерина, а для неполярных жидкостей (1-бромнафталин и масло ТП-22) поверхностные свойства исходного материала изменяются,

что выражается в растекании и впитывании капли в поровую структуру. Это можно объяснить как уменьшением шероховатости поверхности материала, так и неполярностью покрытия и большой дисперсионной составляющей поверхностной энергии.

Испытания на капиллярный подъем показали, что на воде подъёма жидкости не наблюдается, т.е. материалы гидрофобны. Однако по маслу ТП-22 наблюдается существенный прирост массы и подъём жидкости на всех обработанных материалах. При сублимировании 2 и 4 г димера кривые находятся в одних пределах. Отмечено, что на стеклоткане подъём жидкости почти в два раза меньше чем на Гр, что связано с меньшей удельной поверхностью Н13 по сравнению с Гр.

Влияние полипараксилиленового покрытия на прочностные характеристики представлено на рис. 1. Установлено, что разрывное усилие для всех материалов возрастает с увеличением количества сублимированного димера.

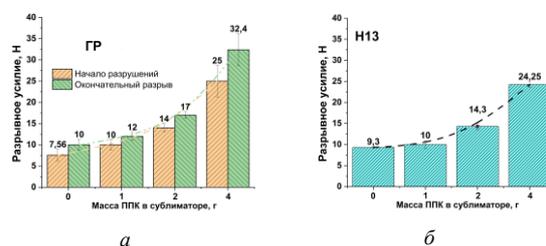


Рис. 1. Влияние полипараксилиленового покрытия на прочностные характеристики фильтрующих материалов. а – грифтекс; б – стеклоткань Н13

Т.о. показано, что нанесение полипараксилиленового покрытия изменяет поверхностные свойства как стеклоткани, так и волокнисто-пористого фторопласта, существенно изменяя их взаимодействие с неполярными жидкостями, а также приводит к повышению прочностных характеристик. Определён предел абсорбционной ёмкости, достижение которого не приводит к дальнейшему изменению поверхностных свойств, а также оптимальная масса сублимированного димера, составляющая 2–4 грамма.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 4.2.16 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма 8.4 «Многofункциональные и композиционные материалы» на 2025 г.

1. Ужов В.Н., Мягков Б. И. Очистка промышленных газов фильтрами. — М.: Химия. — 1970
2. Sutherland K. Filter and filtration handbook. — Oxford: Elsevier. — 2008

ЗАОЧНЫЕ ДОКЛАДЫ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ
(ПОЛИКОМТРИБ-2025)
24—27 июня 2025 г., Гомель, Беларусь

STUDY OF THE ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF THE COMPOSITION MATERIAL BASED ON COPOLYMER OF SALICYLIC ACID ALLYL ETHER WITH MALEIC ANHYDRIDE AND ABS

L.Sh. Abbasova and B.A. Mammadov

Institute of Polymer Materials of Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan, Sumgait, Azerbaijan, leyla-abbasova-1982@mail.ru

Summary: Polymeric materials, including impact-resistant ABS-based composites, can be subject to bio-corrosion processes under various conditions. As a result of these processes, the surface and internal structure of materials are damaged by microscopic fungi. Bacteria metabolize additives in polymer products, weakening their functional properties and reducing their service life. In order to avoid these problems, the incorporation of biologically active additives (BAAs) of natural or synthetic origin into polymer composite materials during the extrusion process is considered a practically effective method.

Introduction: In modern times, numerous additives with antibacterial effect are known. However, since it is important for such additives to have high temperature resistance, compatibility with composition components, and meet other technological requirements, their application areas are somewhat limited [1]. Polyurethane-based composite materials synthesized on the basis of methacryloyl salicylate are of particular importance among similar additives as long-lasting biocides. This substance hydrolyzes upon contact with moist air, creating a durable sterile biocidal layer on the surface of the material. However, studies have shown that although the –COOH functional group is preserved in the methacryloylsalicylate compound, the main reactions occur through the –OH group. According to scientific literature, both functional groups have biocidal activity, but the antimicrobial effect of the –OH group is considered to be higher. In the work we present, it was ensured that the –OH functional group of salicylic acid remained completely free, which significantly enhanced the antimicrobial properties of the obtained polymer materials.

Experimental part: The main goal of the research is to obtain ABS-based composite materials (CM) with antibacterial properties by using oligomers containing a salicylic group in the macrochain, in particular, a copolymer of allyl ester of salicylic acid and maleic anhydride, as biologically active additives. The antimicrobial effect of the synthesized copolymer was studied using the disk diffusion method. According to the generally accepted procedure, *Staphylococcus aureus* (golden staphylococci) was taken as a representative of Gram-positive bacteria, which are the main causative agents of purulent-

inflammatory processes, *Escherichia coli* (intestinal coli) from Gram-negative bacteria, *Pseudomonas aeruginosa* (blue-green pus-forming bacilli) from pigment-forming Gram-negative bacteria, *Candida albicans* (candida) from yeast-like fungi as a representative of fungi, *Bacillus anthracoides* as a representative of gram-positive rod-shaped bacteria that form spores, and *Klebsiella pneumoniae* as a representative of encapsulated bacteria. The results of the study are given in Table 1.

Table 1. Antibacterial properties of co-oligomers of allyl ester of salicylic acid (AllSt) with MA and ABS composite materials based on it

Test-culture	CM containing 1.00% BAA		ABS-CM		AllSt-MA co-oligomer (1:1)	
	In sterile distilled water	Concentrate	In sterile distilled water	Concentrate	In sterile distilled water	Concentrate
<i>St.aureus</i>	3 mm	16 mm	0 mm	6 mm	0 mm	5 mm
<i>E.coli</i>	2 mm	20 mm	0 mm	8 mm	0 mm	6 mm
<i>Ps.aeruginosa</i>	0 mm	5 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
<i>C.albicans</i>	8 mm	25 mm	6 mm	24 mm	5 mm	28 mm
<i>Kl.pneumoniae</i>	3 mm	18 mm	0 mm	10 mm	3 mm	3 mm
<i>B.anthracooides</i>	0 mm	21 mm	0 mm	20 mm	0 mm	19 mm
<i>Kontrol (etil spirti)</i>	3 mm	3 mm	3 mm	3mm	3 mm	3 mm

Discussion of the result: As a result of the conducted studies, it was found that the presented samples had an active effect on selected microorganism cultures in concentrated form, but had weak antimicrobial activity when dissolved in sterile distilled water. When compared, the effect of all three substances on fungal cells (*C. albicans*) was more effective. It can be concluded that the obtained ABS-based composite materials have bactericidal and at the same time fungicidal properties. However, it should be noted that the addition of a small amount of salicylic-containing oligomer practically does not affect the physical and mechanical properties of the ABS composition. This is also convenient for applying the composite material in appropriate areas.

1. Shitman M.I. Polymers of medical-biological purpose. — M: Akademkniga Publ. — 2006

INTERFACIAL BONDING MECHANISM OF HAZELNUT SHELL FILLED POLYPROPYLENE COMPOSITES

N.B. Arzumanova, I.A. Ismayilov, and R.N. Lalayeva

Institute of Polymer Materials of Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan, Sumgait, Azerbaijan, arzumanovanushaba16@gmail.com

Introduction. Agro-wastes that are obtained from nut processing are one of the many types of plant fibers. As they are produced in huge quantities every year, finding a way to effectively utilize this enormous amount of waste in an environmentally friendly way is crucial [1]. In this regard, their use as reinforcement for polymers is a relevant option to consider.

Plant fibre-reinforced polymer composites consist of two main components: reinforcing plant fibres and a polymer matrix. The properties and characteristics of these composites are influenced by three key parameters: the polymer matrix, the reinforcement, and the interface. The interface region between the plant fibre and the polymer matrix is particularly important in controlling the behaviour of composite materials [2]. This interface represents an intermediate region between the two materials, with gradients in composition, structure and properties that can vary from one atomic layer to micrometres in width. The interfacial bonding between the fiber and matrix is influenced by mechanical interlocking, molecular attractive forces, and chemical bonds. Different mechanisms of interfacial bonding exist between the fibre and matrix, including interdiffusion, electrostatic adhesion, chemical reactions, and mechanical interlocking [3]. Usually, one of these mechanisms will play a dominant role.

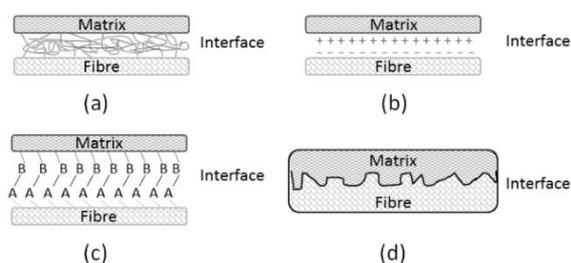


Fig. 1. Fibre-matrix interfacial bonding mechanisms: a – molecular entanglement following interdiffusion; b – electrostatic adhesion, c – chemical bonding; d – mechanical interlocking

Materials and methods. In this study, hazelnut shells and polypropylene were used as research objects. Hazelnut shells (HS) were purchased from the local market while polypropylene (PP) was manufactured by SOCAR Polymer. In this study, titanium dioxide (TiO_2) produced by LLC Titanium Investments (Russia) was used to improve interfacial adhesion. Plant fibre-based polymer composite materials are prepared with the use of hot rollers. The hazelnut shell-based polymer biocomposite materials were prepared both with and without

titanium dioxide loading (Table 1). The mechanical properties of the composites, including ultimate tensile stress and elongation at break, are evaluated.

Table 1. Hazelnut shell-based polymer biocomposite materials formulation both with and without titanium dioxide

Components	Content, wt%								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PP	100	95	90	85	80	94	89	84	79
HS	–	5	10	15	20	5	10	15	20
TiO_2	–	–	–	–	–	1	1	1	1

Results and discussion. Hazelnut shells, which are naturally hydrophilic, are not compatible with hydrophobic PP. Moreover, the abundance of hydroxyl groups in HS hinders their effective reaction with the polymer matrix. To expand the applications of biocomposites, it is crucial to understand the interface and bonding mechanisms of composites. This requires significant research efforts. Finding an efficient method to improve compatibility, i.e. interfacial interactions between plant fibers and polymer matrices, is crucial for future development.

In this context, it is pertinent to select titanium dioxide to ensure compatibility between the fibre and polymer matrix. The loading of titanium dioxide has been found to enhance the mechanical properties of biocomposites. Adding 1 wt% TiO_2 to PP/HS increased ultimate tensile stress in PP/5wt% HS/ TiO_2 composite, exceeding ultimate tensile stress values of pure PP and PP/HS composites. In samples with 20 wt% of plant fibers, those containing titanium dioxide had an elongation at break 16 times higher than those without. The enhanced mechanical properties of the polymer composite are result of good interfacial adhesion between the polymer matrix and the filler. It allows for efficient load transfer from the polymer matrix to the TiO_2 , resulting in higher mechanical properties. The thickness and strength of the interfacial region formed determine the efficiency of load transfer, which is influenced by molecular interaction at the interface.

1. Arzumanova N. Polymer Biocomposites Based on Agro Waste: Part III. Shells of Various Nuts as Natural Filler for Polymer Composites // *New Mater. Compd. Appl.* — 2021 (5), 19–44
2. Akter M., Uddin M.H., and Anik, H.R. Plant Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review on Modification, Fabrication, Properties, and Applications // *Polym. Bull.* — 2024 (81), 1–85
3. Zhou Y., Fan M., and Chen L. Interface and Bonding Mechanisms of Plant Fibre Composites: An overview // *Composites Part B.* – 2016 (101), 31–45

INVESTIGATION OF PVC DEGRADATION MECHANISMS THROUGH TGA-DTA TECHNIQUES

R. Hasanov¹, R. Mammadova¹, S. Amirov¹, and Z. Aliyeva Hasanova²

¹Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan, e-mail: roman.manar6299@gmail.com

²The Ministry of Emergency Situations Institute for Scientific Research and Project-Design Construction Materials named after S.A. Dadashov, Baku, Azerbaijan

Polyvinyl chloride (PVC) is one of the most widely produced polymers in the world. PVC is known for its durability, chemical resistance, and rigidity (especially in its unplasticized form, uPVC) [1]. Despite the above-mentioned advantages of PVC, it is very sensitive to temperature and is easily subjected to thermal degradation when heated. Another disadvantage of PVC is the difficulty in achieving its viscous-flowable state. These disadvantages create serious difficulties in its processing, operation, and recycling of PVC-based plastics that have been discontinued [2]. In this regard, the study of the thermal properties of PVC remains a very important and problematic issue.

Purpose. Polyvinyl chloride (PVC) undergoes thermal degradation starting from temperatures near its glass transition point. Although extensively researched, the exact mechanism of PVC's thermal degradation remains not fully understood. Both PVC and the various plastic composites derived from it have been the subject of continuous scientific investigation. In this context, thermogravimetric analysis (TGA) and differential thermal analysis (DTA) provide valuable insights into the thermal behavior and stability of PVC. Therefore, the present study focuses on the thermal characterization of pure, additive-free PVC using TGA and DTA methods.

Materials and methods. For the study, Russian-made PVC with the Rusvinyl PVC-S-branded, synthesized in suspension, was used. The PVC powder was heated in a heater-press ECOPRESS 102 (Turkey) under a pressure of 150 bar and a temperature of 180° C and formed into a transparent disk. The PVC sample obtained in the form of a homogeneous mass was crushed and analyzed in a nitrogen atmosphere up to 900° C with a heating rate of 30° C/min using a NETZSCH STA449F3 (Germany) thermogravimeter.

Results and discussion. As shown in the TGA curve of PVC (Fig. 1, solid gray line), no significant mass loss was observed upon heating up to 240° C. Correspondingly, the DTA curve (solid black line) indicates no noticeable endothermic activity within this temperature range, suggesting that the polymer remains thermally stable up to this point. Beyond 240° C, a sharp and intensified mass loss was recorded, continuing up to approximately 350° C. This temperature interval corresponds to the initial stage of thermal degradation, primarily associated with dehydrochlorination [3]. During this phase, degradation was initiated by the cleavage of chlorine radicals (Cl•) from structural defects within the polymer chains. The generation of these Cl• radicals is believed to

promote an autocatalytic decomposition mechanism, significantly accelerating the rate of mass loss [4].

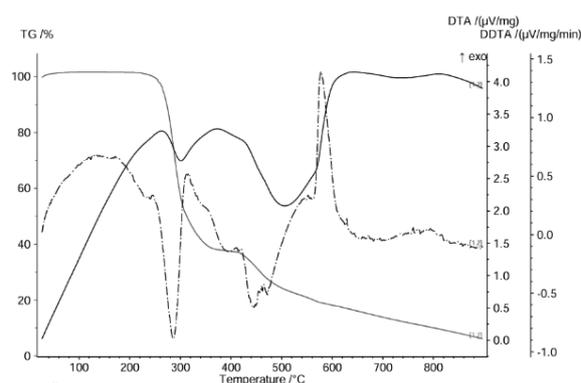


Fig. 1. TGA, DTA and DDTA curves of PVC

Table 1. Mass Loss at Specific Temperatures

Mass loss, %	Temperature, ° C
5	256.56
10	270.71
20	279.25
50	313.14
90	781.24

In the initial stage of decomposition, approximately 60% of the total polymer mass was lost. According to the DDTA curve (dashed line), this stage is accompanied by a sudden increase in energy absorption, further supporting the presence of an autocatalytic degradation mechanism. The temperatures at 5%, 10%, 20%, 50%, and 90% mass loss are listed in Table 1.

In the second stage, the remaining organic residue decomposed more slowly. The polyene structures formed during dehydrochlorination underwent further transformation, leading to a more thermally stable carbon-rich residue.

References

- Annual production of polymer resin and fibers. (Sep. 2023). Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/global-plastics-production>
- Yu J. and Sun L. Thermal degradation of PVC: A review // Waste Management. — 2016 (48), 300–314
- Wang Z. and Xie T. Thermal degradation kinetic study of polyvinyl chloride (PVC) sheath for new and aged cables // Waste Manage. — 2019 (99), 146–153
- Krongauz VV. and Lee Y-P. Kinetics of thermal degradation of poly(vinyl chloride) // J Therm Anal Calorim. — 2011 (106), 139–149

EFFECT OF COMPOSITION ON MELT FLOW INDEX OF POLYPROPYLENE RANDOM COPOLYMER / COMPATIBILIZER / ALUMINUM HYDROXIDE / CLINOPTILOLITE BASED COMPOSITES

F. Mustafayeva, N. Kakhramanov, and Z. Huseynova

Institute of Polymer Materials of Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan, Sumgait, Azerbaijan,
e-mail: mustafayevafatima@mail

There are many types of fillers available commercially in the market nowadays. However, mineral fillers have a number of advantages, such as fire resistance, heat resistance, environmental friendliness, strength, resistance to high temperatures, etc. Mineral fillers are added to thermoplastics to reduce cost and enhance performance [1]. The use of fillers of different nature in one material significantly expands the possibilities for regulating the properties of composites. Zeolites are a class of important inorganic materials with a framework of $[\text{SiO}_4]^{4-}$ and $[\text{AlO}_4]^{4-}$ tetrahedra linked to each other at the corners by sharing their oxygen atoms. Even though there are several synthetic or natural occurring species of zeolites, the most widespread and studied is the naturally occurring zeolite clinoptilolite. Clinoptilolite is one of the most promising mineral fillers for use, both from an economic and environmental point of view. Zeolites have been used to reinforce nanocomposites or as synergistic agents to improve the flame retardancy or thermal stability of polymer [2, 3].

Purpose. The purpose of this work is to study the influence of the composition of composites based on polypropylene random copolymer / compatibilizer / aluminum hydroxide / clinoptilolite on the melt flow index.

Materials and methods. Polypropylene random copolymer (PP-R) used in this work (Topilene® R200P) was produced by HYOSUNG CHEMICAL CORPORATION. Aluminum hydroxide and clinoptilolite were used as fillers. The total loading of the filler was kept at 50 wt. %.

Table 1. Composition of samples

PP-R (wt. %)	PPC-g-MAH (wt. %)	Al(OH) ₃ (wt. %)	Clinoptilolite (wt. %)
47	3	45	5
47	3	40	10
47	3	35	15
47	3	30	20
47	3	25	25

For the compatibilization of PP-R/filler blend the polypropylene copolymer grafted with maleic anhydride (PPC-g-MAH) (DuPont™ Fusabond® P353 Polymer Modifier, DuPont Company) were used. The samples were prepared by melt mixing at 160 °C using a twin-roll or 10 min and then hot pressing into sheets at 180 °C. The compositions of the composites are shown in Table 1.

The melt flow index of studied composites was determined with capillary rheometer CEAST MF50 (INSTRON, Italy) according ASTM D1238. A load of 5 kg at 190 °C was used for the measurements.

Result and discussion. Figure 1 shows the diagrams of the dependence of the melt flow index on the amount of clinoptilolite in the studied composites, which clearly confirm that with an increase in the amount of clinoptilolite, the melt flow index increases. As shown in our previous studies, an increase in the melt flow index of composites is observed when natural minerals such as montmorillonite, vesuvianite, and clinoptilolite are used [4]. We believe that in the interlayer space of this mineral there are polar liquids, exchange cations, anions, which in the process of exfoliation of its structure migrate into the polymer matrix and, like a lubricating agent, contribute to a significant improvement in the melt flow of composites. Thus, based on the conducted research, it can be concluded that the introduction of clinoptilolite particles into the studied composition helps to improve the melt flow, ensuring the possibility of processing polymers into products in a softer technological mode.

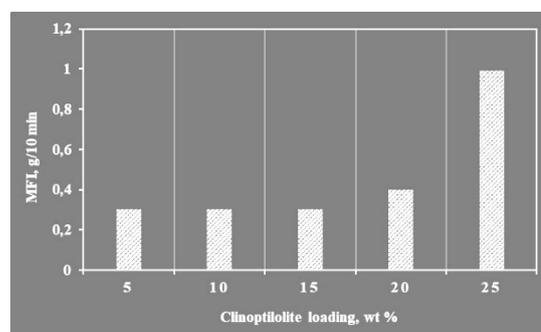


Fig. 1. Melt flow index of composites

- Shrivastava A. 4 - Additives for Plastics, Editor(s): Anshuman Shrivastava // In Plastics Design Library, Introduction to Plastics Engineering. — William Andrew Publishing. — 2018, 111—141
- Wang W., Zhang W., Chen H., et al. Synergistic effect of synthetic zeolites on flame-retardant wood-flour/polypropylene composites // Construction and Building Materials. — 2015 (79), 337—344
- Cabello-Alvarado C.J., Andrade-Guel M., Pérez-Alvarez M., et al. Green Flame-Retardant Blend Used to Improve the Antiflame Properties of Polypropylene // Polymers. — 2024 16(10), 1317.
- Кахраманов Н.Т., Мустафаева Ф.А., Арзуманова Н.Б., Осипчик В.С. Физико-механические свойства нанокompозитов на основе монтмориллонита и полиэтилена высокой и низкой плотности // Композиты и Наноструктуры. — 2018 (10), 79—84

MACROKINETICS STUDY OF FRONTAL COPOLYMERIZATION OF ACRYLAMIDE AND N-ISOPROPYLACRYLAMIDE

M.B. Shuliakouskaia¹, L.A. Sokal¹, and E.V. Gryniuk²

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus; marieshulyakouskaja@gmail.com

²Research Institute of Physics and Chemical Problems of BSU, Minsk, Belarus

Introduction. For nowadays polyelectrolyte hydrogels (PEHG) have become very perspective and popular materials in different fields of chemistry and technology. For instance, polyacrylamide (PAA) and its derivatives can be used for forming PEHG due to its structure. There is an alternative way for obtaining such polymers which is called frontal polymerization (FP). FP is an autowave process of converting monomers into polymers in a tubular reactor. Also, it has been shown that copolymerization of acrylamide (AA) and N-isopropylacrylamide (NIPAM) can lead to forming thermosensitive PEHG which makes it perspective for using in drug delivery [1–3].

Aim. The aim of this work is to show the principal possibility of obtaining AA-NIPAM copolymers via FP and studying the macrokinetics of the process.

Materials and methods. For this study, AA and NIPAM were used as monomers. Distilled water was taken as a solvent. Ammonium persulfate (APS) was used as an initiator.

Front velocity was determined by measuring time of passing the front through a certain distance by moving the rod. Front temperature was determined by measuring temperature with a K-type thermocouple.

Results and discussion. Firstly, we studied the principal possibility of obtaining AA-NIPAM copolymers via FP. The range of APS concentration used for polymerization was 0,75–2,50 mol. % for periodic mode and 2,00–2,50 mol. % for the continuous one. Therefore, macrokinetics in both periodic and continuous mode were studied.

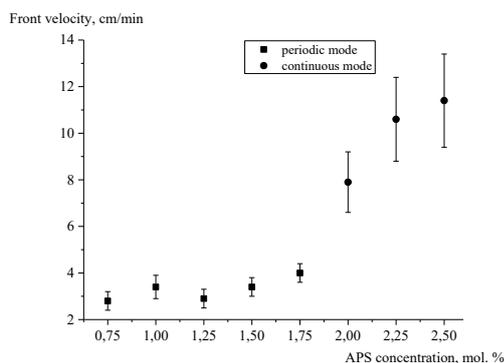


Fig. 1. Dependence of APS concentration (mol.%) on front velocity (cm/min) during FP

As shown at Fig. 1, the general tendency is increasing of front velocity when APS concentration is increased

as well. At the initiator concentration of 0,5 mol. % FP can't be reached since the front is too unstable and fades. Maximal front velocity reaches 11,4 cm/min (at the 2,5 mol. % of APS, continuous mode).

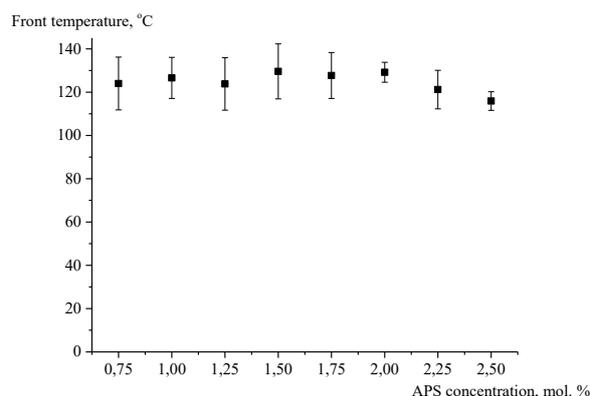


Fig. 2. Dependence of APS concentration (mol.%) on front temperature (°C) during FP

Thus, we can say that the front temperature increases unevenly as shown at Fig. 2. Maximum front temperature (130 °C) is observed at APS concentration of 1,5 mol. %.

Conclusions. In this work, it was proved that FP can be carried out in both periodic and continuous modes for the range of initiator concentrations from 0.75 to 2.5 mol. %. It was found that with an increase in the concentration of APS, the front velocity increases, and the temperature of the front does not depend on the concentration of APS.

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the state research program “Materials Science, New Materials and Technologies”, the task “Development of methods for producing susceptible hydrogels based on acrylamide with N-isopropylacrylamide copolymers by frontal copolymerization”.

1. Davtyan S.P. and Tonoyan A. O. Frontal Polymerization in Continuous-Flow Reactors // *Rev. J. Chem.* — 2019 (9), no. 4, 175–196
2. Caria G. et al. Poly(N,N-dimethylacrylamide) Hydrogels Obtained by Frontal Polymerization // *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* — 2018 (47), no. 5, 1422–1428
3. Amin, M. et al. Poly(N-isopropylacrylamide)-Based Polymers: Recent Overview for the Development of Temperature-Responsive Drug Delivery and Biomedical Applications // *Macromol. Chem. Phys.* — 2023 (224), no. 20, 778–785

SYNTHESIS OF SELENOPHENOL AND P-AMINOPHENYLCYCLOPROPYL METHACRYLATE

V.A. Vahabova and K.G. Guliev

Ministry of Science and Education, Institute of Polymer Materials, Sumgayit, Azerbaijan;
vusalavahabova@gmail.com

Introduction. Organoselenium compounds have garnered significant interest due to their wide range of biological activities, particularly their antibacterial, antifungal, and antioxidant properties. The incorporation of functional moieties such as amino groups and strained rings like cyclopropane has been shown to enhance the biological effectiveness of these compounds. Among such structures, para-aminophenylcyclopropyl methacrylate is a promising molecule due to its reactive double bond and biologically active fragments.

Objective. The primary aim of this research is to synthesize selenium-containing organic compounds by the radical addition of selenophenol to para-aminophenylcyclopropyl methacrylate and to evaluate the structure, reactivity, and antimicrobial activity of the resulting products. The study also investigates the influence of structural features on the yield and activity of the synthesized compounds.

Materials and Methods. – Reagents and Chemicals: Para-aminophenylcyclopropyl methacrylate (synthesized in-house), selenophenol, peroxide initiators (e.g., AIBN), solvents (chloroform, methanol).

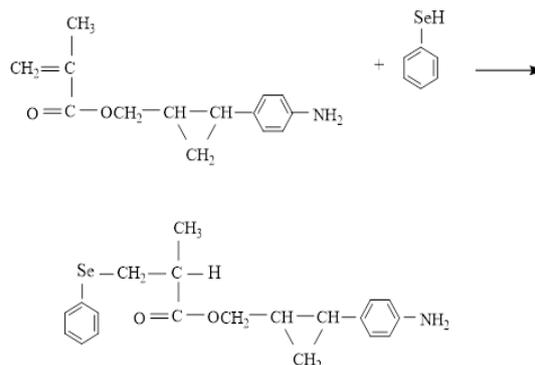
– Synthesis: The addition reaction was performed under UV irradiation or in the presence of a radical initiator at controlled temperatures. The vinyl group of the monomer selectively reacted with selenophenol.

– Characterization: The chemical structure of the synthesized organoselenium compounds was analyzed using IR and NMR spectroscopy. Chemical purity was confirmed using thin-layer chromatography (TLC), gas-liquid chromatography (GLC), and elemental analysis.

– Biological Activity Testing: Antimicrobial activity was evaluated against *Escherichia coli* (Gram-negative), *Staphylococcus aureus* (Gram-positive), and *Candida albicans* using standard inhibition zone methods.

In this study, we explore the addition reaction between selenophenol and para-aminophenylcyclopropyl methacrylate under radical initiation conditions to synthesize novel selenium-containing compounds with potential antimicrobial properties. In the presented work, we studied the interaction reaction of selenophenol with para-aminophenylcyclopropyl methacrylate [1] in order to study the properties of substituted cyclopropanes in the addition reactions of selenophenol and the synthesis of new selenium-containing organic compounds, as well as their study as biologically active substances. Para-aminophenylcyclopropyl methacrylate is readily added to selenophenol in the presence of peroxide initiators or UV

irradiation to give the following compound. Upon UV irradiation, selenophenol is added to para-aminophenylcyclopropyl methacrylates only at the double bond:



Results and Discussion. Spectral data confirmed the selective addition of selenophenol at the double bond of para-aminophenylcyclopropyl methacrylate. IR spectra showed disappearance of the vinyl group signals and appearance of new bands corresponding to Se-containing fragments. NMR confirmed the expected structural motifs. The synthesized compounds exhibited high antimicrobial activity. Complete lysis of bacterial cells was observed for *E. coli* and *S. aureus*, indicating strong antibacterial effects. Additionally, *Candida albicans* was effectively inhibited through oxidative damage to the cell membrane. The results suggest that the selenium and amino groups contribute to the disruption of bacterial membranes and enzyme inhibition. The distribution of functional groups within the molecule plays a critical role in determining antimicrobial efficiency.

Conclusion. In this study, novel organoselenium compounds were synthesized through the radical addition of selenophenol to para-aminophenylcyclopropyl methacrylate. Structural analyses confirmed selective addition at the vinyl group, and the resulting compounds exhibited significant antimicrobial activity. Specifically, they demonstrated potent effects against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*, as well as antifungal activity against *Candida albicans*. These findings suggest that the synthesized organoselenium compounds hold promise as potential antimicrobial agents.

1. Kazim G. Guliyev, Vusala A. Vahabova, Aynura F. Mammadova. Synthesis and polymerization of *para*-aminophenyl cyclopropyl methacrylate // Processes of Petrochemistry and Oil Refining. — 2022 (23), no. 4, 638–643

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА СООЛИГОМЕРОВ 1-НАФТИЛАМИНА С 2-НАФТОЛОМ

Г.Н. Абасзаде, Р.А. Ахмедова, Д.Н. Алиева, Б.А. Мамедов, Ч.О. Исмаилова

Институт Полимерных Материалов Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики,
Сумгаит, Азербайджанская Республика; ipoma@science.az

Цель. С целью получения новых представителем олигомерных электропроводящих добавок [1, 2], нами синтезированы соолигомеры 1-нафтиламина с 2-нафтолом. Они получены методом окислительной сополиконденсации 1-нафтиламина и нафтола и на их основе синтезированы стабильные макрорадикалы нафтоксильного типа.

Материалы и методы. Синтезированные соолигомеры включают нафтиламинные и гидроксинафтиленовые структурные единицы в цепи ароматического полисопряжения и обладают растворимостью размягчаются под нагрузкой в различных температурах. Это гарантирует их пригодность для использования в промышленных целях. Исследования показали, что эти олигомеры содержат нафтиламинные и гидроксинафтиленовые структуры, а их смешивание с термопластами, эластомерами, особенно бутылкаучуком, значительно увеличивает электропроводность.

Условия синтеза и некоторые показатели СОНАНф приведены в табл. 1.

Таблица 1. Условия синтеза и некоторые показатели СОНАНф ($\tau = 4$ часа)

NA, mol/l	H ₂ O ₂ , mol/l	T, K	yield, %	ОН, %	\bar{M}_w	\bar{M}_n
1.2	1.2	343	29.1	10.1	850	730
1.2	1.2	353	34.5	10.3	890	750
1.2	1.2	363	45.6	11.1	960	790
1.2	1.2	368	51.7	11.5	1230	870
1.6	1.6	368	52.4	11.8	1270	960
1.2	2.4	368	73.5	10.6	1370	1030

Состав и структура образцов СОНАНф установлены методами элементного, химического, ИК и УФ анализов. В ИК-спектрах соолигомеров полоса при 3461 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям О-Н. Широкий пик может указывать на наличие водородных связей. Кроме того, подтверждается наличие ароматического кольца (1465, 1515, 1647 см⁻¹) и деформационные колебания вне плоскости ароматических -СН групп при 768 см⁻¹ (для изолированных -СН групп).

В УФ-спектрах синтезированных образцов СОНАНф зафиксированы широкий интенсивный пик с максимумом при 225 нм, а также менее интенсивные полосы поглощения с максимумами при 280 и 320 нм.

Показано, что образцы СОНАНф проявляют электрообменную активность. Их щелочные растворы интенсивно поглощают молекулярный кислород.

Результаты и их обсуждения. Полученные образцы СОНАНф проявляют парамагнитные (концентрация парамагнитных центров $\sim 1.7 \cdot 10^{17} \div 2.3 \cdot 10^{19}$ спин/г) и полупроводниковые ($\sigma_0 \sim 10^{-8} \div 10^{-4}$ Ом⁻¹·см⁻¹ при 298 К, $E = 1.28 \div 1.71$ эВ) свойства. Причём, рост концентрации парамагнитных центров в составе образцов СОНАНф на 1–2 порядка приводит к заметному увеличению их электропроводности.

СОНАНф был использован для создания антистатических полимерных композиций на основе термопластов путём введения в их состав 5–10% СОНАНф с последующей обработкой поверхности материала спиртовым (или водным) раствором щелочи. Из табл. 2 видно, что ρ_v после введения СОНАНф в состав термопластов существенно уменьшается.

Таблица 2. Значения ρ_v композиционных материалов на основе термопластов и СОНАНф

СОНАНф, %	Термопласт, %	ρ_v (Ом·см), на основе		
		ПЭНП	ПП	ПС
5	95	$0.81 \cdot 10^8$ ($7.3 \cdot 10^8$)	$2.5 \cdot 10^8$ ($9.1 \cdot 10^8$)	$4.8 \cdot 10^8$ ($9.8 \cdot 10^8$)
10	90	$3.5 \cdot 10^8$ ($6.4 \cdot 10^8$)	$8.1 \cdot 10^8$ ($1.2 \cdot 10^7$)	$9.5 \cdot 10^8$ ($2.7 \cdot 10^7$)
15	85	$8.6 \cdot 10^8$ ($3.7 \cdot 10^7$)	$9.8 \cdot 10^8$ ($6.0 \cdot 10^7$)	$2.8 \cdot 10^8$ ($8.5 \cdot 10^7$)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что материалы на основе СОНАНф являются перспективными компонентами для улучшения электропроводности и антистатических свойств промышленных полимеров. Кроме того, совместное использование синтезированных соолигомеров и технического углерода повышает электропроводность резиновых материалов до уровня $10^{-8} \div 10^{-6}$ Ом⁻¹·см⁻¹. Это не только улучшает электрические свойства материалов, но и увеличивает их срок эффективной эксплуатации. Частичная или полная замена технического углерода в составе соолигомеров приводит к снижению модуля упругости, при этом увеличиваются относительное удлинение, теплостойкость и предел прочности резиновых материалов.

1. Akhil K. Poddar, Siddharth S. Patel, and Hitesh D. Patel. Synthesis, characterization and applications of conductive polymers: A brief review // *Polymers for Advanced Technologies*. — 2021 (32), 4616–4641
2. Dilek Şenol and İsmet Kaya. Synthesis and characterization of azomethine polymers containing ether and ester groups // *Journal of Saudi Chemical Society*. — 2017 (21), 505–516

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР ЭКОНОМИКИ УСТОЙЧИВОГО СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ БЕЛАРУСИ

О.В. Авдейчик¹, П.В. Ключко²

¹Гродненский государственный аграрный университет, Гродно, Беларусь; ol_avd.78@mail.ru

²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

Проблема реализации требований концепта устойчивого социально-экономического развития многоаспектна и основана не только на разработке отечественных технологий получения функциональной продукции с высокими потребительскими характеристиками и конкурентоспособностью, но и разработке отечественных высокоэффективных технологий переработки остаточных материальных и энергетических компонентов, образующихся при основном процессе, и современных технологий и производственного оборудования по рециклингу амортизированных изделий в материальные продукты, пригодные для изготовления функциональных изделий. При этом необходимо учитывать то обстоятельство, что значительная часть промышленных предприятий использует технологии и оборудование, относящиеся к III и IV технологическим укладам, при использовании которых образование значительного количества остаточных материалов и энергетических ресурсов неизбежна [1].

Существующая проблема по получению полноценных материалов для изготовления изделий различного функционального назначения из сырьевых материалов, полученных из регенерированных остаточных продуктов и амортизированных изделий не только не позволяет в полной мере реализовать требования концепта устойчивого социально-экономического развития в период до 2035 г., но и существенно расширить марочный ассортимент сырьевых материалов для производства изделий различного функционального назначения.

Для обеспечения экономики замкнутого цикла, на наш взгляд, целесообразно реализовать алгоритм производственной деятельности, основанный на использовании специальных технологических воздействий на остаточные продукты производства и амортизированные изделия (рис.). Это позволит не только вернуть в сферу производства остаточные материальные и энергетические ресурсы, сформировав экономику замкнутого цикла, но и существенно снизить негативное техногенное воздействие на компоненты окружающей среды путём рециклинга амортизированных изделий в использование полученных материалов для производства полноценных изделий различного функционального назначения. Предложенный алгоритм находится в соответствии с концептом экологизированных предприятий, разработанным в работе [2], и обеспечивает решение многофакторной проблемы реализации концепта устойчивого социально-экономического развития с реализацией

элементов замкнутого производственного цикла.



Рис. Функциональная связь элементов замкнутого цикла

В системе экологизированного предприятия под термином «технологическое воздействие» рассматривается комплекс мероприятий, направленных на снижение уровня остаточных материалов, образующихся в ходе изготовления основной продукции, и мероприятий, направленных на рециклинг амортизированных изделий – технологических, материаловедческих, инструментальных, организационных. Для выполнения подобного технологического воздействия необходимо проведение системных НИОКР по разработке технологий, специального оборудования, составов композиционных материалов на основе регенерированных продуктов и оптимальной логистики. Для этого в системе промышленного предприятия целесообразно создание кластерной структуры, включающей интеллектуальные ресурсы научных, образовательных учреждений и ресурсов, имеющихся в распоряжении субъекта хозяйствования.

Формирование подобной кластерной структуры позволит интегрировать интеллектуальные ресурсы и достичь синергического эффекта в разработке новых технологий, материалов, оборудования для реализации концепта устойчивого социально-экономического развития хозяйственного комплекса Беларуси.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы (задание 8.4.1.51).

1. Леонович Н.Н., Старовойтова Т.Ф. Предпосылки формирования экономики замкнутого цикла для устойчивого развития Республики Беларусь // Веснік Беларускага дзяржаўнага эканамічнага ўніверсітэта. — 2023, № 1, 75—83
2. Струк А.В., Авдей А.Г., Жук М.Г. Концепт «экологизации законодательства» в сфере рециклинга отходов промышленного производства. — Минск: Право и экономика. — 2019

ОГНЕСТОЙКАЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВАЯ КОМПОЗИЦИЯ НА ОСНОВЕ АНГИДРИДО-N-ФЕНИЛИМИДА 1,4,11,12-ТЕТРАХЛОРТРИЦИКЛО [6.2.1.0^{5,10}]- ДОДЕЦ-11-ЕН-4,5,9,10-ТЕТРАКАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ

А.И. Алиханова

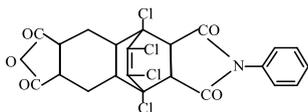
Министерство науки и образования, Институт полимерных материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; ipoma@science.az

Введение. В последние годы потребность в горючих и термостойких полимерных материалах ставит задачу нахождения таких мономеров, которые содержали бы в своём составе имидные, имидазольные и хлорные атомы [1–3]. Полиэтилен — полимер с широким спектром применения, отличающийся высокой механической прочностью и химической стойкостью. Однако его главным недостатком является высокая горючесть. По этой причине применение новых антипиреновых добавок для повышения огнестойкости материалов на основе полиэтилена становится актуальным.

Большую перспективу в этом отношении имеют галоидсодержащие циклические полиимиды дикарбоновых кислот [4,5], которые получают одностадийным методом взаимодействием с бисмалеинидами по реакции Дильса-Альдера.

Известны полимерные композиции, содержащие полиэтилен и пластификаторы, которые обладают термостойкостью, но не обладают огнестойкостью.

Цель. В настоящей статье приводится синтез циклического, полихлорированного ангидридо-N-фенилимида 1,4,11,12-тетрахлортрицикло [6.2.1.0^{5,10}]-додец-11-ен-4,5,9,10-тетракарбонической кислоты формулы (I)



который может использоваться в качестве антипирена к полиэтилену среднего давления (ПЭСД).

Экспериментальная часть. Ангидридо-N-фенилимида 1,4,11,12-тетрахлортрицикло[6.2.1.0^{5,10}]-додец-11-ен-4,5,9,10-тетракарбонической кислоты (I)

В ампулу помещают 3.8 г (0.01 моль) N-фенилимида 2,3,4,5-тетрахлорбицикло[4.4.0]-дека-2,4-диен-8,9-дикарбонической кислоты, 2.29 г (0.01 моль) тетрагидрофталевого ангидрида, 50 мл бензола. Затем ампулу с компонентами перемешивали и помещали в масляную баню при нагревании 2 часа при 80 °С. После чего полученный продукт оставляли при комнатной температуре на 12 ч. Затем отфильтровывали выделенные кристаллы на фильтре Шотта, промывали сначала н-гептаном для удаления остатка тетрагидрофталевого ангидрида, а затем неоднократно водой. Выход 90.1 %. T_{пл.} 230–232 из эфира. R_f 0.80. ИК

спектр, см⁻¹: 1720, 1780 (C=O), 1604 (C=C), 1670 (C–N), 650–690 (C–Cl). M 513.0. C₂₂H₁₃NCl₄O₅.

Найдено, %: C 46.73, H 2.81, N 3.62, Cl 30.59

Вычислено, %: C 46.45, H 2.79, N 3.01, Cl 30.53.

Для получения полиэтиленовой композиции использовали ПЭСД (по ГОСТу 3810258-81) с M.v. 90–120000 с плотностью 0.960–0.965 в виде гранул.

Состав полиэтиленовой композиции, мас.ч.: ПЭСД 87–90; Sb₂O₃ 3–5; Антипирен 5–10.

Результаты и обсуждения. Полученный образец полиэтиленовой композиции подвергали физико-механическим и диэлектрическим испытаниям, а также на огнестойкость (по ГОСТу 17088-71) по методике «огневой трубы» и потерю веса при горении (по ГОСТу 17038-71).

Композиция ПЭСД обеспечивает минимальную потерю веса от 2–3 и других прочностных характеристик. Дополнительный положительный эффект связан с уменьшением количества токсичной трехокиси сурьмы.

Эта многоярусная композиция может быть установлена на следующих уровнях: Изоляция электрических кабелей, желаемые ощущения от интерьера автомобиля, строительные материалы, защитные покрытия в сфере электроники

Проведённые исследования показали, что устойчивость к горению полиэтиленовой композиции, изготовленной на основе ангидридо-N-фенилимида 1,4,11,12-тетрахлортрицикло[6.2.1.0^{5,10}]-додец-11-ен-4,5,9,10-тетракарбонической кислоты, значительно повышается. Эта композиция перспективна с точки зрения использования в искусстве долговечных, прочных и эластичных пластичных материалов.

1. Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.Р., Лайус Л.А. Полиимиды – класс термостойких полимеров. — М.: Химия. — 1983
2. Виноградова С.В., Васнев В.А. Поликонденционные процессы и полимеры. — М.: Наука. — 2000
3. Salakhov M.S., Umaeva V.S., and Alikhanova A.I. New cryogenic epoxy adhesive composites for photodetectors // International polymer science and technology. — 2007 (34), 1—3
4. Salakhov M.S., Umaeva V.S., Alikhanova A.I. Synthesis of stereospecific hinged ladder polyimides by Diels-Alder reaction // Rus. J. Appl. Chem. — 2009 (82), 329—353
5. Alikhanova A.I., Guliyeva Sh.I., and Mammadov B.A. Heat- and fire-resistant composition based on N,N'-(4,4'-diphenylmethane) bisimidomalein-1,2,3,4-tetrachlorocyclohexa-1,3-diene-5,6-dicarboxylic acid and epoxy resin ED-20 // J. of Baku Engineering University—Advanced in Chemistry and Chemical Engineering. — 2024 (8), № 1, 23—28

ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Х.В. Аллахвердиева, Н.Т. Кахраманов, С.Р. Абдалова

Институт Полимерных Материалов Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики, Сумгаит, Азербайджанская Республика; xayalaka4@gmail.com

Введение. Полиолефины является наиболее широко используемым полимером в жизни человека и в промышленном производстве благодаря своим выдающимся свойствам, таким как простота обработки, химическая стабильность, не токсичность и низкая стоимость. Получение и исследование нанокompозитов на основе полиолефинов всегда было объектом пристального внимания многих учёных мира. Объясняется это обстоятельство тем, что твёрдые частицы наноразмерного уровня характеризуются более развитой поверхностью, что способствует эффективному их контакту и взаимодействию с макромолекулами полимерной матрицы. Для всесторонней интерпретации механизма и закономерностей кристаллизации нанокompозитов использовали метод ступенчатой дилатометрии, основанный на измерении температурной зависимости удельного объёма полимерного образца, охватывающей область от вязкотекучего состояния до твёрдого. Проведение подобных исследований позволяет получить достоверную информацию в целом о роли процесса охлаждения нанокompозитов при формировании качественных изделий в прессформе литьевой машины [1].

Цель работы. В данной работе уделяется большое внимание дилатометрическому методу изучения процесса кристаллизации нанокompозитов в условиях ступенчатого охлаждения.

Материалы и методы. Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) марки PETILEN YU I668 (UV) – (Турция) – характеризуется следующими свойствами – разрушающее напряжение 31.3 МПа, прочность на изгиб 34.4 МПа, относительное удлинение 435 %, плотность 957 кг/м³, теплостойкость по Вика 139 °С, температура плавления 145 °С, кристалличность 82% ПТР = 4.6г/10 мин.

Компатибилизатор (ПЭМА) – функционализированный малеиновым ангидридом (МА) полиэтилен высокой плотности – Eххелог РО1040 для всех марок полиэтилена. Степень прививки МА в компатибилизаторе составляет 0,5 мас. %.

Технический углерод (ТУ) марки Printex XE 2В производится в США в фирме “Orion Engineered Carbons” в виде наночастиц размером 18–20 нм и представляет собой высокоструктурированную аморфную газовую сажу.

Дилатометрирование нанокompозитов осуществлялось нами на приборе марки ИИРТ-1 в режиме медленного ступенчатого охлаждения при нагрузке 5.3 кг и в температурном диапазоне от 210 °С до комнатной температуры.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 приводятся результаты исследования влияния концентрации ТУ на закономерность изменения удельного объёма (V_i) нанокompозитов ПЭВП+ПЭМА от температуры.

Концентрацию ТУ варьировали в пределах от 1.0 до 20 мас. %. Из сопоставительного анализа дилатометрических кривых на этом рисунке можно заметить, что с ростом содержания ТУ характер зависимости ($V_i - T$) нанокompозитов изменяется по определённой закономерности. В процессе ступенчатого охлаждения от 210 °С наблюдается резкий скачок в изменении удельного объёма, соответствующий температуре кристаллизации, которая характеризуется, как фазовый переход первого рода. Скачкообразное изменение удельного объёма от температуры свидетельствует о переходе расплава нанокompозита из аморфного состояния в полукристаллическое, сопровождающееся резким изменением термодинамических параметров внутренней энергии полимерной матрицы.

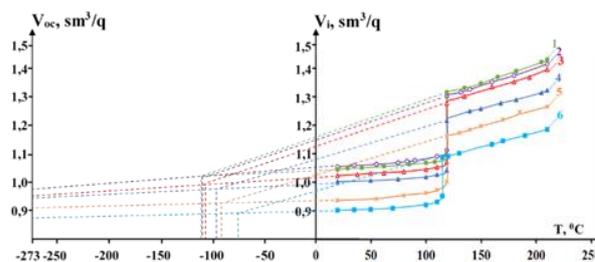


Рис. 1. Температурная зависимость удельного объёма для исходного ПЭВП+ПЭМА (1) и его нанокompозитов с различным содержанием ТУ: 2 – 1.0; 3 – 3.0; 4 – 5.0; 5 – 10; 20 мас. %

Характерно, что, если у нанокompозитов, содержащих 1.0–10.0 мас. % ТУ фазовый переход первого рода происходит при 119 °С, то у образца с 20 мас. % ТУ температура кристаллизации смещается до 115 °С. Метод дилатометрических измерений позволяет произвести приближённую оценку температуры стеклования полимерных материалов. Из рис. видно, что экстраполяция верхних и нижних ветвей приводит к их пересечению. Перпендикуляр, опущенный на ось абсцисс из точки их пересечения, позволяет зафиксировать температуру, которую с максимальным приближением можно рассматривать, как температуру стеклования полимерных материалов. Так, например, если для исходного ПЭВП* величина этого показателя составляет –138 °С, то для образцов с 1.0, 3.0, 5.0, 10, 20 мас. % содержанием ТУ составляет соответственно –135, –131, –116, –93 и –84 °С.

1. Allahverdiyeva Kh.V., Kakhramanov N.T., Abdullin M.I., and Mustafayeva F.A. Influence of aluminum powder concentration on mechanism and kinetic regularities of crystallization of composites based on low density polyethylene // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. — 2020 (63), № 2, 77–83

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННО ВЫПУСКАЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ

А.С. Антонов

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь; antonov_as@grsu.by

Многокомпонентные материалы на основе высокомолекулярных матриц представляют собой системы, параметры характеристик которых определяются структурой на различных уровнях организации, формируемой физическими и физико-химическими процессами, механизмы и кинетика протекания которых зависят от состава компонентов и параметров технологических характеристик. В межфазной области системы одновременно протекает комплекс физических и физико-химических реакций с преобладанием одной или нескольких, для которых реализуются наиболее благоприятные условия, определяемые значением энергии активации. Такая преобладающая реакция, кинетика которой находится в соответствии с конкретными условиями формирования и эксплуатации системного объекта, определяет устойчивость элемента из композита или металлополимерной системы к воздействию эксплуатационных факторов. Методологический подход к формированию композитов, основанный на установлении преобладающей физико-химической реакции, позволил установить корреляцию параметров структуры и энергетического состояния компонентов [1]. Для характеристики *энергетического состояния* использовали комплексный параметр, представляющий собой совокупный результат трансформирования исходных индивидуальных параметров компонентов (структуры, состава, формы, размера) под действием технологических и эксплуатационных факторов. Характерной особенностью предложенного методологического подхода является возможность целенаправленного интенсифицирования преобладающих межфазных реакций в композите или металлополимерной системе путём формирования энергетического состояния компонентов с определёнными параметрами электрофизических характеристик.

Разработан концепт энергетического и технологического соответствия компонентов для формирования систем с оптимизированными параметрами структурных характеристик на различных уровнях организации [1].

Энергетическое соответствие компонентов предполагает возможность достижения ими совокупного энергетического состояния, которое соответствует энергии активации преобладающего физико-механического процесса, обеспечивающего формирование, оптимальной структуры на различных уровнях организации в композитах или металлополимерных системах. Для реализации принципа энергетического соответствия компонентов необходимо не

только определённое сочетание исходных параметров (теплофизических, размерных, электрофизических, структурных, элементных и др.), но и возможность их изменения в заданных диапазонах значений при технологических воздействиях на компоненты. При выборе адекватной технологии получения, подготовки, совмещения компонентов или переработки композитов в изделия создаются условия для изменения первоначального энергетического состояния и достижения наносостояния непосредственно в зоне межфазного взаимодействия, которое обеспечивает протекание преобладающего физико-химического процесса формирования оптимальной структуры граничного слоя.

Формирование межфазного (граничного) слоя оптимальной структуры указывает на *технологическое соответствие компонентов* функциональных материалов и металлополимерных систем, под которыми понимают возможность достижения ими заданных энергетических параметров на определённой стадии формирования композита, изделия или конструкции, обеспечивающих протекание преобладающего механизма межфазного взаимодействия. Отсутствие такого соответствия не позволяет реализовать потенциал отдельных компонентов в системе, так как он может проявляться в различных диапазонах технологических воздействий, не обеспечивая достижения необходимого значения энергии активации на конкретной технологической стадии, приводя к негативному явлению, называемому структурным парадоксом. Реализация принципа энергетического и технологического соответствия позволила разработать методологию и практические технологии использования феномена наносостояния в материаловедении металлополимерных систем различного состава, конструктивного исполнения и функционального назначения [1, 2].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы (задание 8.4.1.51).

1. Авдейчик С.В., Струк В.А., Антонов А.С. Фактор наносостояния в материаловедении полимерных нанокompозитов. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Acad. Publ. — 2017
2. Avdeichik S.V., Gol'dade V.A., Struk V.A., Antonov A.S., Ikromov A.G. Implementation of the Nanostate Phenomenon in Materials Science of Functional Nanocomposites Based on Industrial Polymers // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. — 2022 (58), № 3, 211–220

ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ НАНОСОСТОЯНИЯ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

А.С. Антонов¹, В.А. Струк¹, Н.Р. Прокопчук², В.И. Кравченко¹

¹Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь; antonov_as@grsu.by

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

Для разработки методологических принципов создания оптимизированных композитов и функциональных металлополимерных систем и алгоритмов их практической реализации, адекватных распространённым промышленным технологиям формирования полимерных композитов и конструкций, обоснованы факторы, определяющие наносостояние компонентов – размерные параметры и форма единичных частиц, строение на различных уровнях организации, состав компонентов, морфология поверхностного слоя. С учётом выбранных факторов осуществлён анализ механизмов реализации наносоостояния дисперсных частиц и субстратов различного состава, строения, технологии получения и геометрических параметров для их практических приложений в материаловедении и технологии нанокompозитных материалов на основе полимеров промышленного производства [1].

Физические, физико-химические, механохимические процессы, протекающие в системах, обусловлены переносом электронов при образовании надмолекулярных, межмолекулярных, межфазных структур, что обусловило выбор в качестве определяющего параметра для оценки энергетического состояния компонентов систем максимального значения термостимулированного тока (ТСТ) в температурном диапазоне, адекватном технологическим режимам получения, переработки композитов и эксплуатации металлополимерных узлов.

Анализ параметров энергетического состояния дисперсных частиц различного состава, строения и технологии получения, нашедших широкое применение в материаловедении полимерных нанокompозитов (кремнийсодержащих – глины, слюды, талька, трепела, углеродсодержащих – УДАГ, УНТ, УВ, шунгит, КГП, металлсодержащих – частиц металлов и оксидов), указывает на нелинейность зависимости величины ТСТ от температуры, наличие экстремумов в температурных диапазонах, характерных для каждого вида модификатора, и нестабильности $I = f(T)$ при изменении размерных параметров, режимов диспергирования, интенсивности воздействия температурных, механических и других энергетических и технологических факторов [2]. Нелинейность зависимости $I = f(T)$ характерна и для других объектов органической и неорганической природы, различного состава, строения, молекулярной массы.

Как следует из исследований проф. Дистлера Г.И., Гольдаде В.А., Пинчука Л.С. параметры

электрофизических характеристик материальных объектов определяются не только их составом и структурой, но и видом технологического воздействия.

На основе проведённых исследований разработаны методологические принципы получения нанокompозиционных материалов на основе промышленных термопластов, состоящие в:

– установленных кристаллохимических предпосылках выбора природных и синтетических углеродсодержащих, металлсодержащих и кремнийсодержащих полуфабрикатов для направленного формирования активных наноразмерных частиц с заданными структурно-морфологическими и энергетическими параметрами при оптимальном технологическом воздействии (механохимическом, термическом, лазерном);

– реализации условий энергетического соответствия наномодификаторов превалирующему механизму формирования оптимальной структуры полимерных, олигомерных и совмещённых матриц на различных уровнях организации – молекулярном, надмолекулярном и межфазном;

– обеспечении условий проявления предпочтительных механизмов межфазных физико-химических взаимодействий компонентов с образованием граничных слоёв оптимального строения, определяющих механизмы разрушения изделий из нанокompозитов при воздействии различных эксплуатационных факторов.

Разработанная методология реализована в создании нанокompозиционных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками на основе промышленных термопластов, предназначенных для изготовления функциональных изделий металлополимерных конструкций машин, механизмов и технологического оборудования [2].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы (задание 8.4.1.51).

1. Лиопо В. А., Струк В. А., Овчинников Е. В., Авдейчик С. В., Малай Н. В. Энергетический критерий оценки наноразмерности // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика и физика. — 2014 (34), № 5(176), 161–167
2. Авдейчик С. В., Струк В. А., Антонов А. С. Фактор наносоостояния в материаловедении полимерных нанокompозитов. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Acad. Publ. — 2017

ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ОГНЕСТОЙКОСТИ

А.Л. Антонова¹, В.Е. Сыцко¹, В.М. Шаповалов²

¹Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, Гомель, Беларусь;
viramaina3@yandex.by

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь

Введение. В Республике Беларусь задействовано достаточно большое количество предприятий по переработке древесины, а также производстве строительных материалов и мебели на ее основе. По количеству получаемых отходов деревообрабатывающая промышленность стоит на одном из первых мест. Количество отходов в этой отрасли зависит от качества поставляемого сырья, типа и размера изготавливаемой продукции, используемой технологии и применяемого оборудования. Количество отходов, образующихся, например, на мебельной фабрике, достигает 60 % от всей использованной древесины. Полимерные отходы также имеют большой объем в экономике страны, а их утилизация и переработка являются трудоёмким и дорогостоящим процессом.

Цель работы состоит в постановке проблемы рециклинга и модифицирования вторичных полимеров и отходов древесины, с упором на улучшение параметров их огнестойкости.

Материалы и методы: изготовление огнестойких древесно-полимерных образцов с добавлением антипиренов.

Результаты и их обсуждение. Присутствие в материале антипиренов способно прерывать стадию горения огня, ограничивать процесс декомпозиции и разбавлять горючие газы и концентрацию кислорода в зоне пламени путём испускания воды, азота или других инертных газов. Антипирены применяются во множестве технологических производств и обладают высоким спросом [1].

Авторами проведено научное исследование, целью которого стало изучить влияние недорогих и общедоступных антипиренов на свойства древесно-полимерных материалов. Были изготовлены образцы из смеси полипропилена с антипиренами в процентном соотношении, методом горячего прессования. Использовали такие антипирены как: гидроксид алюминия, гидроксид магния, борат цинка, меламин, полифосфат аммония. Далее было проведено испытание образцов на горючесть. Для оценки горючести полимерных образцов был использован кинетический метод исследования – «Определение стойкости к действию накала».

В данном методе горючесть полимерных образцов определяется качественными показателями от 0 (горючий пластик) до 5 (негорючий пластик),

которые получают замером длины обогреваемой части образца и потери массы образца, по истечении трех минут соприкосновения с накалённым стержнем. Так же использовался метод «огневой трубы», определяя скорость и характер горения по времени самостоятельного горения и по изменению массы в процессе горения. Высушенный (влажность не более 10 %) и взвешенный (с точностью до 0,01 г) образец (размеры листовых образцов 150×45×1–10 мм) и подготовленный к испытанию по методу «огневая труба» подвешивают вертикально в центре стальной трубы (165 × 50 × 0,5 мм) так, чтобы нижний конец его выступал из нижнего края трубы на 5 мм, расстояние от нижнего края образца до кромки горелки (бытовой газ или этанол) 10 мм и поджигают пламенем горелки с угла их торца. Минимальное время, необходимое для поджигания образца, замеряют секундомером, максимальное время обычно составляет 2–2,5 минуты. После поджигания горелку удаляют, замеряют продолжительность самостоятельного горения (или тления) и изменение массы образца. Горючими материалами считают те, которые теряют более 20 % массы и горят после удаления пламени горелки более минуты [2].

После проведённого исследования на горючесть образцов из смеси полипропилена с антипиренами, можно сделать вывод, что более огнестойким является меламин. Повреждение площади образца с содержанием меламина составило 1,3 %. Образец относится к первому классу горючести. Так же сделан вывод, что наличие в смеси двух или более веществ, препятствующих образованию огня, способствует достижению наибольшего эффекта в сравнении с эффектами, наблюдаемыми при использовании таких же веществ по отдельности.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии» (тема 4.2.2, НИР 2).

1. Зарипов И.И., Вихарева И.Н., Буйлова Е.А., Берестова Т.В., Мазитова А.К. Добавки для понижения горючести полимеров // Нанотехнологии в строительстве. — 2022, № 14, 156—161
2. ГОСТ 28157 (2018), Пластмассы. Методы определения стойкости к горению. — Москва: Межгосударственный стандарт. — 2018

ТЕРМОСТОЙКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ДИОКСИРАНОВ

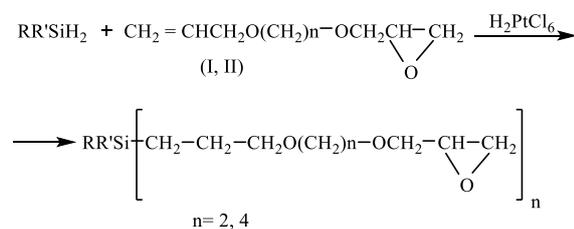
О.В. Аскеров, А.Ф. Мамедова, А.О. Алиева, Е.А. Азизов

Министерство науки и образования, Институт полимерных материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; ipoma@science.az

Введение. Термостойкие материалы и применение их в технике ставит перед исследователями задачу нахождения методов получения элементарноорганических мономеров для создания на их основе полимерных материалов, способных сохранять эксплуатационные свойства длительное время [1–3].

Цель. Разработка способов получения кремнийорганических диоксиранов, на основе которых можно получить композиционные материалы, отличающиеся высокой тепло- и термостойкостью.

Материалы и методы. Синтез кремнийорганических диоксиранов проведён путём присоединения алкил(арил)гидридсиланов к непредельным оксиранам в присутствии платинохлористоводородной кислоты или ацетилацетоната дикарбонила родия в качестве катализатора. Реакция протекает по ненасыщенной связи (C=C) с образованием кремнийорганических диоксиранов по схеме:



n = 2; R = C₂H₅; R' = C₆H₅ (III); n = 2; R = R' = C₆H₅ (IV);

n = 4; R = C₂H₅; R' = C₆H₅ (V); n = 4; R = R' = C₆H₅ (VI);

Строение синтезированных соединений подтверждено данными современных физико-химических методов анализа. В ИК-спектрах обнаружены полосы поглощения, характерные для Si–C_{алк} (1250 см⁻¹) и эпоксидной группы (895, 914, 3060 см⁻¹).

Экспериментальная часть. В стеклянную ампулу, воздух из которой вытеснен, помещают 22.12 г (0.12 моль) дифенилдигидридсилана, 31 г (0.24 моль) свежеперегнанного 1-глицидилоксибутоксипроп-2-ена и 0.01 г ацетилацетоната дикарбонила родия. Затем ампулу запаивают в токе азота и помещают в масляной термостат, где поддерживают температуру 110–115 °С в течение 20 часов. Затем ампулу вскрывают, образовавшуюся массу растворяют в бензоле и отфильтровывают от механических примесей. После отгонки растворителя остаток подвергают вакуумной перегонке при температуре 120 °С (остаточное давление 0.5 мм рт.ст.). При этом легкокипящие компоненты не отгонялись. Полученный диоксираносилан (III) представляет собой прозрачную вязкую

массу светло-коричневого цвета. Выход количественный. Найдено, %: С 71.49; Н 5.39; Si 5.22. C₃₂H₂₉SiO₆. Вычислено, %: С 72.00; Н 5.40; Si 5.30.

Аналогично получены соединения (IV–VI) с молекулярной массой 480.86 (IV), 494 (V), 555 (VI) криоскопически в бензоле.

Результаты и обсуждение. Полученные диоксираны (III–VI) были использованы в качестве модификатора для получения полиэфирной смолы (10, 20, 30 мас.ч на 100 мас.ч. полиэфирной смолы). Проведён процесс отверждения при 90 ± 5 °С в течение 5 часов и дополнительно в течение 5 часов при температуре 125 ± 5 °С в присутствии перекиси бензоила и диметиланилина. Установлено, что введение кремнийорганических диоксиранов в качестве модификаторов в состав полиэфирной смолы, отверждаемой малеиновым ангидридом, приводит к значительному увеличению термостойкости, относительного удлинения и огнестойкости отверждаемой композиции. Наиболее эффективными модификаторами являются диоксираны (IV, VI) при введении в количестве 20 мас.ч., применение которых приводит к значительному возрастанию относительного удлинения, термостойкости, огнестойкости и предела прочности отверждаемой композиции, по сравнению с немодифицированной смолой.

Показано, что присоединении дифенилдигидридсилана к непредельным оксиранам этиленового ряда протекает по C=C связи в присутствии катализатора – платинохлористоводородной кислоты, или ацетилацетоната дикарбонила родия. При гидросилилировании оксирановое кольцо остаётся незатронутым, гидросилилирование протекает по ненасыщенной связи. Однако выход целевых аддуктов в случае ацетилацетоната дикарбонила родия выше, чем при использовании платины.

Исследованием установлено, что среди испытанных соединений эффективными модификаторами являются соединения (IV, VI), которые могут быть использованы в качестве антипириенов-модификаторов полиэфирной смолы.

1. Юрьев В. П., Салимгареева И. М. Реакция гидросилилирования олефинов. — М.: Наука. — 1982
2. Соболевский М. В., Музовская О. А., Попелева Г. С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. — М.: Химия. — 1975
3. Казицина Л. А., Куплетская Н. Б. Применение УФ-, ИК-, ЯМР-спектроскопии в органической химии. — М.: Высшая школа. — 2001

ЭПОКСИКОМПОЗИЦИЯ НА ОСНОВЕ СМОЛЫ ЭД-20 И ТРИГЛИЦЕРИД-1,2,3-ТРИГИДРОКСИЭТИЛИМИДА САХАРИН-6-КАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ

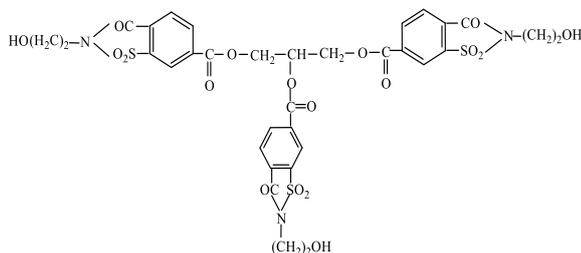
Э.Т. Асланова, А.А. Гараева, В.О. Атакишиева

Министерство науки и образования, Институт полимерных материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; iproma@science.az

Известно, что в качестве отвердителя для эпоксидных смол широко используются алифатические аминные, амидные и имидные соединения [1]. В данной работе в качестве основного компонента при разработке эпоксикомпозиции использовали эпоксидную смолу ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), поскольку она обладает низкой вязкостью, узким интервалом содержания эпоксидных групп, стабильностью физико-химических свойств.

Цель работы — создание новой термостойкой эпоксикомпозиции на основе промышленной эпоксидной смолы ЭД-20.

В качестве отвердителя-пластификатора использовали синтезированный нами триглицерид-1,2,3-тригидроксиэтилимид сахарин-6-карбоновой кислоты (ТГ-1,2,3-ТГЭИ С-6-КК) следующего состава [2]:



Полученный ТГ-1,2,3-ТГЭИ С-6-КК представляет собой темно-бежевое порошкообразное вещество, растворимое в апротонных растворителях.

Наличие в составе этого соединения имидных групп дает нам возможность использовать его в качестве отвердителя-пластификатора для промышленной эпоксидной смолы ЭД-20.

Отверждение разработанных композиций изучалось методами термического анализа, на дериватографе системы «Паулик-Паулик-Эрдей» навески образца 200 мг, чувствительности каналов ТГ – 200, ДТА – 250 мкВ, ДТГ – 1 мВ, скорость подъема температуры 5 °С/мин в токе воздуха [3].

Известно, что для получения качественного эпоксидного материала следует создать композицию, характеризующуюся высокими показателями, что достигается правильным выбором количества отвердителя, ускорителя и режима отверждения эпоксидного компаунда.

Было установлено, что ТГ-1,2,3-ТГЭИ С-6-КК хорошо совмещается с эпоксидной смолой ЭД-20, но отверждает её в жёстком температурном режиме. Для снижения температуры отверждения был использован ускоритель УП 606/2 (2,4,6- трис'диметиламинометил фенол) в количестве 1 вес.ч. ускорителя на 100 вес.ч. смолы. В результате этого, процесс отверждения композиции начался при более низкой температуре – 45 °С, при этом экзо-пик отверждения сдвинулся в область более низких температур – 70 °С, а процесс полного отверждения был при 100 °С. Опытным путём установлено, что оптимальное количество отвердителя ТГ-1,2,3-ТГЭИ С-6-КК составляет 20 вес.ч. на 100 вес.ч. смолы. При таком соотношении термостойкость эпоксидной композиции и ее физико-механические показатели достигают своего наибольшего значения, а степень отверждения композиции достигает 85 %.

Методами ДТА и ТГА были определены термические свойства полученной эпоксидной композиции: $E_{акт.} = 298.2$ кДж/моль, период полураспада $\tau/2 = 69.3$ мин, температура полураспада = 337 °С, ТГИ=110.5 °С.

Также изучены некоторые физико-механические свойства полученной композиции: предел прочности при растяжении = 58–64 МПа, относительное удлинение $\epsilon = 5.0$ –5.5 %.

Выводы. Резюмируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что синтезированный ТГ-1,2,3-ТГЭИ С-6-КК может успешно применяться как высокоэффективный отвердитель-пластификатор эпоксидной смолы, а полученные эпоксидные композиционные материалы характеризуются высокими термическими и физико-механическими свойствами, и могут быть использованы при изготовлении покрытий электроизоляционных материалов, а также в электронике и электротехнике.

1. Дорофеева И.С. Композиционные материалы на основе эпоксиданового олигомера // Пластические массы. — 2003, № 1, 23—25
2. Aslanova E.T., Garayeva A.A., Geydarova S.Ya., Mamedov B.A., and Nurullayeva D.R. Synthesis of some derivatives of triglyceride of saccharin-6-carboxylic acid // Scientific news. Series for natural and technical sciences. — 2024 (24), no. 2, 37—42
3. Уэндлант У. Термические методы анализа. — М.: Мир. — 1978

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИНТЕЗА И СВОЙСТВА БИНАРНЫХ СООЛИГОМЕРОВ ИЗОМЕРНЫХ АМИНОФЕНОЛОВ С 1-НАФТОЛОМ

Р.А. Ахмедова, Д.Н. Алиева, Г.Н. Абасзаде, Ч.О. Исмаилова, Б.А. Мамедов

Министерство науки и образования, Институт Полимерных Материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; ipoma@science.az

Цель. Получение различных электропроводящих и антистатических полимерных материалов возможно при введении в состав промышленных полимеров электропроводящих наполнителей, в том числе олигомерных и полимерных соединений [1, 2]. Такие полимерные материалы широко используются в электротехнике, микроэлектронике, приборо- и машиностроении [3].

Материалы и методы. В связи с этим, нами были получены бинарные сополимеры изомерных аминифенолов с 1-нафтолом путём окислительной соконденсации сомономеров кислородом в щелочной среде. Методами элементного и химического анализов установлены составы и структуры синтезированных в различных условиях олигоаминифенолнафтолов (СОАФНф). Эти олигомеры состоят из соответствующих амино- и аминифениленовых, а также оксинафтиленовых структурных единиц. Синтезированные образцы СОАФНф – порошки тёмно-коричневого цвета, хорошо растворяются в полярных органических растворителях и размягчаются при нагревании под нагрузкой. Кривые молекулярно-массового распределения образцов СОАФНф имеют мономодальный характер. Исходя из этих кривых, выяснено, что образцы СОАФНф состоят из димер-тримерных (15÷25 %), а в основном тетрамер - гексамерных фракций, но в составе сополимеров содержатся фракции с молекулярной массой 1600÷8000 (~1.4÷2.3 %). Установлено, что в реакциях сополимеризации 1-аминифенол выделяется высокой реакционной способностью, а 4-аминифенол образует сополимеры более воспроизводимой и стабильной структуры. 3-Аминифенол менее активен в реакции сополимеризации с нафтолом, чем 2- и 4-аминифенолы.

Найдены оптимальные параметры синтеза СОАФНф: $[\text{нафтол}]_0 = 0.75$ моль/л, $[\text{Аф}]_0 = 0.75$ моль/л, $[\text{КОН}]_0 = 0.50$ моль/л, $T = 368$ К, $\tau = 8$ часов.

Результаты и их обсуждение. Синтезированные сополимеры нафтола с аминифенолами проявляют полупроводниковые и парамагнитные свойства. Установлено, что введение образцов СОАФНф в состав термопластов (ПЭНП, ПП и ПС) в количестве 5.0÷15.0 % позволяет получать полимерные материалы со значением ρ_v в порядке $10^6 \sim 10^8$ Ом·см. Кроме того, выявлено, что совместное использование СОАФНф с электропроводящей сажей позволяет получать электропроводящие резиновые материалы ($\sigma_v \sim 10^{-7} \div 10^{-5}$ Ом⁻¹·см⁻¹) на основе бутилового и бутадиеннитрилового каучуков. При этом резиновые смеси были подготовлены по стандартной рецептуре ингредиентов, с той лишь разницей, что взамен сажи (частично или полностью) применены образцы СОАФНф.

Обнаружено, что введение в состав резиновых смесей образцов СОАФНф приводит к усилению теплофизических, физико-механических и адгезионных показателей конечных вулканизированных продуктов.

1. R.R. Guliyev, D.N. Aliyeva, R.A. Akhmedova, S.S. Mashayeva, Ch.O. Ismailova, B.A. Mamedov. Naphtol Oligomers and their Electroconductive Compositions // IJOER. — 2020 (6), 19—25
2. Yinghui He, Jesse T.E. Quinn, Suhyun Lee, GuanYing Wang, Xu Li, Jinliang Wang, Yuning Li. An aromatic amine-containing polymer as an additive to ambipolar polymer semiconductor realizing unipolar n-type charge transport // Org. Electron. — 2017 (49), 406—414
3. Yaroslav O. Mezhev, Yuri V. Korshak, Mikhail I. Shtilman. Oxidative polymerization of aromatic amines: kinetic features and possible mechanisms // Russ. Chem. Rev. — 2017 (86), 1271 — 1285

ЛОКАЛЬНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПЭТФ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДВУХСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ПОЛИЭТИЛЕНИМИН/ПОЛИВИНИЛКАРБАЗОЛ

А.С. Баранова¹, Г.Б. Мельникова¹, Д.В. Сапсалёв¹, Т.Н. Толстая¹, С.А. Чижик¹,
И.В. Корольков^{2,3}, Н.Н. Жуманазар², М.В. Здоровец^{2,3,4}

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

⁴Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Введение. Трековые мембраны (ТМ) потенциально могут быть использованы в качестве универсальных и экономически эффективных гибких датчиков для различных применений, включая мониторинг окружающей среды. Функционализация ТМ позволяет повысить их чувствительность и селективность к исследуемым веществам. Поиск новых составов и технологий поверхностной модификации является актуальной задачей современного материаловедения при создании объектов гибкой электроники.

Материалы и методы. Двухслойные покрытия формировали на поверхности полиэтилентерефталатных трековых мембран (ПЭТФ ТМ) с диаметром пор 50 нм, 100 нм и 200 нм [1].

С целью увеличения срока службы разрабатываемых гибких датчиков, увеличения стабильности и адгезии чувствительных слоёв к поверхности ТМ, промежуточный слой полиэлектролита – полиэтиленimina (ПЭИ) на поверхности ПЭТФ ТМ наносили методом послойного осаждения. Для этого образцы мембран, предварительно активированные в растворе щелочи при pH 7,9 в течение 5 мин, выдерживали в солянокислом растворе полиэтиленimina (ПЭИ⁺, $M_w \sim 750$ кДа, с (ПЭИ) = 1 мг/мл, растворитель – 0,1 М HCl) в течение 24 ч, затем промывали в токе дистиллированной воды и высушивали на воздухе в течение суток.

Последующий чувствительный слой поливинилкарбазола (ПВК) формировали методами Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ) и спин-коатинга (с-к).

Монослой ПВК (Sigma-Aldrich, $M = 1100000$) выделяли из раствора в хлороформе с = 0,75 мг/мл, при $\pi = 15,0$ мН/м, что, согласно изотермам сжатия, соответствует фазовому состоянию «твёрдая плёнка» для ПВК [2].

Покрyтия методом спин-коатинга получали из растворов с ПВК с = 0,0625 мг/мл, объём аликвоты – 6 мкл.

Морфологию и локальные механические свойства поверхности до и после модификации исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ, установка NT-206, ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь).

Модуль упругости (E) рассчитывали по модели

Джонсона – Кенделла – Робертса на основании данных наноиндентирования с использованием кантилеверов (NSC 11 А, жёсткость 3 Н/м, Mickromash, Эстония).

Результаты. В результате проведённых исследований установлено, что исходные ПЭТФ ТМ характеризуются значениями E 347,0 МПа и силы адгезии (F) 48,8 нН.

Формирование двухслойных покрытий методом спин-коатинга снижает значения модуля упругости в 1,5–2 раза, при этом увеличиваются значения силы адгезии, в большей степени в случае формирования покрытий ПВК методом Ленгмюра–Блоджетт (табл. 1).

Таблица 1. Локальные значения модуля упругости ($E \pm 15\%$, МПа) и силы адгезии ($F \pm 15\%$, нН) образцов ПЭТФ ТМ, модифицированных двухслойными покрытиями ПЭИ⁺/ПВК

Образец	E, МПа	F, нН
ПЭТФ-50/ПЭИ ⁺ /ПВК(с-к)	219,6	72,6
ПЭТФ-100/ПЭИ ⁺ /ПВК(с-к)	165,4	68,2
ПЭТФ-200/ПЭИ ⁺ /ПВК(с-к)	205,8	84,4
ПЭТФ-50/ПЭИ ⁺ /ПВК(ЛБ)	148,8	86,5
ПЭТФ-100/ПЭИ ⁺ /ПВК(ЛБ)	145,8	86,1
ПЭТФ-200/ПЭИ ⁺ /ПВК(ЛБ)	178,0	124,7

Заключение. Разработана методика функционализации ПЭТФ ТМ двухслойными покрытиями ПЭИ⁺/ПВК. Формирование модифицирующих слоёв на поверхности мембран подтверждено АСМ данными о структурно-механических свойствах поверхности.

Благодарности. Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор от 02.05.2024 № Т24МС-008) и Министерства энергетики Республики Казахстан (BR23891691).

- Wang, J. Zhou, J. Wang [et al.] Interplay of distributions of multiple guest molecules in block copolymer micelles: a dissipative particle dynamics study // J. Colloid Interface Sci. — 2022 (607), 1142—1152
- Мельникова Г.Б., Сапсалёв Д.В. [и др.] Наноструктурированные покрытия на основе Ленгмюра–Блоджетт плёнок перфтордекановой кислоты для гибких датчиков анализа ионов свинца в воде // Приборы и методы измерений. — 2024 (15), № 1, 7—17

ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППРЕТА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ НАПОЛНЕННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

С.А. Бекташи, М.А. Манафов, Н.А. Алимйрзоева,
Э.Г. Искендерова, С.Б. Мамедли, Н.Р. Бекташи, В.Д. Джафаров

Институт Полимерных Материалов Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики,
Сумгаит, Азербайджанская Республика; nazimbektash@gmail.com

Цель работы: Представленная работа посвящена изучению влияния молекулярной характеристики аппрета, в качестве которого использованы сополимеры малеинового ангидрида с гептеном-1 (МАГ), на физико-механические свойства композитов на основе ПЭНП.

Результаты и их обсуждение: Создание полимеров с заранее заданными свойствами и композиционных материалов на их основе остаётся актуальной проблемой современного материаловедения. В связи с этим молекулярно-массовые характеристики полимеров играют ключевую роль в регулировании их свойств. Изучение влияния молекулярной массы (ММ) модификаторов на эксплуатационные свойства полимерных композиций всегда представляет научный интерес. Литературные источники показывают, что исследовательские работы, проводимые в этом направлении, недостаточно.

Изучение прочностных свойств полученных композитов на основе ПЭНП и алунином показало, что, как и в предыдущих наших исследованиях, наблюдается повышение прочностных свойств при уменьшении молекулярной массы аппрета [1]. При этом, предел прочности увеличивается от 10.5 до 18.75 МПа, а теплостойкость от 110 до 142 °С (таблица 1). При этом величина относительного удлинения, как и следовало ожидать, существенно падает (85–17%), что безусловно, связана с изменением характера взаимодействия двух несовместимых фаз и увеличением подвижности макромолекул. По теории известно, что низкая ММ полимера повышает адгезию между полимерной матрицей и наполнителем. Полученные результаты согласуются с известными теоретическими предположениями [2].

Материалы и методы: В работе в качестве полимерной матрицы и наполнителя использованы ПЭНП-марки 10803-020 и наполненным алунином, Загликского месторождения, добываемый в Гянджинском регионе Азербайджанской Республики. Образцы полимерных композиции получили путем смешения наполнителя с расплавом ПЭНП. Наполнитель вводили в состав полимера в количестве от 40 до 60 мас. % на вальцах при температуре 125–130 °С в течение 15–20 мин.

Для достижения поставленной цели были использованы сополимеры с различной молекулярной массой ($M_n = 700, 2350$ и 5800). Указанные сополи-

меры МАГ были синтезированы методом радикальной полимеризации в специальных лабораторных условиях в присутствии пероксида бензоила. Молекулярные массы использованных в работе сополимеров определяли методом эксклюзионной жидкостной хроматографии с рефрактометрическим детектором на высокоэффективном жидкостном хроматографе фирмы *Kovo* (рис. 1). При разделении использовали две колонки размером 3.3×150 мм, заполненные сорбентом *Seraport-SGX* с размером частиц 7 мкм и размером пор 100 и 200 Å, элюент ДМФА, скорость потока 0.3 мл/мин, $T = 20\text{--}25$ °С. Калибровочную зависимость между $\lg M$ и объёмом удерживания V_R получали с использованием полиэтиленгликолевых стандартов в диапазоне $MM = (1.5\text{--}100) \times 10^2$.

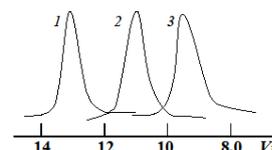


Рис. 1. Эксклюзионные кривые ММР сополимеров малеинового ангидрида с акриловой кислотой. $M_n = 800$ (кривая 1), $M_n = 2100$ (кривая 2) и $M_n = 5500$ (кривая 3). Условия хроматографирования: Колонки размером 3.3×150 мм, адсорбент-*Seraport-SGX* с размером частиц 7 мкм и пористостью 100 Å. Элюент-ДМФА, скорость потока 0.3 мл/мин. Детектор: рефрактометр. $V_R = 1$ счет 0,13 мл

Таблица 1. Влияние ММ сополимера на физико-механические свойства композиции

№	Состав композиции, %	M_n	Физико-механические показатели		
			σ , МПа	ϵ , %	T , °С
1	ПЭНП – 40 Алунит – 60	700	18.75	17	121
		2350	12.42	19	116
		5800	11.2	20	112
2	ПЭНП – 50 Алунит – 50	700	15.43	20	142
		2350	14.25	21	115
		5800	12.15	40	110
3	ПЭНП – 60 Алунит-40	700	13.25	23	123
		2350	12.11	35	118
		5800	10.5	85	113

- Bektashi N.R., Bektashi S.A., Manafov M.A., Mamedli S.B., Cafarov V.D. Dolgu Polietilen Esaslı Polimerik Kompozit Oluşumunda Modifikatörün Molekül Kütlesinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisi // 34 Ulusal Kimya kongresi. 1-6 Eylül. 2022. Yalova. Türkiye. PS-108. — 2022, 332
- Кербер М.Л., Головкин Г.С., Горбаткина Ю.А Полимерные композиционные материалы (Под ред. Берлина А.А.). — СПб.: Профессия. — 2008

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СНИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОБУВИ

В.Д. Борозна

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь; wilij@mail.ru

Введение. Обувь является жизненно необходимой вещью для человека. Тем не менее с каждым годом человечество производит и выбрасывает все больше и больше обуви. По оценкам экспертов, к 2031 году объем мировой обувной индустрии составит 570 миллиарда долларов США. Ежегодно производится свыше 20 миллиардов пар обуви.

При производстве обуви используют около 40 различных видов основных материалов. Приблизительно на одну пару обуви приходится натуральной или искусственной кожи – 25 %; полиуретана – 17 %; термоэластопласта – 16%; этиленвинилацетата – 14 %; поливинилхлорида – 8 %; каучука – 7 %; текстиля – 6 %; другое – 7 % [1]. При этом на пару обуви для взрослого населения будет уходить от 22 до 47 дм² натуральной или искусственной кожи согласно нормам расхода материала, что говорит о высокой ресурсозатратности производства. В результате процесса изготовления образуется 25–30 % отходов основных и вспомогательных материалов. Наибольшую часть отходов приходится на натуральную и искусственную кожу при раскроях деталей для заготовок верха обуви.

Основная часть. В Республике Беларусь доля выпущенной обуви составляет 10 % от общего объема производства изделий легкой промышленности. Годовой объем производства обуви составляет порядка 8–10 млн. пар обуви в год. Объем потребления обуви в республике, согласно статистическим данным, не превышает 20 млн. пар в год. Вместе с тем, в соответствии с нормативами рационального потребления (3,2 пар на душу населения в год), объем рынка должен составлять порядка 30 млн. пар в год. Количество производимой обуви в Республики Беларусь не превышает потребительского спроса, что приводит к импорту обуви с верхом из искусственной кожи.

Для управление отходами на производстве существует два основных подхода: инициативный и реактивный. Инициативные подходы включают в себя все меры, которые принимаются с целью снижения или минимизации отходов, а именно улучшение дизайна, эко-дизайн, использование биоразлагаемых материалов, биологическая очистка и др.. Реактивный подход к управлению отходами заключается в управлении утилизируемыми отходами, а именно управлением сроком службы материалов через повторное использование, переработку, восстановление энергии и вывоз на полигон ТБО [2].

В обувной промышленности наиболее перспективным направлением для решения поставленных

задач является реактивный подход к управлению отходами производства. Для минимизации количества отходов при раскрое деталей верха обуви одним из способов сокращения этих отходов является проектирование материалов с заданными деформационными свойствами.

В настоящее время все чаще используют трикотажные полотна для деталей верха обуви. Так как трикотажное полотно сложно подвергается раскрою, то оптимальным вариантом для снижения отходов при его раскрое является разработка цифровых двойников заготовок верха обуви с заданной структурой трикотажного полотна с последующем вязанием заготовки на макете обувной колодки.

Материалы верха обуви подвергаются сложным деформационным воздействиям. В процессе формования верха обуви материал верха подвергается деформированию до 15 % при внутреннем способе формования. Материал должен обеспечивать выполнение технологических операций при формовании верха обуви, а также хорошо приформовываться к стопе и сохранять заданную форму в процессе эксплуатации. Разработка цифровых двойников трикотажных полотен позволяет создавать рациональные структуры полотен с заданными деформационными и гигиеническими свойствами, тем самым снижает расход сырья на вязание трикотажного полотна. Вязание цельной заготовки позволит снизить количества отходов при раскрое деталей верха обуви на 15–20 %. В последствие на цельную вязаную заготовку верха обуви аэрозольным или переносным методом нанести полиуретановое полимерное покрытие, то получится заготовка верха обуви из искусственной кожи с заданными свойствами. Тем самым уменьшается количество отходов искусственных кож, которые не перерабатываются в производстве.

Заключение. В заключение хотелось бы отметить, что применение цифровых технологий и изготовление цельных заготовок верха обуви позволит обувным предприятиям снизить количество отходов при раскрое деталей верха обуви, а также уменьшить трудозатраты при сборке обуви.

1. Md. Abu Sayid Mia, Md. Nur-E-Alam, A.B.M. Wahid Murad, Farid Ahmad, and M. Kamal Uddin Waste Management & Quality Assessment of Footwear Manufacturing Industry in Bangladesh: An Innovative Approach // International Journal of Engineering and Management Research. — 2017 (7), 402–407
2. Theodoros Staikos, Richard Heath, Barry Haworth, and Shahin Rahimifard. End-of-Life Management of Shoes and the Role of Biodegradable Materials // 13th CIRP International conference on life cycle engineering. — 2006, 497–502

РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА С УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ И НАНОЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

А.П. Васильев, Т.С. Стручкова, А.Г. Алексеев, А.А. Охлопкова

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия; gtvap@mail.ru

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем является низкая надёжность эксплуатации техники в арктических регионах при экстремально низких температурах. Особое внимание уделяется компонентам машин с взаимодействующими поверхностями, таким как подшипники скольжения, уплотнения, втулки и другие элементы трибосистем. В связи с этим разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих высокой морозо-, износостойкостью, становится важной задачей современного материаловедения. Подобные материалы необходимы для предотвращения выхода из строя техники и технологического оборудования в зимний период эксплуатации.

Одним из перспективных материалов является политетрафторэтилен (ПТФЭ), который отличается широким диапазоном рабочих температур (от -200 °С до $+260$ °С), химической инертностью и низким коэффициентом трения, что делает его универсальным материалом, применяемым в химической, пищевой и машиностроительной промышленности [1]. Однако использование ПТФЭ в узлах трения ограничено из-за его низкой износостойкости, твёрдости и слабого сопротивления ползучести [2]. Для устранения этих недостатков предлагается модификация ПТФЭ углеродными волокнами и наноксидами металлов, что может улучшить его эксплуатационные характеристики.

Цель работы – исследовать влияние механоактивированных углеродных волокон и диоксида циркония на структуру и свойства ПТФЭ.

Материалы и методы. В рамках исследования использовали ПТФЭ марки ПН, углеродные волокна (УВ) и наноразмерный диоксид циркония (ZrO_2). Концентрацию углеродных волокон варьировали в диапазоне от 5 до 15 мас. %, в то время как содержание ZrO_2 оставалось постоянным и составляло 1 мас. %.

Проведены исследования деформационно-прочностных свойств (ГОСТ 11262, ГОСТ 9550) на машине Autograph AGS-J (Shimadzu, Япония), триботехнических характеристик по схеме трения «палец-диск» на трибометре УМТ-3 (СЕТР, США). Структуру композитов изучали методами ИК-спектроскопии, рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии.

Результаты и их обсуждение. Введение комплексных наполнителей (УВ + ZrO_2) в ПТФЭ способствует улучшению его физико-механических и

трибологических характеристик. Максимальные значения напряжения при сжатии и твёрдости по Шору D наблюдаются в композите ПТФЭ + 10 мас. % УВ + 1 мас. % ZrO_2 , превышающие показатели исходной полимерной матрицы на 57% и 17%, соответственно. Однако дальнейшее увеличение содержания углеродных волокон до 15 мас. % приводит к снижению этих параметров. Плотность ПКМ снижается с увеличением концентрации наполнителей, достигая минимального значения для состава ПТФЭ + 15 мас. % УВ + 1 мас. % ZrO_2 , что на 14% ниже плотности исходного полимера. Это связано с образованием структурных дефектов, таких как пустоты, при высоком содержании наполнителей в ПТФЭ.

Результаты трибологических исследований показали значительное увеличение износостойкости композиционных материалов во всех исследуемых составах. При содержании 5–10 мас. % углеродных волокон (УВ) и 1 мас. % ZrO_2 в полимерной матрице износостойкость возрастает в 835–883 раза по сравнению с исходным ПТФЭ. При дальнейшем увеличении содержания наполнителя износостойкость повышается в 360 раз относительно исходного полимера, однако это значение в 2,3–2,4 раза ниже, чем у композитов с содержанием 5–10 мас. % УВ и 1 мас. % ZrO_2 . Коэффициент трения ПКМ увеличивается на 45 % по сравнению с исходным ПТФЭ при содержании 5–10 мас. % УВ. Несмотря на увеличение коэффициента трения, его значения остаются в пределах, характерных для антифрикционных материалов ($f \sim 0,3$). Наибольшее увеличение коэффициента трения наблюдается в композите с 15 мас. % УВ.

Таким образом, наилучшие физико-механические и трибологические характеристики демонстрирует композит состава ПТФЭ + 10 мас. % УВ + 1 мас. % ZrO_2 . Разработанный материал с улучшенными свойствами может быть использован для изготовления деталей узлов трения в технике и технологическом оборудовании.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ НИР № FSRG-2023-0026.

1. Okhlopova A. A. et al. Main directions for research on the development of tribotechnical composites used in the Arctic Regions (Experience of North-Eastern Federal University in Yakutsk) // Inorganic Materials: Applied Research. — 2019 (10), 1441—1447
2. Amenta F. et al. Sliding wear behaviour of fibre-reinforced PTFE composites against coated and uncoated steel // Wear. — 2021 (486), 204097

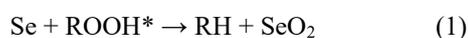
ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОГО СЕЛЕНА НА ТЕРМООКСИЛИТЕЛЬНУЮ СТОЙКОСТЬ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПЛЁНОК

Е.В. Воробьева¹, В.Е. Агабеков², Л.И. Южик²

¹Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

²Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Для повышения термоокислительной стабильности полиэтиленовых плёнок используют антиоксиданты, которые представляют собой органические соединения, содержащие фенольные или аминные группы. Некоторые неорганические вещества также обладают антиоксидантными свойствами, например, селен [1]. Предполагают [2], что селен ингибирует термоокисление порошкообразного полиэтилена по реакциям с образующимся гидропероксидом по брутто-схеме:



Цель работы – установить влияние добавок дисперсного селена на термоокислительную стойкость полиэтиленовых плёнок.

В исследованиях использовался порошкообразный нестабилизированный полиэтилен низкого давления ($M_{r, \text{cp}} = 235000\text{--}240000$) и порошок селена Se ($d < 0,152$ мм, particle size – 100 mesh). Полимерные плёнки толщиной 100 мкм получали из смеси порошков полиэтилена и селена методом термического прессования. Термоокисление проводили при температуре 150 °С. Контроль за процессом окисления осуществляли методом ИК-спектроскопии, используя полосу 1720 cm^{-1} (карбонильная группа). По кинетическим кривым накопления карбонильных групп определяли индукционный период окисления (ИПО) образцов плёнок (рисунок 1). Продолжительность ИПО является характеристикой термоокислительной стойкости плёнок и антиокислительного действия введённой в ее состав добавки.

Добавление дисперсного селена увеличивает термоокислительную стойкость полиэтиленовых пленок. При содержании 0,1 мас. % селена в плёнках их ИПО составил 28 ч (рис. 1, кривая 3). Для сравнения, при введении такого же количества органического антиоксиданта ирғанокса 1010 ИПО увеличился до 31 часа (рис. 1, кривая 5). Аналогичные значения ИПО наблюдали для порошкообразного изотактического полипропилена [3].

ДТГ/ДТА-анализ образцов полиэтиленовых плёнок с антиоксидантными добавками проводили при непрерывной продувке воздухом в интервале

температур 40–600 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин. Согласно полученным термограммам, в образцах с добавлением селена отсутствует экзотермический пик окисления (в области ~240 °С); расширен и увеличен по площади эндотермический пик термодеструкции (в диапазоне 430-460 °С).

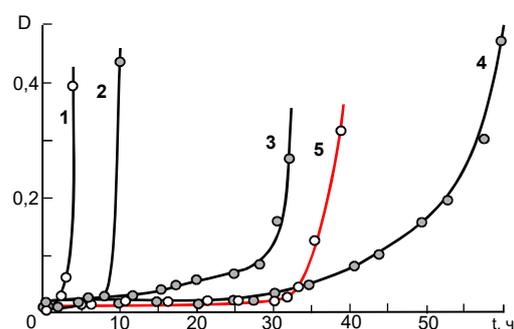


Рис. 1. Кинетика изменения интенсивности полосы поглощения 1720 cm^{-1} в ИК-спектрах плёнок ПЭ с добавками селена (в мас. %): 1 – без добавок; 2 – 0,02; 3 – 0,1; 4 – 0,2; 5 – 0,1 мас. % ирғанокс 1010. Толщина плёнок 100 мкм, температура окисления 150 °С

Таблица 1. ДТГ/ДТА-анализ образцов плёнок полиэтилена

Образец ПЭ плёнки с до- бавками (мас. %)	ДТА _{min} , °С (плавление)	ДТА _{max} , °С (термо-окис- ление)	ДТГ _{max} , °С (деструкция)
Без добавки	123	242	452,0
0,2 ирғанокс	123	245	457,9
0,2 селена	125	–	446,0

Отмеченные термические эффекты показывают, что введение селена в состав полиэтиленовых плёнок приводит к формированию сшитой, а значит более термически стабильной, структуры.

- Zaharescu T., Jipa S., and Mihalcea I. Kinetic effects of selenium on degradation of ethylene-propylene copolymer // Journal of applied polymer science. – 2001 (80), no. 11, 2053–2057. <https://doi.org/10.1002/app.1304>
- Jipa S. et al. Efficiency assessment of additives in thermal degradation of i-PP by chemiluminescence II. Selenium // Polymer Degradation and Stability. – 2000 (68), no. 2, 165–169
- Jipa S. et al. Efficiency assessment of additives in thermal degradation of i-PP by chemiluminescence I. Triazines // Polymer Degradation and Stability. – 2000 (68), no. 2, 159–164

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНОГО ОТЖИГА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Янг Гао¹, Сяохун Цзян¹, Д.Г. Пилипцов², А.В. Рогачев²

¹ Международная Китайско-Белорусская научная лаборатория по вакуумно-плазменным технологиям, Нанкинский университет науки и технологии, Нанкин, КНР

² Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

Введение. Композиционные металл-углеродные эффективно применяются для модификации поверхностных свойств узлов трения [1]. Введение в состав покрытий хрома, являющегося карбидообразующим элементом, позволяет значительно изменить их механические и коррозионные свойства. При этом стоит отметить, что в процессе трения происходит нагрев рабочих поверхностей, который приводит к изменению фазового состава покрытий, термодеструкции углеродной матрицы. Как правило, такое поведение происходит из-за взаимодействия с кислородом, активирующим термоокислительные процессы, образование оксидных соединений.

Целью работы является установление закономерностей влияния режимов термообработки в вакууме на структуру, механические и триботехнические свойства хром-углеродных покрытий, содержащих высокую концентрацию металла.

Полученные результаты и их анализ. Осаждение а-С:Сг покрытий проводилось из совмещённых потоков импульсной углеродной плазмы и ионов титана при режимах испарения, обеспечивающих формирование в покрытиях хрома с содержанием ~ 45 мас. %. Осуществлён отжиг покрытий при пониженном давлении в течении часа при различных температурах (200 °С и 400 °С, 600 °С и 800 °С). Методом спектроскопии комбинационного рассеивания (СКР) установлены изменения фазового состава, структуры композиционных покрытий в зависимости от режима термообработки. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) показано увеличение доли Cr-C связей после термообработки при 800 °С. Методами СКР и РФЭС установлено, что наличие хрома в покрытии в высокой концентрации приводит к возрастанию количества Cr-C связей и уменьшению sp^3/sp^2 отношения. При проведении термообработки в вакууме снижается интенсивность протекания термоокислительной деструкции углеродной матрицы, и перестройка структуры определяется процессами разрушения sp^3 гибридных связей с последующим взаимодействием атомов углерода с хромом. Методом инструментального индентирования определена зависимость твёрдости и модуля упругости Cr/a-C покрытий от температуры обработки в вакууме.

Анализ полученных результатов позволяют сделать следующие выводы:

1. Максимальные значения твёрдости (15–17 ГПа) достигаются после отжига при 400–600 °С благодаря формированию нанокompозитной структуры с

дисперсными растворёнными карбидами хрома (таблица 1).

Таблица 1. Механические свойства а-С:Сг покрытий

Температура отжига, °С	H, ГПа	E, ГПа	μ	$j, 10^{-16} \text{ м}^3/(\text{Н}\times\text{м})$
без отжига	13,4	210,4	0,35	18,4
200	13,6	208,9	0,39	12,6
400	15,4	256,8	0,25	11,9
600	17,3	260,1	0,21	10,3
800	11,9	208,9	0,49	29,4

2. При $T > 800^\circ\text{C}$ твёрдость снижается до 12 ГПа из-за коалесценции карбидов и роста зёрен.

3. Модуль упругости увеличивается с 210 ГПа (без термообработки) до 260 ГПа (600 °С), что связано с упорядочением карбидной фазы.

Триботехнические свойства в зависимости от температуры отжига характеризуются следующими особенностями:

1. Коэффициент трения покрытий после отжига при 400–600 °С снижается с 0,35 до 0,21, что объясняется формированием граничного слоя графита, действующего как твёрдая смазка. При дальнейшем увеличении температуры возрастает до 0,49, что определяется увеличением абразивного износа крупными карбидными частицами, образующимися на поверхности покрытия (такое предположение подтверждается результатами исследования поверхностной морфологии выполненное методом АСМ, показывающее значительный рост шероховатости RMS и размера зерна с ростом температуры отжига).

2. Высокая износостойкость достигается при нагреве до 600 °С: карбиды хрома подавляют микропластическую деформацию, а графит снижает адгезионный износ, при этом низкая шероховатость снижает абразивный износ контртела. При отжиге 800 °С износ увеличивается в 2–3 раза из-за хрупкого разрушения карбидной структуры и образования трещин на границах зёрен.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и технологий КНР (№ 2022YFE0196800) и Министерства Образования Республики Беларусь (проект 20212076).

Ссылки на использованные источники

1. Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы / под ред. А.В. Рогачева. — М.: Радиотехника. — 2020

ЗАЩИТНЫЕ ТВЕРДЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ПОЖАРНОЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Т.А. Говор, О.В. Рева

Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь;
tatiana.govor.ucp@yandex.by

Введение. Одним из эффективных и перспективных способов создания коррозионностойких жаропрочных твёрдых материалов является модификация гальванических металлопокрытий дисперсными частицами оксидов, карбидов, нитридов и др. [1].

Материалы и методы. Нами были изучены состав, микроструктура и эксплуатационные характеристики никелевых покрытий, полученных при электрохимическом осаждении из нового высокоскоростного кислого кремнефтористого электролита никелирования [2], допированного химически стойким оксидом V_2O_5 , с размерами частиц не более 10 мкм в количестве 0,2–1 г/л.

Результаты и обсуждение. Исследование никелевых покрытий методом СЭМ показало, что микроструктура их поверхности очень плотная, однородная и равномерная, сформированная из нехарактерных для никелевых осадков пирамидальных кристаллитов (рис. 1).

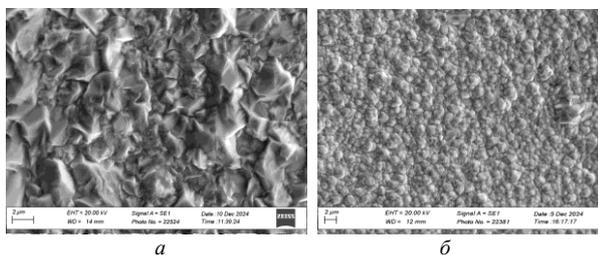


Рис. 1. СЭМ-фотографии никелевых покрытий с толщиной 35 мкм. Плотность катодного тока 4 А/дм² (а); 12 А/дм² (б)

При этом повышение плотности тока в допустимом диапазоне приводит к выравниванию микроструктуры поверхности покрытий и уменьшению размеров кристаллитов до 0,5–1 мкм, что является общей закономерностью для электрохимически кристаллизованных металлов (рис. 1).

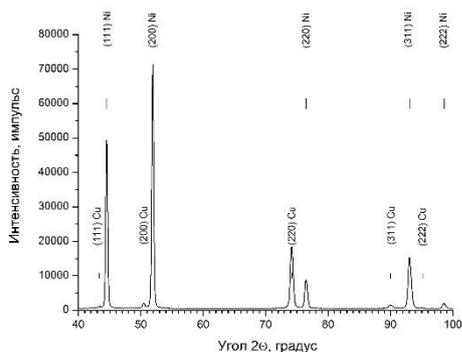


Рис. 2. Рентгенограмма никелевых покрытий, полученных при плотности тока 4 А/дм² и концентрации V_2O_5 – 1 г/л

Данные рентгеноструктурного анализа (рис. 2) подтверждают формирование пирамидальных кристаллитов – направление основных текстур (200) и (111) – рост кристаллов металла по всем остальным направлениям сильно ингибирован, что обнаруживается практически при всех плотностях тока.

В результате детального глубокого микроанализа установлено, что в покрытиях с толщиной 30–35 мкм (толщина, достаточная для надёжной защиты деталей ПАСТ от коррозии) элементы распределены равномерно по всей толщине плёнки, причём соединений ванадия в покрытиях не обнаружено. Следует отметить, что в составе всех исследованных покрытий равномерно по всей их глубине присутствует незначительное количество кислорода (до 2 ат. %). По всей вероятности, он входит в состав оксо-гидроксо соединений никеля, формирующихся в прикатодной зоне в виде наноразмерной твёрдой фазы, которые включаются в покрытия в незначительных количествах, которые не нарушают, а модифицируют физико-механические свойства плёнок (табл. 1).

Таблица 1. Результаты элементного анализа покрытия

Элемент	Образец № 1		Образец № 2		Образец № 3	
	Вес. %	Атом. %	Вес. %	Атом. %	Вес. %	Атом. %
C	6,32	24,54	6,7	25,68	5,82	22,97
O	0,51	1,48	0,55	1,57	0,47	1,4
Ni	93,17	73,98	92,76	72,75	93,7	75,62

Заключение. Установлено, что полученные никелевые покрытия однородные, плотные и не имеют пор. Несмотря на то, что размеры отдельных кристаллитов могут достигать 5–6 мкм, эти кристаллиты сформированы из практически неразличимых сросшихся воедино зёрен. Для покрытий, полученных из кремнефтористого электролита, значение микротвёрдости составляет 1700–2300 МПа, что превышает в 3–5 раз твёрдость никеля, осаждаемого из электролита Уоттса. При длительных испытаниях в концентрированных коррозионных средах при 50 °С изменения покрытий полностью отсутствуют, что подтверждает их высокую перспективность для антикоррозионной защиты деталей пожарной аварийно-спасательной техники.

1. Гамбург Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов. — М.: Янус-К. — 1997
2. Рева О.В., Говор Т.А. Получение оптимальных параметров скоростного электрохимического осаждения никелевых покрытий для деталей ПАСТ методом математического планирования эксперимента // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. — 2024 (8), № 3, 289–300

МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ИЗОТАКТИЧЕСКОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА И БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА

Т.М. Гулиева¹, Н.И. Курбанова¹, М.Н. Байрамов², В.М. Сафарова²

¹Институт Полимерных Материалов Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Сумгаит, Азербайджанская Республика; turkanquliyeva30@gmail.com

²Институт Радиационных Проблем Министерства, науки и образования Азербайджанской Республики, Баку Азербайджанская Республика

В настоящее время огромный интерес среди разработчиков полимерных материалов вызывают наноразмерные металлосодержащие наполнители, которые уже при небольших количествах в полимерной матрице приводят к увеличению модуля упругости, прочности, повышению термо-, теплостойкости и устойчивости к горению, снижению газопроницаемости материала [1].

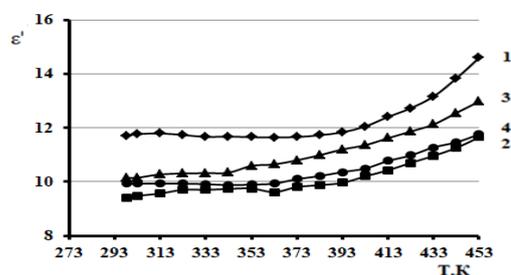
Металл-полимерные наноконпозиты приобрели популярность в различных потенциальных областях применения, таких как микроволновые диэлектрики, сердечники индукторов, устройства хранения энергии, магнитные датчики, микроволновые поглотители и т. д., благодаря их уникальному сочетанию диэлектрических и магнитных свойств, а также их частотной зависимости. Потребность в уменьшении размеров и повышении рабочей частоты расходных электронных устройств, таких как смартфоны или портативные компьютеры, обуславливает необходимость разработки нового класса материалов с высокой диэлектрической проницаемостью [2].

Цель работы — получение и исследование физико-механические и диэлектрические свойств наноконпозитных полимерных материалов на основе полипропилена (ПП) и бутадиен-нитрильного каучука (БНК-40) с применением в качестве нанонаполнителей (НН) наночастиц (НЧ) различных оксидов металлов. В качестве НН использовали НЧ оксида никеля (NiO) и оксида кобальта (CoO) стабилизированные полимерной матрицей промышленного полиэтилена высокого давления. Содержание наночастиц 5 мас. %, размер 36 ± 1.0 нм. Также использовали наночастицы диоксида циркония (ZrO_2) фирмы “Skyspring nanomaterials” (USA) с размером частиц 20–30 нм. Соотношение компонентов композиции (мас. %): ПП/БНК/НН=70/30/ (0.5; 1.0; 2.0).

Исследованы физико-механические и диэлектрические свойства полученных наноконпозитов. Показано, что наиболее высокие результаты физико-механических показателей получены при использовании 1.0 мас. % НН. Введение в состав композиции НЧCoO приводит к увеличению предела прочности при разрыве (σ_p) от 13.76 до 21.69 МПа и относительного удлинения (ϵ_p) от 22 до 40 %. Использование НЧNiO приводит к увеличению σ_p от 13.76 до 17.24 МПа, ϵ_p в 1.25 раза, а НЧZrO₂ σ_p от 13.76 до

26.75 МПа, ϵ_p композита от 22 до 24 %.

Данные температурные зависимости истинной части диэлектрической проницаемости (ϵ') представлены на рисунке. (1 – ПП/БНК; 2 – ПП/БНК/НЧNiO; 3 – ПП/БНК/НЧCoO и 4 – ПП/БНК/НЧZrO₂).



Как видно из рис. характер изменения зависимостей $\epsilon'=f(T)$ для всех образцов одинаково, т.е. с ростом температуры наблюдается нелинейная дисперсия диэлектрической проницаемости, значения ϵ' растут медленно (до температуры 363–373 К), далее скорость подъема значений диэлектрической проницаемости увеличивается вплоть до температуры 453 К. Как известно для полипропилена при $T = 296$ К и частоте 103 Гц $\epsilon' = 2,26$. При этом наименьшее значение ϵ' у образца 2 ($\epsilon'_{298} = 9,4$ и $\epsilon'_{453} = 11,8$), а наибольшее у образца 1 ($\epsilon'_{298} = 11,7$ и $\epsilon'_{453} = 14,6$). Образцы 4 и 3 имеют значения соответственно ($\epsilon'_{298} = 9,9$ и $\epsilon'_{453} = 11,8$) и ($\epsilon'_{298} = 10,15$ и $\epsilon'_{453} = 13$). Увеличение значения ϵ' с повышением температуры может быть обусловлено межфазной поляризацией (поляризация Максвелл-Вагнера), которая происходит в гетерогенных структурах и обусловлена накоплением зарядов на межфазной границе из-за разных значений диэлектрической проницаемости и проводимости матрицы и наполнителя [3].

1. Ramazanov MA, Maharramov AM, Hajiyeva FV, et al. Microwave absorption of polymer nanocomposites on the base high-density polyethylene and magnetite nanoparticles // J. Elastomers Plast. — 2019 (51), no. 2, 130—142
2. Sharma H., Jain S., Raj et al. Magnetic and dielectric property studies in Fe- and NiFe-based polymer nanocomposites // Journal of Electronic Materials. — 2015 (44), 3819—3826
3. Громов В.В. Физико-химические процессы, при электризации диэлектриков // ЖФХ. — 2005 (79), 121—125.

ПОСТОБРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛАСТИН МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ 3Д-ПЕЧАТЬЮ

В. Гупта¹, Дж. Сингх¹, Д. Мудгал¹, М.Л. Хейфец², Н.Л. Грецкий², Д.Н. Хилько³

¹Тхапарский инженерно-технологический институт, Патиала, Индия; vishal.gupta@thapar.edu

²Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь; mlk-z@mail.ru

³ООО «ШТРАБАГ Инжиниринг Центр», Минск, Беларусь; dmitry.khilko@strabag.by

Актуальной проблемой аддитивного производства полимерных изделий медицинского назначения является их постобработка с целью получения требуемого качества поверхностей и кромок.

В настоящей работе приведены результаты тестовой обработки полимерных пластин медицинского назначения размерами 80×10×5 мм, полученных методом послойного наложения (FLM-печать) с использованием термопластичной нити (рис. 1).



Рис. 1. Полимерные пластины, полученные 3Д-печатью

Тестовая постобработка полимерных деталей проводилась с использованием виброгалтовочной установки лоткового типа Rösler R210/530 TE-30 с объемом рабочей ёмкости 20 л с системой очистки и рециркуляции рабочей жидкости Z800 К-НА (рис. 2).



Рис. 2. Виброгалтовочная установка лоткового типа

В качестве технологической среды были выбраны абразивные керамические тела RXX 10/15 S (рис. 3) и рабочая жидкость (1,5 %-ый водный раствор компаунда ZF 113). Выбор вышеуказанного абразива обусловлен его высокой агрессивностью, обеспечивающего максимальный съём материала без нарушения объёмной структуры полимера. Рабочая жидкость обеспечивает удаление шлама из зоны обработки. Тип лотковой виброустановки лоткового типа небольшого объёма выбран исходя из формы, размеров и веса обрабатываемых деталей.

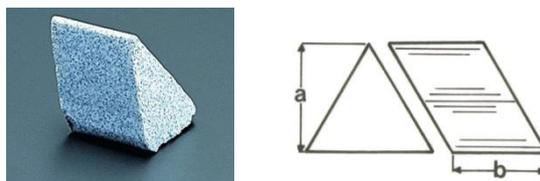


Рис. 3. Керамические абразивные тела в форме треугольника с наклонным срезом

В результате тестовой обработки партий полимерных деталей продолжительностью 6 часов с использованием наиболее «агрессивного» керамического абразива установлено следующее [1]: наблюдается минимальный съём материала с поверхности деталей, острые кромки притуплены, геометрия и размер отверстий не изменены, разрушение текстуры поверхности не наблюдается. Увеличение времени обработки и использование других типоразмеров абразива является нецелесообразным.

Для промышленной постобработки мелкосерийной партии аналогичных деталей рекомендуется использовать роторную установку с объёмом барабана 14 л с сепарационным устройством (рис. 4), что позволит добиться большего съёма материала (при необходимости) и сократить время обработки.



Рис. 4. Виброгалтовочная установка роторного типа

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований ГКНТ БРФФИ №Т23ИНДГ-001.

1. Гупта В., Сингх Дж., Мудгал Д., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л., Хилько Д.Н. Послойный синтез изделий с последующей обработкой абразивным инструментом // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докл. Междунар. научн.-практ. симп., Минск (25 сентября 2024). Минск: Белорусская наука. — 2024, 30—35

СИНТЕЗ НЕПРЕДЕЛЬНЫХ ЭПОКСИКЕТОНОВ И ИЗУЧЕНИЕ ИХ ВЛИЯНИЯ НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

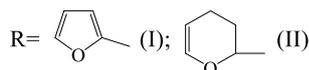
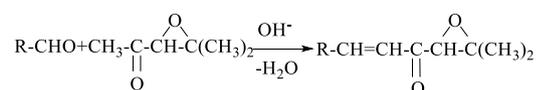
Н.Х. Гусиев, С.Н. Аллахвердиева, Х.А. Мамедова, Г.И. Новрузова, Т.Г. Вердиева

Институт Полимерных Материалов Министерства Науки и Образования, Сумгаит, Азербайджанская Республика; husiyev2019@mail.ru

Известно, что композиционные материалы на основе эпoxidных олигомеров, наряду с положительными свойствами, в отверждённом состоянии сталкиваются с рядом проблем. Эти композиции становятся малоэластичными и обладают низкой термостойкостью, что не соответствует требованиям современной техники и ограничивает их использование в различных областях [1].

Для устранения этих недостатков, а также для получения эпoxidных смол, обладающих высокими прочностными показателями, в качестве модификаторов в состав смолы ЭД-20 обычно вводят активные разбавители-модификаторы (эпоксисоединения различной химической природы и структуры), уменьшающие их вязкость и повышающие жизнеспособность, эластичность, прочность и ударную вязкость [2].

Ранее нами было показано, что эпoxidные смолы ЭД-20, модифицированные непредельными моно- и диэпоксикетонами [3] с последующим отверждением полиэтиленполиамином (ПЭПА) или малеиновым ангидридом (МА) обладают улучшенными физико-механическими свойствами и повышают технологические свойства эпoxidных компаундов. Продолжая работу по синтезу и изучению модифицирующих свойств моноэпоксикетон в эпoxidных композициях, нами по методике [4] синтезированы непредельные моноэпоксикетоны фурилового и дигидропиранового рядов – 6-фурил-2-метил-2,3-эпокси-5-пентен-4-он (I) и 6-(3,4-дигидропиранил)-2-метил-2,3-эпокси-5-пентен-4-он (II). Синтез соединений (I, II) осуществлён путём альдольно-кетоновой конденсации 2-метил-2,3-эпоксипентанона-4 с 2-фуранкарбальдегидом или 3,4-дигидро-2-Н-пиран-2-карбальдегидом в условиях межфазного катализа (40%-ный водный раствор NaOH, ТЭБА) по схеме:



Синтезированные непредельные эпoxidкетоны I, II хорошо совмещаются с олигомером ЭД-20 и были испытаны в качестве модификаторов для создания эпoxidных композиций на основе смолы ЭД-20 с целью достижения оптимальных физико-механических показателей. Содержание активных

разбавителей в композициях варьировалось от 10 до 30 мас. ч. на 100 мас. ч олигомера ЭД-20. Приготовление эпoxidных композиций осуществляли в фарфоровом стакане при интенсивном перемешивании смолы и соединений (I, II) в пределах 10–30 мас. ч. Смесь нагревали до 45 °С и добавляли 15 мас. ч. ПЭПА или МА. После соответствующих переработок исследования показали, что структурирование ЭД-20 соединениями (I, II) приводит к заметным изменениям ее физико-механических и теплофизических свойств. Таким образом, в процессе модификации разрушающее напряжение при растяжении увеличивается в 1.5–2.1 раза, эластичность в 5–6 раз, ударная вязкость в 1.3–2 раза, теплоустойчивость в 1.3–1.7 раза, а диэлектрическая прочность возрастает в 1.5–2.6 раза. Исследование показало, что полученные композиции, содержащие 20 мас. ч. модифицирующих добавок (соед. I, II), при отверждении в присутствии 15 масс.ч. ПЭ или МА имеют максимальные значения физико-механических показателей в случае использования МА с немодифицированной смолой. Улучшенные показатели можно объяснить тем, что в процессе отверждения компаундов ПЭПА или МА происходит химическое взаимодействие с эпoxidной смолой и модификатором. В этом процессе эпoxidное кольцо как смолы, так и модификатора раскрывается, образуя вторичную гидроксильную группу, которая участвует, по-видимому, в дополнительной сшивке между собой по эпoxidному кольцу, в результате чего образуется сетчатая структура, что и приводит к повышению физико-механических показателей композиций. Таким образом, выявление модифицирующих свойств соединений (I, II) позволяет расширить ассортимент активных добавок при отверждении смолы ЭД-20 и получать эпoxidные композиции с низкой исходной вязкостью и хорошими физико-механическими свойствами.

1. Чернин И.З., Смахов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. — М.: Химия. — 1982
2. Чалаев Н.М. Новое в производстве и применении добавок для модификации полимерных материалов // Пласт. массы. — 2010, № 5, 3–6
3. Гусиев Н.Х., Гараманов А.М., Абдиев О.Б., Ибрагимова М.М., Мирмехтиева М.К. Диэпоксикетоны алифатического и алициклического ряда как разбавители – модификаторы эпoxidной смолы // Пласт. массы. — 2019, № 11-12, 27–30
4. Курбанов С.Б., Мамедов Э.Ш., Гусиев Н.Х., Агаева Э.А. Синтез алициклических непредельных эпoxidкетонов в условиях межфазного катализа // Докл. АН Азерб. ССР. — 1989, № 9, 31–35

ВЫБОР ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ И ОЦЕНКА ИХ СОВМЕСТИМОСТИ СО СРЕДОЙ

А.Х. Джанахмедов^{1,2}, М.Я. Джавадов²

¹Азербайджанская Национальная академия авиации, Баку, Азербайджанская Республика;
dzhanakhmedov@yahoo.com

²Азербайджанская Инженерная академия, Баку, Азербайджанская Республика

В последние годы при выборе материалов для уплотнений важное место отводится физико-химическим свойствам полимерных материалов и упрочняющим их способам за счёт дисперсно-наполненных наполнителей. Одной из важнейших задач проектирования уплотнений является выбор материалов, совместимых с окружающей средой и внутренней средой. Рабочие жидкости и смазки различных машин в основном являются минеральными или синтетическими маслами, выполняющими в гидросистеме, помимо функции рабочего тела, функции смазочного и охлаждающего агента, защиты деталей от коррозии, отвода из системы продуктов износа [1, 2].

Показано, что полимерная матрица стабилизирует свою исходную структуру при введении углеродных наполнителей. Анализируются результаты исследований физико-механических свойств структурированных дисперсно-наполненных композитов на основе эластомерных матриц и углеродосодержащих микроразмерных частиц. Описаны межфазные взаимодействия в структурированных полимерных композитах и фрактальные соотношения для прогнозирования эффекта усиления подобных сред. Показано, что снижение модуля упругости вследствие агрегации частиц наполнителя при повышении его содержания определяет снижение пластичности композита. Приводится анализ работы уплотнительных узлов с учётом совместимости материалов уплотнений со средой и выбираются критерии для оценки материалов пар трения по комплексу физико-механических параметров.

Согласно компьютерному моделированию, прочностные характеристики наполненных стекловолокном композитов (твёрдость по Шору, модуль упругости, предел текучести) увеличивается по сравнению с ненаполненным сверхвысокомолекулярным полиэтиленом (СВМПЭ) [3]. Данные трибологических испытаний по схеме «шар-по-диску» (проведённых на машине трения УМТ) стеклокомпозитов на основе СВМПЭ с разными аппретами показывают, что интенсивность изнашивания и коэффициент трения значительно меньше по сравнению с ненаполненными СВМПЭ (см. табл.).

Предложенная и реализованная модель поведения наполненных композиций на основе СВМПЭ в трибосопряжении позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние с учётом коэффициента трения и предела текучести материала матрицы и с введением критериев разрушения исследовать их влияние на износ при трении. Показано, что определённое сочетание значений коэффициента

трения и предела текучести позволяет значительно снизить износ.

Таблица. Трибологические характеристики СВМПЭ и композитов на его основе

Наполнитель вес, %	Интенсивность изнашивания, 10^{-5} мм ³ /Н·м	Коэффициент трения f
СВМПЭ	2,68±0,46	0,101±0,002
105 РСВ* (отожжённое)	2,41±0,19	0,067±0,003

Изложенные результаты продемонстрировали, что отношение микротвёрдость/предел текучести, а также износостойкость для полимерных материалов определяется только их структурным состоянием, характеризующимся фрактальной размерностью структуры. Константа в уравнении Тора равна 3 только для твердых тел, у которых структура достаточно близка к евклидовой.

Исследования показывают, что СВМПЭ обладает повышенными характеристиками ряда механических и функциональных свойств, в частности высоким сопротивлением изнашиванию, низким коэффициентом трения, устойчивостью к воздействию кислот и щелочей. Поэтому СВМПЭ широко применяется в машиностроении. Однако широкое внедрение СВМПЭ сдерживается его низкими механическими характеристиками. Одним из путей решения указанной проблемы является введение волокнистых наполнителей различного состава. Рубленое стекловолокно (РСВ) является распространённым и относительно доступным армирующим наполнителем. Оно обладает высокой прочностью и жёсткостью, хорошей теплопроводностью и широко используется в качестве наполнителя для полимерных композиционных материалов, причём эффект армирования резко усиливается при увеличении длины волокон более 1 мм. Композиты на основе СВМПЭ, армированные рубленными стекловолокнами и обладающие повышенными механическими и трибологическими свойствами, имеют широкую перспективу применения в узлах трения для тяжёлого и нефтяного машиностроения, а также для железнодорожного транспорта.

1. Нильсон Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. — М.: Химия. — 1978
2. Janahmadov A.Kh. and Javadov M.Y. Fractal Approach to Tribology of Elastomers. — Springer International Publishing AG, 2nd ed. — 2020
3. Яновский Ю.Г., Никитина Е.А., Теплухин А.В. и др. Новые компьютерные технологии для моделирования структуры и микромеханических свойств гетерогенных вязкоупругих сред // Физ. мезомех. — 2003 (6), № 4, 129—142

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОД И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

В.Дж. Джафаров, Н.А. Алимирзоева, С.А. Бекташи, М.Дж. Раджабова, Н.Н. Каримова

Министерство науки и образования, Институт полимерных материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; nahidalimirzayeva@gmail.com

Цель. Создание высококачественных полимерных композиционных материалов нового поколения с комплексом эксплуатационных свойств и соответствующими физико-механическими, теплофизическими и др. Получены композитные образцы на основе полиэтилена высокого давления и природной минеральной породы «лизардит» из района Кельбаджар села Зульфугарлы с различным массовым процентным содержанием компонентов и изучены их физико-механические свойства. Для обеспечения совместимости полимера и наполнителя, а также получения более качественного продукта в систему был добавлен аппрет, синтезированный в лабораторных условиях.

Материалы и методы. Проблема получения качественных, экологически чистых и безопасных материалов с комплексом эксплуатационных свойств является актуальной проблемой современности. В зависимости от свойств нового поколения композитов, созданных в результате исследований, расширяются области их применения, а образцы рассматриваются как перспективные материалы в современной науке [1]. Создание композитов с высокими качественными свойствами достигается за счёт целенаправленного подбора компонентов, их добавления в оптимальных пропорциях и дисперсности. В зависимости от свойств исходной полимерной матрицы качество материала может изменяться под действием ряда факторов [2].

Результаты и их обсуждение. Были созданы образцы композита без использования аппрета и с его использованием в соответствии с соответствующими массовыми соотношениями компонентов, входящих в состав композита, и изучены их свойства. В систему вводится наполнитель с дисперсностью 53 мкм.

Полимерная матрица – полиэтилен высокого давления (ПЭВД) марки 10803-020.

Таблица 1. Физико-механические свойства композитных образцов. Без аппрета

№	Состав композ., %	Растягивающая сила σ , МПа	Относительное удлинение ϵ , %	ПТР, г/10мин
1.	ПЭВД – 70 Напол. – 30	12.6	30	2.0
2.	ПЭВД – 50 Напол. – 50	17.3	16	0.37
3.	ПЭВД – 30 Напол. – 70	15.2	8	–

В табл. 1 представлены физико-механические характеристики образцов, соответствующие различному массовому процентному содержанию компонентов, входящих в состав композита. В образце, состоящем из 50 % ПЭВД и 50 % наполнителя, предел прочности при растяжении высокий ($\sigma = 17.3$ МПа). Соответственно, относительное удлинение при разрыве принимает меньшие значения по мере увеличения количества наполнителя. Показатель текучести сплава уменьшается, наконец, в образце, соответствующем 70 % наполнителя, текучести не наблюдается. Это также приводит к созданию более прочного композита.

Таблица 2. Физико-механические свойства композитных образцов. С аппретом. Аппрет – [Гексен 1.-Акриловая кислота]-3%

№	Состав композ., %	Растягивающая сила σ , МПа	Относительное удлинение ϵ , %	ПТР, г/10мин
1.	ПЭВД – 70 Напол. – 30	13.2	28	0.9
2.	ПЭВД – 60 Напол. – 40	13.7	22	0.7
3.	ПЭВД – 40 Напол. – 60	16.2	23	0.07
4.	ПЭВД – 30 Напол. – 70	18.0	16	0.03

В табл. 2 представлены физико-механические свойства композитных образцов, соответствующих различным массовым соотношениям при наличии замасливателя. В композитном образце с ПЭВД/Напол./Аппрет – 30/70/3% предел прочности при растяжении достигает максимального значения ($\sigma = 18.0$ МПа). Таким образом, в результате проведенных научных исследований определено, что введение аппрета улучшает прочность композита, соответствующего 30/70/3% образца, и такой материал может быть использован в производстве строительных материалов, а также в различных областях техники.

- Valeh J. Jafarov, Nahida A. Alimirzayeva, Mubariz A. Manafov, Sevil A. Bektashi, Mansura J. Radzhabova, Sanam M. Khalilova, Gulnara Kh. Musayeva. Influence of apprete on composites based on isotactic polypropylene // PPOOR. — 2025 (26), № 2, 511–523
- П.Ш.Алханов, С.А.Бекташи, Г.Х.Мусаева, М.А.Манафов, М.Дж.Раджабова, С.М.Халилова, В.Дж.Джафаров. Влияние полиакрилата на свойства полиэтиленовых композиций // Известия Азербайджанской Инженерной Академии. 2021 (13), № 4, 86–99

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОГО ПОЛИПРОПИЛЕНОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В.М. Достуева, Б.А. Мамедов

Институт полимерных материалов Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Сумгаит, Азербайджанская Республика; ipoma@science.az

В последнее время антибактериальные полимеры и олигомеры начали использовать как биологически активные добавки для создания антибактериальных полимерных композиций, что позволяет увеличить срок эксплуатации полимерных материалов [1]. В рамках наших предыдущих исследований были получены определённые данные о полимерах и олигомерах, содержащих биологически активную салициловую группу, а также о получении на их основе антибактериальных композиционных материалов [2].

Малеиновый ангидрид (МА) широко применяется для модификации полипропилена в процессе его прививки. В этой реакции степень прививки изменяется в зависимости от различных факторов, таких как концентрация мономера и инициатора, а также продолжительность и температура реакции [3].

Цель. Данная работа посвящена синтезу и исследованию биологически активных полимеров, полученных на основе макромономера полипропилена (ППММ) и малеинового ангидрида, а также разработке антибактериального полипропиленового композиционного материала.

Материалы и методы. Полипропиленовый композиционный материал состоит из 30 % полипропилена и 70 % минерала кальцита (CaCO_3).

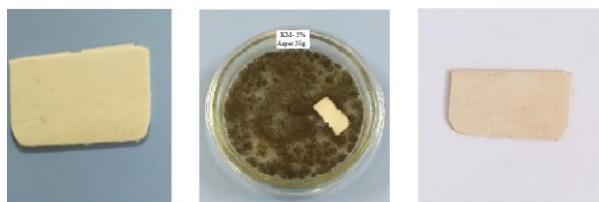
Малеинированный ППММ был синтезирован в результате реакции сополимеризации эквимольной смеси МА и ППММ в ампуле с добавлением пероксида бензоила при температуре 70 °С. Характеристическая вязкость полученного сополимера составила 0.22 г/100 мл, а температура плавления – 169 °С.

Результаты и их обсуждение. Для получения композиционных материалов ППММ с МА и салициловой кислотой, их смешивают и пропускают через экструдер при температуре 170 °С. Затем из полученной массы изготавливают стандартную пластину на прессе при температуре 170 °С и давлении 15 МПа. После этого пластины вырезаются в виде лопаток в соответствии с ГОСТ 11262-80, и на разрывной машине определяются предел прочности и относительное удлинение.

Результаты исследований показывают, что физико-механические характеристики композиционных материалов, содержащих 2,0–10,0 % антибактериального малеинированного полипропилена, изменяются незначительно по сравнению с исходным полипропиленом, и это изменение практически не

выходит за пределы погрешности измерений.

Антимикробное действие синтезированной биологически активной добавки и полученных на её основе полипропиленовых композиционных материалов было исследовано диско-диффузионным методом. В качестве тест-культуры использовался *Staphylococcus aureus* (золотистый стафилококк), представляющий грамположительные бактерии, которые являются основными возбудителями гнойно-воспалительных процессов. В качестве представительницы грам-отрицательных бактерий была выбрана *Escherichia coli* (кишечная палочка), а также из пигментообразующих грамотрицательных бактерий – *Pseudomonas aeruginosa* (сине-зелёная гнойная палочка). Из дрожжеподобных грибов использовался *Candida albicans* (кандиды), а из спорообразующих грамположительных палочковидных бактерий – *Bacillus anthracoides*.



перед посадкой

30 дней после посадки

Рис. 1. Полипропиленовый композиционный материал (30 мас. % CaCO_3) + салициловой кислоты (5 %) + Маленированный олигопропилен (5 %)

В результате исследований было установлено, что ни один из протестированных пластиковых материалов не изменился ни визуально, ни микроскопически, что свидетельствует о их устойчивости к воздействию грибов.

1. Донцова Э.П., Жарненкова О.А., Снежко А.Г. Полимерные материалы с антимикробными свойствами // Пластикс. — 2014, № 1,2, 30–35
2. Rasulzade N. Sh., Dostuyeva V. M., Bakhshaliyeva K. F., Muradov P. Z. Preparation and investigation of antibacterial materials on the basis of oligopropylene ester of salicylic acid and polypropylene // Processes of Petrochemistry and oil Refining. — 2019 (20), 284–290
3. Riechert V. M., Ferrofino A. G., Ressler J. A., Failla M. D., Quinzani L. M. Modification of Propylene- α -olefin Copolymers by Maleic Anhydride Grafting and Blending // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. — 2019 (24), 355–373

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИАНИЛИНА И ПОЛИПИРРОЛА С НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДОВ КОБАЛЬТА И ЖЕЛЕЗА

Ж.В. Игнатович¹, Л.Н. Филиппович^{1,2}, С.Н. Лемешонок¹, А.А. Рогачев¹

¹Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Введение. Полимерные токопроводящие композиты с магнитными наночастицами могут изменять магнитные свойства наночастиц, что имеет огромный потенциал для использования в различных видах приложений: магниторезонансная терапия, управление высвобождением лекарственных препаратов с использованием электрических стимулов и др. [1].

Цель работы – разработать эффективный метод синтеза композитов ПАНИ/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ и Ппир/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$, исследовать их структуру и проводящие свойства в матрицах поливинилового спирта и хитозана с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и импеданса.

Материалы и методы. Композит ПАНИ/ $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$ получали в две стадии:

1 стадия – получение НЧ $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$ по методике: готовили охлаждённые (до 5–9 °С) растворы (раствор 1 включал 0,04 н НСl, 150 мМ FeSO_4 и 300 мМ FeCl_3 , 200 мМ $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, раствор 2 – 150 мМ $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot 2\text{HCl}$ и 2,22 М $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). К 1,35 мл раствора 2 быстро добавляли 0,15 мл раствора 1, интенсивно перемешивали и полученный золь кобальт/магнетит обрабатывали УЗ 3,0 часа, используя УЗ-ванну с рабочей частотой 30–40 кГц, при постепенном возрастании температуры среды вследствие УЗ нагрева. Очистка НЧ осуществлялась центрифугированием (10 мин, 10000 об/мин) с последующей промывкой дистиллированной водой и этанолом (получено 360 мг НЧ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$).

2-я стадия – получение полианилина путем приготовления 2 растворов: первый (раствор А) содержал 2,5 мл анилина, 6 мл НСl, 3,5 мл $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$, второй (раствор В) содержал 0,4 мл НСl, 0,7 г персульфата аммония и 9,6 мл дистиллированной воды. В раствор В при перемешивании на магнитной мешалке через каждые 10 мин в течение 2 ч добавляли по 0,5 мл раствора А. Инкубировали при перемешивании 3 ч. Композит ПАНИ/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ получали добавлением к ПАНИ 360 мг НЧ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ при перемешивании на магнитной мешалке в течение 2 ч. Общее время реакции составило 5 ч (получено 2,3 г композита ПАНИ/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$).

Полипиррол получали по следующей методике: в 200 мл дист. воды растворяли 0,3 г метилоранжа, добавили 0,7 мл пиррола (раствор А). В отдельном стакане в 23 мл H_2O дист. растворили 2,7 г гексагидрата FeCl_3 (раствор В). К раствору А при перемешивании на магнитной мешалке по каплям добавляли раствор В (перемешивали 24 ч.). Полученный осадок отфильтровывали на фильтре Шотта с промывкой дист. водой до бесцветного фильтрата, затем промывали 1 раз этанолом и

сушили в сушильном шкафу.

Композит Ппир/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ получали добавлением к Ппир 360 мг НЧ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ при перемешивании на магнитной мешалке в течение 2 ч. Общее время реакции составило 5 ч (получено 2,3 г композита Ппир/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$).

Поливом из растворов получены плёнки на основе композитов ПАНИ/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ и Ппир/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ в матрицах 9 %-ного раствора поливинилового спирта (ПВС) и 1,5 %-ного раствора хитозана в среде растворителей вода-этиловый спирт-уксусная кислота. Содержание композитов составило 1,2 мас. %.

Результаты и обсуждение. Полученные композиты представляют собой сферические агрегированные частиц диаметром до 1 мкм. Согласно данным элементного анализа оксид железа и оксид кобальта равномерно распределены по всему объёму композитов.

По данным импедансной спектроскопии в диапазоне частот 1–10⁶ Гц была рассчитана полная удельная проводимость образцов 1–4 (таблица).

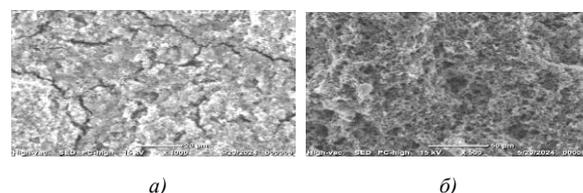


Рис. СЭМ – изображения композитов ПАНИ/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ (а) и Ппир/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ (б)

Таблица. Электропроводность плёночных материалов с композитами ПАНИ/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ и Ппир/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$

образец	состав	σ , См/см
1	ПВС/хитозан/ ПАНИ/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
2	ПВС/ПАНИ/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
3	ПВС/хитозан/ Ппир/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$	$1,43 \cdot 10^{-5}$
4	ПВС/Ппир/ $\text{Co}_3\text{O}_4(\text{Fe}_3\text{O}_4)$	$1,20 \cdot 10^{-6}$

Установлено (таблица), что электропроводность синтезированных композитов возрастает на порядок в совмещённой матрице из ПВС и хитозана, что важно при разработке материалов с требуемой проводимостью для различных приложений.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы» задания 8.4.2.2.

1. Направленный транспорт лекарственных средств: от идеи до внедрения: учебно-методическое пособие / И.И. Кулакова [и др.]; ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России. — Рязань: ОТС и ОП. — 2018

ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРСУЛЬФОНА И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

А.М. Казанин, И.Н. Фомичева

Тульский Государственный Университет, Тула, Россия; fenix-230701@ro.ru

Введение. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение в разнообразных аспектах жизни: от бытовых предметов и одежды до военной и авиационно-космической промышленности. Такой спрос обусловлен лёгкостью обработки, низкой стоимостью сырья, а главное – возможностью получения материала с заданными свойствами в широком диапазоне.

Целью исследования является разработка состава и методики получения композиционного материала на основе полиэфирсульфона, армированного дискретными углеродными волокнами.

Материалы и методы. По длине волокон наполнителей композиты делятся на две группы: с дискретными и непрерывными волокнами. Непрерывно армированные композиты обладают большей прочностью вдоль волокон, но изготовление изделий малого размера и сложной формы из них не всегда возможно.

В качестве матрицы рассматривались высокотемпературные пластики, к которым относится полиэфирсульфон – аморфный термопластичный полимер с широким диапазоном температур эксплуатации и высокой термостойкостью (температура стеклования 220–230 °С), устойчивостью к минеральным кислотам, щелочам и электролитам при pH от 2 до 13. Он также обладает хорошей адгезией с углеродными волокнами, что является ключевым фактором при создании композита.

Наиболее распространённым методом получения армированных термопластов является смешение в расплаве, включающее в себя: расплавление полимера, смешение, экструзию, намотку/рубку на гранулы. Несмотря на относительную простоту метода, при создании материалов на основе высокотемпературных пластиков с большой степенью армирования возникают трудности, обусловленные высокой вязкостью расплава, агломерированием волокон в пучки, деградацией полимера.

В данной работе был применён метод смешения в растворе, вязкость которого значительно меньше, чем у расплава, что позволяет упростить проникновение матрицы в промежутки между волокнами. В качестве растворителя использовали N-метилпирролидон. В работах [1, 2] удаление растворителя осуществлялось сушкой в течение 4 часов при температуре 100 °С. Однако, N-метилпирролидон имеет высокую температуру кипения (202 °С) и постепенно реагирует с полимером, что усложняет его удаление. Поэтому было решено использовать удаление

растворителя дистиллированной водой. Промывка производилась при температуре 80 °С с периодической заменой воды каждый час до прекращения выделения в раствор растворителя. Готовый материал сушили при 140 °С в течение 10 часов.

Из готового материала изготовили стандартные образцы по ГОСТ 56800-2015 методом прямого прессования и испытаны на разрывной машине РЭМ-50.

Результаты и их обсуждение.

По результатам испытаний получена зависимость прочности при растяжении от содержания волокна (рис. 1).

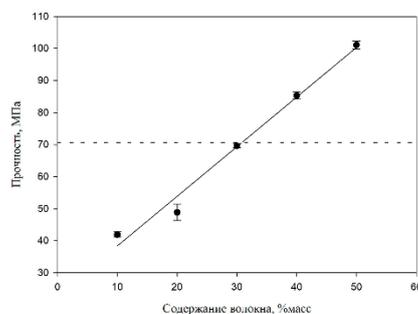


Рис. 1. Зависимость прочности при растяжении от содержания волокна. Сплошная линия – ПКМ, пунктир – прочность матрицы

Результаты показывают, что при небольшом содержании волокна прочность ПКМ меньше прочности матрицы, что обусловлено пластифицирующим действием растворителя. Несмотря на данный негативный эффект, при увеличении содержания наполнителя прочность повышается до 102 МПа при 50% наполнении.

В дальнейших исследованиях для оценки применимости разработанного материала при пониженных и повышенных температурах планируется провести его испытания в диапазоне температур от -50 °С до +170 °С.

Благодарность. Исследование выполнено при поддержке гранта правительства Тульской области в сфере науки и инноватики, договор № 176 от 28.12.2024 г.

1. Torokhov V.G. et al. Mechanical and thermophysical properties of carbon fiber-reinforced polyethersulfone // *Polymers*. — 2022 (14), no. 14, 2956
2. Чердынцев В.В. и др. Межфазное взаимодействие в композитах на основе наполненного углеродным волокном полиэфирсульфона // *Быстрозакаленные материалы и покрытия*. — 2020, 360–365

УЛИТОЧНАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ФИЛАМЕНТОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ, ИЗГОТОВЛИВАЕМАЯ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ

П.Э. Калиш

Тулский государственный университет, Тула, Россия; pavel.kalish13@gmail.com

Введение. При разработке операций FDM-печати много времени затрачивается на физико-механические испытания материала для печати, поскольку зачастую возникает необходимость изготовления и испытания большого количества образцов. Часть из напечатанных образцов испытывается на растяжение по направлению выкладки слоёв, поэтому определяемый предел прочности на растяжение непосредственно характеризует испытываемый материал, испытание которого невозможно в стандартизированной оснастке из-за возникающих напряжений в местах закрепления. В работах [1–4] рассмотрены различные конструкции приспособлений для испытаний филамента. Оснастка с улиточными зажимами показывает наилучшую повторяемость, особенно при больших растягивающих нагрузках.

Принцип действия такой оснастки основан на уменьшении натяжения филамента за счёт сил трения и подразумевает, что с увеличением количества оборотов филамента на цилиндрической поверхности оснастки экспоненциально уменьшается нагрузка на узел фиксации. Увеличение площади пятна касания поверхности филамента с оснасткой увеличивает силу трения, что также уменьшает нагрузку на узел фиксации и уменьшает деформацию филамента на криволинейном участке приспособления. Улиточные зажимы с малым диаметром охвата, как показано в [1], могут повредить филамент, особенно изготовленный из материалов с большой жёсткостью. Это связано с совместным действием поперечного изгиба и растяжения на криволинейном участке приспособления.

Цель работы. Целью работы является разработка улиточной оснастки для измерения предела прочности при растяжении филаментов диаметром 1,75 мм, изготовленной методом 3D-печати.

Материалы и оборудование. Оснастка разрабатывалась в программном пакете SolidWorks и изготавливалась методом FDM-печати на принтере Elegoo 4 plus из PLA при 100% концентрическом заполнении. Прижимные элементы оснастки изготавливались из угленаполненного полиамида.

Испытания проводились на образцах, представляющих собой отрезки филамента длиной 5,5 м из ABS, ForMAX (угленаполненный ABS), PLA, PEI и РЕЕК. Было изготовлено по 10 образцов из каждого материала. Укладка филамента осуществлялась в спиральную канавку с фиксацией внутри улитки при внешнем диаметре в 140 мм. Испытания проводились

на РЭМ-50-А-0,5-1 со скоростью 10 мм/мин при расчётной длине 500 мм.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлены графики изменения напряжения в зависимости от деформации для 5 образцов из РЕЕК. По графикам можно судить о хорошей повторяемости испытаний. На рис. 1 представлен также график, демонстрирующий наличие проскальзываний в ходе испытания, что свидетельствует о слабом и неравномерном натяжении филамента в оснастке.

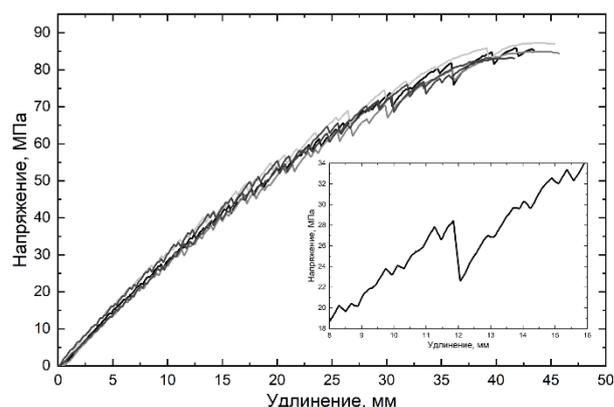


Рис. 1. Зависимость изменения напряжения от деформации для филамента из РЕЕК

Разработанная оснастка, продемонстрировала свою работоспособность, но для определения истинных деформаций в дальнейшем необходимо учитывать податливость самого приспособления и эффекты проскальзывания филамента.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FEWG-2024-0002.

1. Распопина В.Б., Шеметов Л.И., Вершинин Д.В., Терёхин С.Н. Оснастка для испытания на растяжение термопластика в форме прутка для FDM-печати // ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. — 2024 (26), № 2, 5—16
2. Yıldız A., Emanetoğlu U., Yenigun E.O., and Cebeci H. Towards optimized carbon nanotubes (CNTs) reinforced polyetherimide (PEI) 3D printed structures: A comparative study on testing standards // Composite Structures. — 2022 (296), 115853
3. Ferreira I., Vale D., Machado M., and Lino J. Additive manufacturing of polyethylene terephthalate glycol /carbon fiber composites: An experimental study from filament to printed parts // Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications. — 2018 233(9):146442071879519
4. Rodrigues S., Miri S., Cole R.G., Postigo A.A. Salen M.A., Dondish A., Melenka G.W., and Fayazbakhsh K. Towards optimization of polymer filament tensile test for material extrusion additive manufacturing process // SSRN Electronic Journal. — 2023 (24), 8458—8472

ВЛИЯНИЕ ПАЛЫГОРСКИТА НА СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Ю.В. Капитонова, П.Н. Тарасова, Н.Н. Лазарева, А.А. Охлопкова

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия;
kapitonova-kirillina@mail.ru

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) обладает высокой коррозионной стойкостью, устойчивостью к высоким и низким температурам, самосмазывающей способностью. Основной целью наполнения является улучшение характеристик материала, например, повышение износостойкости, прочности или стабильности формы. Наполнение ПТФЭ является одним из самых простых и эффективных методов модификации фторопластов. Наполнение ПТФЭ позволяет адаптировать его свойства под конкретные требования к материалам, расширяя сферу его применения. Наполнение минералами широко используется в производстве композиционных материалов, поскольку они позволяют улучшить физико-химические свойства материалов, характеризуются экологичностью и доступностью. Учитывая вышеизложенное, целью работы является исследование влияния минерала – палыгорскита на структуру и свойства политетрафторэтилена.

Материалы и методы. В качестве полимерной матрицы использован политетрафторэтилен марки ПН-90 (Россия), в качестве наполнителей – палыгорскит (Черкасское месторождение, Украина). Палыгорскит – глинистый минерал с общей химической формулой $(Mg,Al)_2Si_4O_{10}(OH) \cdot 4H_2O$. Характеризуется волокнистой структурой, образует спутано-волокнистые агрегаты, обладает высокой пористостью, малой плотностью ($1-2.5 \text{ г/см}^3$). Для измельчения минерального компонента композитов была использована планетарная мельница «Активатор-2S» (Россия). Композиты получали сухим смешением компонентов с последующим холодным формованием и спеканием при $375 \text{ }^\circ\text{C}$. Для сравнения были изготовлены образцы ПКМ двух типов – с палыгорскитом без механоактивации и механоактивированным палыгорскитом. Были проведены исследования физико-механических и триботехнических характеристик ПКМ, структурные исследования методом сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, инфракрасной спектроскопии, рентгеноструктурного анализа. Кроме изучения структуры и свойств ПКМ были проведены физико-химические исследования палыгорскита до и после механоактивации.

Результаты и их обсуждение.

В работе представлены результаты физико-химических исследований исходного палыгорскита, а также механоактивированного палыгорскита. Механическую активацию проводили в течение 1, 2, 3 мин с использованием лабораторной мельницы Активатор 2S (Россия) при ускорении 80g. Подбор оптимального времени механоактивации проводили по

результатам исследований с помощью лазерного анализатора частиц, атомно-абсорбционной спектроскопии, рентгеноструктурного анализа. Показано, что после механоактивации уменьшается размер частиц, увеличивается содержание катионов алюминия, вследствие разрушения структуры.

Исследования физико-механических характеристик композитов показали улучшение показателей на 30–40 %. Результаты трибологических исследований: износостойкость повышается в 350 раз, при этом коэффициент трения не превышает 0,24.

Микроснимки поверхности трения (рис. 1) композитов показывают, что наполнитель локализуется на поверхности и играет роль препятствий пластическому деформированию поверхностных слоев полимерной матрицы в процессе трения, что приводит к снижению скорости массового изнашивания.

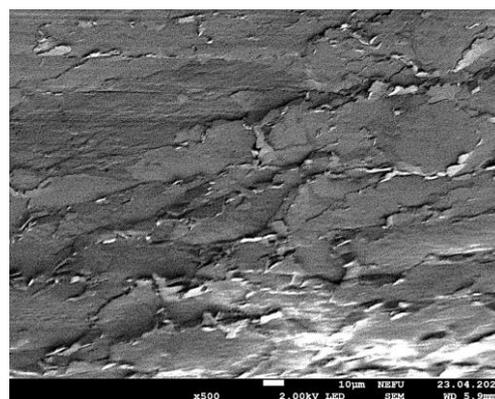


Рис. 1. Поверхность трения композита ПТФЭ + 5 мас. % палыгорскита

Методом ИК-спектроскопии показано, что имеются полосы поглощения, характерные для палыгорскита, вызванные колебаниями связи Si-O ($1000-1100 \text{ см}^{-1}$) и пики, характерные для ПТФЭ. После трения появляются дополнительные полосы, характеризующие гидроксильные, карбонильные и карбоксильные группы. Появление данных полос характеризует протекание трибохимических реакций, также влияющих на триботехнические характеристики получаемых материалов. Проведенные исследования показывают, что использование механоактивированного палыгорскита предпочтительнее, поскольку значительно улучшает характеристики ПТФЭ.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 25-13-20061).

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян

Национальный Политехнический Университет Армении, Ереван, Армения; ars.karapetyan56@mail.ru

В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что при трении и изнашивании антифрикционных термопластичных полимерных материалов происходят различные трибохимические процессы, оказывающие существенное влияние на физико-механические и трибологические свойства материалов. Понимание характера этих процессов представляет большой научный интерес для целенаправленного создания новых износостойких самосмазывающихся полимерных материалов для металлополимерных и полимер-полимерных трибосопряжений, а также повышения эксплуатационных свойств современной триботехнической системы [1–4]. Следует учесть, что особое внимание привлекают многотоннажно выпускаемые термопластичные полимерные материалы с развитой сырьевой базой.

Цель. Настоящая работа посвящена исследованию физико-химических процессов в зоне трибоконтакта и их влияния на антифрикционные свойства алифатических полиамидов методами структурной трибомеханики.

Материалы и методы. В силу комплекса физико-механических, трибологических и химических свойств исследовались известные полиамиды 6 и 66 (ПА6, ПА66), находящие все большее применение в машиностроении и приборостроении для изготовления подшипников скольжения, зубчатых колёс, направляющих станков и т.д. Для изучения физико-химических процессов, происходящих в поверхностных слоях полиамидов ПА-6 и ПА-66, было произведено масс-спектрометрическое исследование этих слоёв путём термического разложения в масс-спектрометре MS-30. Трибологические свойства исследуемых материалов оценивались на машине трения СМЦ-2 по схеме «вал-частичный вкладыш» при скоростях скольжения от 0.5 до 1.5 м/с и в диапазоне нагрузок от 0.1 до 10.0 МПа. В качестве полимерного образца служил валик $\varnothing 10 \times 15$ мм, а металлического контртела – диск $\varnothing 50 \times 14$ мм, изготовленный из стали 45 (55...60 HRC) с шероховатостью $R_a = 0.06 \dots 0.14$ мкм. В ходе испытаний фиксировались значения коэффициента трения, износа и скорости скольжения.

Результаты и их обсуждение. Масс-спектрометрический анализ продуктов деструкции, зарегистрированных в спектрах, свидетельствует о том, что при повышенных температурах основным процессом, обуславливающим ухудшение трибологических свойств полиамидов, является термоокислительная деструкция, протекающая по свободно радикальному механизму. Наиболее чувствительными к термо-

окислению в полиамидах являются аморфные области, которые легко подвергаются энергетическим воздействиям. Процесс термораспада ПА-6 и ПА-66 происходит двухступенчато, достигая максимумов выделения продуктов при температурах 200 °С (область предплавления) и 320...420 °С. При анализе данных трибодеструкции полиамидов можно отметить, что общим характерным фактором для них является наличие в спектрах азотсодержащих ионов, соответствующих структурам с группами $-N=C=O$ и $-C=N$. Вероятно, это связано с наличием в полиамидах амидной и метиленовых групп. Появление этих продуктов объясняется гомолитическим распадом связи $-NH-CH_2-$. При сопоставлении данных интенсивности изнашивания и трибораспада исследуемых полиамидов выявлено, что трибораспада сопровождающийся преобладающим количеством азотсодержащих фрагментов в общей доле выделявшихся продуктов, приводит к понижению износостойкости полиамидов, т.е. трибустойчивость звена алифатического полиамида зависит от интенсивности гомолитического распада связи $-NH-CH_2-$.

Заключение. Проведенные исследования показали, что интенсивность износа алифатических полиамидов зависит от скорости распада, протекающего по метиленовой группе амидной связи. По мере уменьшения количества метиленовых групп между амидными группами, т.е. с увеличением гетероцепной характеристики, уменьшается вероятность гомолитического распада $-NH-CH_2-$ и повышается износостойкость полимерных материалов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках научной темы «Создание и исследование деталей машин и фрикционных материалов на полимерной основе с использованием местного сырья и минералов» в базовой проблемной лаборатории «Трибология» НПУА за 2024 г. при финансовой поддержке Комитета по науке при Министерстве образования, науки, культуры и спорта Республики Армения.

1. Pogosian A.K., Karapetyan A.N., and Hovhannisyan K.V. Study of Physico-Chemical Modification of Heterochained Polymers with Armenian Minerals // Tribologia. — 2004, no. 1, 63–73
2. Меликсетян Н.Г., Карапетян А.Н., Сароян В.В., Оганесян К.В. Основные закономерности трения и изнашивания композиционных материалов и смазочных масел // Вестник научно-технического развития. — 2016 (105), № 5, 27–42
3. Krasnov A. P., Solov'eva V. A., and Panova M. O. Tribochemical Activity in Polymers // INEOS OPEN. — 2019 (1), no. 2, 1–8
4. Меликсетян Н. Г., Карапетян А. Н., Оганесян К. В. и др. Исследование и прогнозирование износостойкости полимерных композитов с минеральными добавками // Трение и износ. — 2023 (44), № 4, 350–359

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРА ЭТИЛЕНА С ГЕКСЕНОМ И ВОЛОКНИСТЫМ БАЗАЛЬТОМ

Н.Т. Кахраманов, О.М. Гулиева

Институт Полимерных Материалов Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики,
Сумгаит, Азербайджанская Республика; najaf1946@rambler.ru

Использование минеральных наполнителей, пластификаторов, компатибилизаторов, аппретов, структурообразователей, стабилизаторов и агентов смазки позволяет в значительной степени повлиять на улучшение комплекса эксплуатационных свойств полимерных композитов. Будет уместно отметить, что сополимеры этилена с гексеном (СЭГ), относятся к числу сравнительно малоизученных полимеров, в особенности, когда касается проблем по разработке на их основе композитов с волокнистым наполнителем [1]. Волокнистый базальт (ВБ) относится к числу природных минералов, который в силу особенностей её структуры трудно поддаётся смешиванию с полимерной матрицей. В связи с этим, целью исследования являлось изучение влияния совместителей – компатибилизаторов и сшивающих агентов в системе полимер-наполнитель на структурные особенности и термомеханические характеристики композитов в твёрдом, высокоэластическом и вязкотекучем состояниях. В качестве объекта исследования использовали сополимер этилена с гексеном-1 (СЭГ) марки PE6438R, характеризующийся нижеследующими свойствами: плотность 932 кг/м³ разрушающее напряжение 37,4 МПа, относительное удлинение 810 %, прочность при изгибе 42.2 МПа, температура плавления 122 °С, теплостойкость по Вика – 115 °С, показатель текучести расплава (ПТР) – 5,1 г/10 мин., степень кристалличности – 75%. ВБ – эффузивная магматическая горная порода зелено-черного цвета, которая относится к основному составу нормального ряда щёлочности группы базальтов. Компатибилизатор – Exxelox PE1040 (ExxonMobil Chemical) (ПЭМА) – функционализированный малеиновым ангидридом ПЭВП. Приводятся термомеханические кривые зависимости деформации от температуры для композитов компатибилизированного СЭГ* с различным содержанием ВБ. Найдено, что для всех образцов характерно два состояния: твердое и вязкотекучее. При этом, если фазовый переход первого рода или температура размягчения для исходного СЭГ* происходит при 135 °С, то для композитов с 1.0; 5.0; 10.0; 20.0 мас. % значение этой температуры изменяется соответственно следующим образом: 141 °С, 138 °С, 138 °С и 133 °С. Если для композита с

1.0 мас. % содержанием ВБ температура размягчения имеет самое высокое значение (141 °С), то дальнейшее повышение содержания наполнителя сопровождается неоднозначным изменением величины этого показателя. При 20.0 мас. % содержания ВБ температура размягчения становится ниже, чем у исходного композита и составляет 133 °С. В процессе роста кристаллов частицы наполнителя, как «инородный» материал, вытесняются в межсферолитное аморфное пространство [2]. По мере увеличения содержания ВБ его концентрация в межсферолитном пространстве возрастает настолько, что способствует снижению подвижности проходных цепей, ответственных за деформацию и свойства при одноосном растяжении. Таким образом, возникший стерический фактор оказывает существенное воздействие и на теплофизические свойства. Сам факт снижения температуры фазового перехода первого рода у композита с 20 мас. % содержанием ВБ до 133 °С является прямым подтверждением возникновения стерического фактора в межсферолитной области, создающего определенные препятствия для формирования более совершенной и устойчивой к терморазрушению кристаллической структуры. Появление плато в этой температурной области вовсе не свидетельствуют о формировании области высокоэластической деформации. Появление этого плато, по-видимому, можно интерпретировать «полиморфизмом», т.е. существованием различных кристаллических модификаций в структуре одной полимерной матрицы, которые в высоконаполненных системах могут расплавляться при различных температурах [1, 3].

1. Kakhramanov N.T., Allahverdiyeva K.V., and Mustafayeva F.A. Structure and Properties of Conducting Composites Based on Polyolefins and Carbon Black // Russ. J. Appl. Chem. — 2022 (95), 1146—1152
2. Нгуен Конг Тинь, Чалая Н.М., Осипчик В.С. Композиты на основе полипропилена, наполненные стеклянными микросферами и базальтовым волокном // Пластические массы. — 2020, № 9-10, 72—76
3. Русанова С.Н., Софьина С.Ю., Хузаханов А.Р., Старостина И.А., Стоянов О.В. Некоторые адгезионные и физико-механические свойства смесей полиэтилена с полярными сополимерами // Клеи. Герметики. Технологии. — 2021, № 2, 2—7

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА

Н.Т. Кахраманов, Г.Х. Нуралиева

Министерство Науки и Образования, Институт Полимерных Материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; najaf1946@ Rambler.ru

Полипропилен (ПП) является одним из широко используемых в промышленности полиолефинов. Высокие прочностные характеристики в сочетании с легкостью переработки методами экструзии и литья под давлением способствовали значительному расширению его производства. Вместе с тем, плохая совместимость с минеральными и природными наполнителями создали достаточно большие трудности, связанные с их механической модификацией [1]. Одним из таких примеров является минерал базальт, который также не проявляет склонность к смешиваемости с ПП. Поэтому, проведение исследований в направлении модификации, смешиваемости и получения высокопрочных композитов на основе ПП и базальта является важной и актуальной научно-технической проблемой.

Изотактический полипропилен (ПП) марки HP500M (SOCAR-POLYMER, Azərbaycan) — разрушающее напряжение 32.5 МПа, прочность на изгиб 35.0 МПа, относительное удлинение 130 %. **Базальт** — эффузивная магматическая горная порода зелено-черного цвета, которая имеет волокнистую структуру и относится к основному составу нормального ряда щёлочности группы базальтов. **Компатибилизатор — (ППМА)** — модифицированный малеиновый ангидрид **ПП Exxelor PO1020** (ExxonMobil Chemical), предназначенный для улучшения совместимости минеральных наполнителей со всеми марками ПП. Полярные группы макроцепи компатибилизатора улучшают совместимость и адгезионный контакт на поверхности частиц наполнителя, а его основная полиолефиновая цепь совмещается с макроцепью ПП и может участвовать в формировании кристаллической фазы. Именно такой механизм работы компатибилизатора даёт возможность добиться значительного улучшения прочностных характеристик композитов. Так, например, установлено, что введение базальта в количестве от 1.0 до 20 мас. % сохраняет разрушающее напряжение на уровне 30.7–32.8 МПа. Только при 30 мас. % содержания базальта вследствие появления хрупкости величина этого показателя резко снижается. Появление хрупкости, в особенности при 30 мас. % содержания базальта характеризуется нулевым значением относительного удлинения. В таких случаях значение разрушающего напряжения становится равным пределу текучести при растяжении, что свидетельствует об

отсутствии пластической деформации [2]. В отличие от разрушающего напряжения и предела текучести при растяжении композитов повышение содержания базальта до 20 мас. % приводит к постоянному росту предела прочности на изгиб. При более высокой концентрации наполнителя прочностные характеристики заметно снижаются. Интерпретируется это обстоятельство особенностями надмолекулярной структуры и межфазной области в полиолефинах, в частности, в ПП. Следует особо отметить, что в процессе охлаждения и кристаллизации полимерной матрицы рост кристаллических образований сопровождается вытеснением частиц наполнителя в межсферолитное аморфное пространство. По мере повышения содержания наполнителя и соответственно накопления твёрдых частиц базальта в этом пространстве наступает момент, когда они полностью блокируют подвижность «проходных» макроцепей, ответственных за одноосную пластическую деформацию [2]. Поэтому, для каждой полимерной матрицы имеется свой концентрационный предел введённого наполнителя, выше которого межфазная область превращается в своеобразный твёрдый монолит, в результате которого полимерный образец теряет пластичность и хрупко разрушается. Другой немаловажной технологической характеристикой является показатель текучести расплава (ПТР), которая напрямую характеризует способность расплава полимерного композита к течению и соответственно перерабатываться методами — литья под давлением и экструзии. Найдено, что с увеличением содержания базальта наблюдается закономерное снижение ПТР композитов. При 20 мас. % содержания базальта и выше практически полностью теряется способность композитов к течению расплава. Как и следовало ожидать, при этом наблюдается постоянное повышение теплостойкости рассматриваемых композитов. Это обстоятельство еще раз подтверждает наше предположение о процессах, протекающих в межсферолитной области высоконаполненных композитов.

1. Mettyuz F., Rollings R. Composite materials. Mechanism and technology. — Izd. Tekhnosfera. — 2004 (in Russian)
2. Kakhramanov N.T., Allahverdieva Kh.V., Kakhramanly Y.N., Dadasheva E.V. Physicomechanical Properties of Multicomponent Nanocomposites Based on Polyolefins // Inorganic Materials: Applied Research. — 2023 (14), no. 2, 424–429

ПОЛЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

В.В. Киселевич

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;
valentinkis@list.ru

Цель работы: вывод уравнения зависимости электрической долговечности полимеров от величины напряжённости приложенного поля.

Теоретическая часть

Установление закономерностей влияния напряжённости E электрического поля на величину долговечности t_{br} полимеров является чрезвычайно важной задачей, решение которой позволит определить возможные пути повышения их электропрочностных свойств. В настоящей работе для получения уравнения зависимости $t_{br} = f(E)$ воспользуемся методами математической теории катастроф.

Описание физических систем в теории катастроф выполняют посредством потенциальных функций $\Phi(x; A_i)$, где x является переменной, характеризующей состояние системы, а A_i – i -м управляющим параметром, от которого зависит переменная x . Конкретный вид функции Φ определяется количеством параметров x и A_i , учитываемых при анализе физической системы.

При постоянной температуре долговечность t_{br} главным образом зависит от одного параметра – напряжённости E электрического поля, приложенного к полимеру. Поэтому при выводе уравнения электрической долговечности полимеров в первом приближении можно ограничиться рассмотрением однопараметрической функции катастрофы складки.

Уравнение функции Φ катастрофы складки, описывающее состояние полимерного диэлектрика в сильном электрическом поле имеет вид:

$$\Phi(F_E; v) = F_E^3/3 - a_t v F_E, \quad (1)$$

где F_E – безразмерная напряжённость электрического поля; v – безразмерная скорость накопления повреждений, приводящих к пробое диэлектрика; a_t – положительный масштабный множитель.

Подставляя нормировочные соотношения

$$F_E = E/E_D - 1; \quad v = t_D/t_{br} - 1 \quad (2)$$

в решение уравнения $\partial\Phi/\partial F_E = 0$, найдём искомое выражение для полевой зависимости электрической долговечности полимерного диэлектрика:

$$t_{br} = t_D / [1 + (E/E_D - 1)^2 / a_t], \quad (3)$$

где t_D – пороговое значение долговечности полимера, находящегося в электрическом поле напряжённостью $E = E_D$; E_D – величина допустимой рабочей напряжённости, соответствующей заданному ресурсу полимера.

Обсуждение результатов

Для проверки применимости выражения (3) нами выполнена обработка опытных данных [1] по изучению влияния напряжённости E на долговечность t_{br} кабельной изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ). В результате найдены значения следующих параметров: $a_t = 3,767 \cdot 10^{-3}$; $E_D = 9,82$ МВ/м; $t_D = 9,263 \cdot 10^8$ с $\approx 29,37$ лет. Полученная величина t_D согласуется со средним нормативным значением срока службы силовых СПЭ-кабелей, составляющим 30 лет. График функции $t_{br} = f(E)$, построенный для СПЭ-изоляции по формуле (3), изображён на рис. 1.

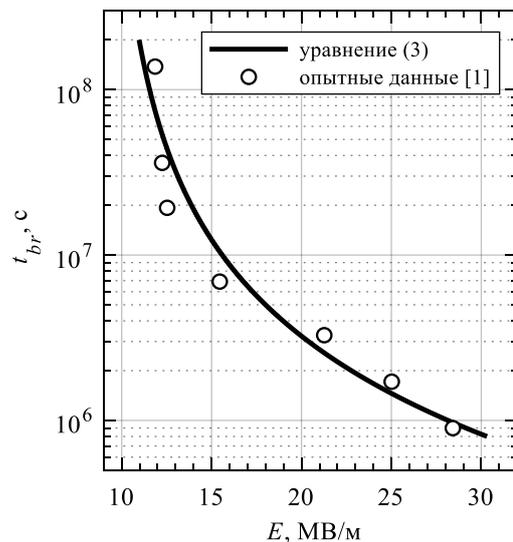


Рис. 1. Полевая зависимость электрической долговечности кабельной изоляции из сшитого полиэтилена

Из рис. 1 видно, что аппроксимирующая кривая (сплошная линия) хорошо коррелирует с опытными данными (символы). Это подтверждает возможность использования выражения (3) для описания экспериментальных полевых зависимостей $t_{br} = f(E)$ полимерных электроизоляционных материалов.

Заключение

В русле теории катастроф получено уравнение (3), моделирующее зависимость долговечности полимерных диэлектриков от напряжённости воздействующего на них электрического поля. Определены параметры этого уравнения для СПЭ-изоляции.

1. Simoni L. A general phenomenological life model for insulating materials under combined stresses // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. — 1999 (6), no. 2, 250—258

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОБИВНОЙ НАПРЯЖЁННОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

В.В. Киселевич

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель, Беларусь;
valentinkis@list.ru

Цель работы: вывод уравнения температурной зависимости пробивной напряжённости полимерных диэлектриков.

Теоретическая часть

Экспериментальные температурные зависимости пробивной напряжённости E_{br} многих полимеров характеризуются наличием аномальной области, в окрестности которой плавное изменение температуры T приводит к резкому падению E_{br} . Эта особенность позволяет использовать теорию катастроф при установлении взаимосвязи $E_{br} = f(T)$ для полимерных диэлектриков.

Действуя согласно принятому в данной теории алгоритму, запишем уравнение функции Φ катастрофы сборки, отражающее закономерности температурного поведения напряжённости в момент пробы полимерного диэлектрика:

$$\Phi(F_{br}; A_E, \Theta) = F_{br}^4/4 + A_E F_{br}^2/2 + a_T F_{br} \Theta, \quad (1)$$

где F_{br} – безразмерная напряжённость поля при пробое; A_E – величина, пропорциональная скорости подъёма напряжения; Θ – безразмерная температура; a_T – коэффициент изменения масштаба по шкале температур.

Приравняв к нулю производную $\partial\Phi/\partial F_{br}$ функции катастрофы сборки и затем выражая безразмерные параметры F_{br} и Θ через размерные величины E_{br} и T посредством соотношений

$$F_{br} = E_{br}/E_D - 1; \quad \Theta = T/T_D - 1, \quad (2)$$

получим искомое уравнение температурной зависимости пробивной напряжённости полимерного диэлектрика:

$$E_{br} = E_D [1 - (a_T(T/T_D - 1) + A_E(E_{br}/E_D - 1))^{1/3}]. \quad (3)$$

Здесь E_D и T_D – значения напряжённости и температуры в характеристической точке электрического пробоя, отождествляемой с точкой перегиба на экспериментальной кривой $E_{br} = f(T)$.

Обсуждение результатов

Проверка применимости формулы (3) была выполнена на примере полиэтилена низкой плотности (ПЭНП). В результате анализа опытной зависимости $E_{br} = f(T)$ ПЭНП [1] нами определены следующие параметры: $a_T = 0,879$; $A_E = 0,032$; $T_D = 320$ К; $E_D = 397$ МВ/м. График $E_{br} = f(T)$ для ПЭНП приведён на рис. 1, из которого видна высокая корреляция теоретической кривой и экспериментальных точек.

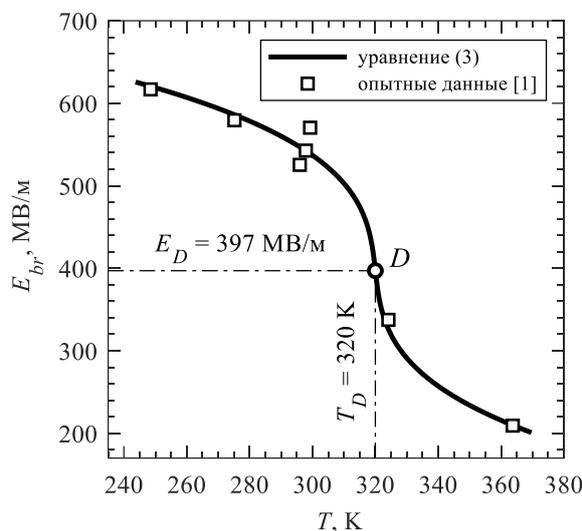


Рис. 1. Температурная зависимость пробивной напряжённости полиэтилена низкой плотности

Максимальная скорость снижения пробивной напряжённости ПЭНП при плавном повышении T имеет место в характеристической точке D электрического пробоя (см. рис. 1), которой соответствует температура $T_D = 320$ К. Наряду с этим известно [2], что при $T_\lambda \approx 317$ К в ПЭНП наблюдается релаксационный λ -переход, ответственный за размораживание подвижности надмолекулярных структур в аморфной фазе полимера. Усиление молекулярной подвижности способствует значительному росту тока в предпробивном состоянии полимера. И поскольку температуры T_λ и T_D довольно близки, естественно предположить, что резкое падение пробивной напряжённости ПЭНП в окрестности T_D обусловлено активацией кинетического процесса λ -релаксации.

Заключение

В рамках теории катастроф получено выражение (3) для описания температурного поведения пробивной напряжённости полимерных диэлектриков. Установлено хорошее согласие между опытной и теоретической зависимостями $E_{br} = f(T)$ ПЭНП. Сделано предположение о наличии взаимосвязи между кинетическими процессами λ -релаксации и электрического разрушения этого полимера.

1. Artbauer J. and Griač J. The intrinsic electric strength of polymers and its relation to the structure. Part I: Experimental // Acta Technica ČSAV. — 1966 (11), no. 3, 416—428
2. Бартев Г.М., Бартев А.Г. Релаксационные свойства полимеров. — М.: Химия. — 1992

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФИЛАМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

П.В. Ключко

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь; klochko_pv@grsu.by

В последние десятилетия интенсивно развиваются технологии изготовления функциональных изделий методом 3D-прототипирования, которые предполагают использование для их реализации материалов с особыми параметрами характеристик, обеспечивающими необходимые эксплуатационные параметры в условиях специального применения. Композиционные материалы на основе термопластов для применения в технологии 3D-прототипирования должны удовлетворять комплексу характеристик, учитывающих особенности формирования изделий путём направленной укладки филаментов, находящихся в вязкотекучем состоянии. Перспективным направлением создания таких материалов является реализация концепта многоуровневого модифицирования промышленных полимеров, предложенного в работах сотрудников учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» [1].

Для разработки составов композиционных материалов для 3D-прототипирования рассмотрены структурные, реологические и деформационно-прочностные характеристики алифатических полиамидов, модифицированных полиамидной смолой на основе талловой канифоли (ПС) и компонентами, относящимися к наноразмерным. Близкое молекулярное строение ПС и промышленных полиамидов (ПАб, ПАб.6) обеспечивают совместимость матрицы и модификатора при изменении комплекса параметров характеристик. Модифицированные композиты на основе ПАб обладают более высокими параметрами прочностных и реологических характеристик (рис.). Очевидно, эффект обусловлен действием ПС как высокомолекулярного пластификатора, который способствует формированию равновесной структуры и снижению вязкости расплава вследствие особенностей структуры ПС. Полиамидная смола (ПС) является функциональным компонентом, который существенно может изменить параметры эксплуатационных характеристик изделий из полиамидов, используемых для изготовления полимерных и металлополимерных конструкций, в том числе специального назначения, выполняя функцию комплексного модификатора, способствующего распределению дисперсных частиц и повышению адгезионных характеристик.

Исследования показали, что наноразмерные частицы различного состава и технологии получения оказывают комплексное влияние на структурно-

технологические параметры композиций на основе полиамида 6. Установлено изменение параметра вязкости расплава и параметров деформационно-прочностных характеристик, что свидетельствует об образовании адсорбционных связей физического типа между наночастицей и полиамидной макромолекулой. Формирование таких связей уменьшает активность макромолекулы в процессах взаимодействия с кислородом, увеличивая стойкость композита к воздействию повышенных температур.

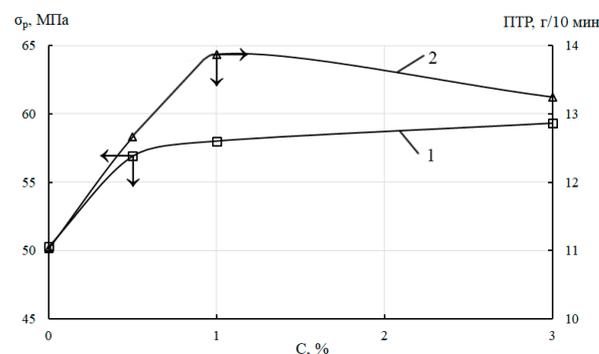


Рис. Зависимость прочности при растяжении (1) и показателя ПТР (2) полиамида 6 от содержания полиамидной смолы (ПС)

Предложены составы на основе ПС для модифицирования филаментов на основе полиамидов методом диффузионной обработки, предназначенных для изготовления функциональных изделий методом 3D-прототипирования с близкими параметрами характеристик в различных направлениях [1–3].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы (задание 8.4.1.51).

1. Антонов А. С., Струк В. А., Нахват Д. В., Ключко П. В., Прокопчук Н. Р. Механизмы многоуровневого модифицирования полиамидных матриц с применением диффузионных технологий // Поликомтриб-2022: тезисы докладов междунар. науч.-техн. конф. — Гомель: ИММС НАНБ. — 2022, 120
2. Антонов А.С., Прокопчук Н.Р., Ключко П.В., Любимов А.Г., Вишневский К.В. Полимерные композиционные материалы для функциональных изделий, полученных методом послойной 3D-печати // Полимерные материалы и технологии. — 2023 (9), № 4, 35–43
3. Струк В. А., Антонов А. С., Ключко П. В., Лесун А. Н., Нахват Д. В., Вань Сюеминь, Будько А. В. Состав и способ обработки полимерных филаментов для 3D-прототипирования: заявка ВУ а 20230253. — Оpubл. 16.10.2023

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Д.А. Козлов

Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; koslov74@mail.ru

Введение. Эксплуатационные свойства различных узлов и механизмов часто являются одним из основных факторов, от которых зависит работоспособность технических изделий. При этом в большинстве случаев основную роль в повышении эксплуатационных свойств играет поверхностный слой материала. В связи с этим актуальной задачей в настоящее время является разработка и улучшение способов, формирующих свойства поверхностных слоёв материалов, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики узлов и агрегатов, в частности, износостойкости. Одним из таких методов является электроискровое легирование поверхностей. Данный метод основан на переносе материала легирующего электрода на поверхность и позволяет в достаточно широко изменять свойства поверхности. Преимуществами данного метода являются низкая энергоёмкость процесса и относительная простота выполнения технологической операции [1]. С помощью метода электроискрового легирования удаётся повысить различные эксплуатационные характеристики материалов, такие как жаростойкость [2], трещиностойкость [3]. Для повышения триботехнических характеристик при электроискровом легировании в качестве электродов для нанесения покрытий наиболее часто используют электроды из твёрдых сплавов. Так, при электроискровом легировании стали Hardox 400 электродами из материалов T15K6, BK 6 более чем в 2 раза удалось уменьшить абразивный износ [4]. В [5] показано, что при модификации свёрл из стали P6M5 с помощью нанесения покрытия из твёрдого сплава T5K6 ресурс инструмента увеличился в 1,5–1,7 раза. Для высоконагруженных узлов трения в качестве материалов применяются медь, а также сплавы на её основе [6]. Это связано с их способностью многократного передеформирования в процессе трения без создания наклёпа.

Поэтому целью данной работы было исследование износостойкости стальных пар трения с нанесёнными покрытиями из медных сплавов, полученных методом электроискрового легирования.

Материалы и методы. Для нанесения покрытий использовали компактные электроды из бронз марок БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6, изготавливаемые по ТУ 1-92-76-82. В качестве материала для нанесения покрытий использовали конструкционную сталь 30ХГСН2А. Испытания на износостойкость проводили по схеме двух перекрещивающихся цилиндров на универсальной машине KE-4.

Эталонные валы диаметром 100 мм испытывали в паре с цилиндрическими образцами диаметром 11,3 мм. Вал вращался с постоянной окружной скоростью 0,06 м/с. В процессе испытаний нагрузка на пару трения ступенчато возрастала до 250 МПа.

Результаты и их обсуждение. В таблице 1 представлены величины износа образцов в исходном состоянии (без нанесения покрытия) и с покрытием.

Таблица 1. Величина износа образцов

Путь трения, м	Износ образцов, мкм	
	Без покрытия	С покрытием из бронзы БрМцФ3-6
0	0	0
18	50	30
36	80	40
54	125	50
72	140	70

Как видно из таблицы, образцы с нанесённым покрытием обладают значительной износостойкостью по сравнению с исходными образцами. При этом на максимальной нагрузке износ образцов с покрытием уменьшился более чем в два раза, что говорит о высокой триботехнической эффективности покрытий из медных сплавов в условиях больших нагрузок. Бронзы марок БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6 могут быть рекомендованы в качестве материала покрытий на стали 30ХГСН2А для высоконагруженных узлов трения.

- Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя при электроискровом легировании. — Владивосток: Дальнаука. — 1995
- Бурнышев И.Н., Калужный Д.Г., Кузнецов К.И. Электроискровое легирование стали, титановых и ниобиевых сплавов методом вращающегося электрода // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2024 (20), № 9, 218—222
- Давиденко А.И., Ершов В.М., Давиденко Е.В. Исследование трещиностойкости конструкционной стали 20 после электроискрового легирования титаном // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2022, № 4(79), 20—25
- Катинас Э., Янаускас В., Казак Н., Михайлов В. Повышение абразивной износостойкости стали Hardox 400 электроискровым легированием поверхности // Трение и износ. — 2019 (40), № 1, 128—135
- Кайгородов Н.Г. Электроискровое легирование как способ повышения стойкости инструмента // Сб. материалов III Международной научно-практической конф. «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего (г. Кемерово, 11-12 августа 2016 г.). — Кемерово: Западно-Сибирский научный центр. — 2016 (2), 119—121
- Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2011

МЕХАНИЗМЫ ИЗНОСА И МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.И. Колесников¹, О.В. Кудряков², Д.С. Мантуров¹,
В.Н. Варавка², И.В. Колесников¹, Е.С. Новиков¹

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

²Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия; kudryakov@mail.ru

Применение покрытий на контактных поверхностях трения для снижения износа достаточно давно используется и исследуется в трибологии. Тем не менее, постоянно расширяющаяся номенклатура покрытий и технологий их нанесения предоставляет трибологам новые возможности повышения работоспособности узлов трения и, одновременно, ставит перед ними новые научные задачи.

Цель. Целью настоящей работы являлись анализ износостойкости композиционных ионно-плазменных покрытий и обоснование методических подходов для её прогнозирования.

Материалы и методы. Объектом исследования были многослойные 2D-наноконпозиционные покрытия системы TiN/AlN общей толщиной 0,8...4,0 мкм и с толщиной слоёв 30...60 нм, нанесённых по вакуумной ионно-плазменной технологии на подложку из конструкционной стали 40XH2MA с сорбитной структурой и твёрдостью HRC 28...30. В пределах каждого нитридного слоя состав компонентов был близок к эквиатомному, а в целом по покрытию составлял Ti:Al:N = 1:1:2 (ат. %). Структура покрытий, морфология дорожек трения и механизмы износа исследованы методами сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения. Механические характеристики покрытий (твёрдость H и модуль упругости E) определялись по стандартным методикам непрерывного индентирования. Для определения трибологических характеристик (коэффициент трения μ и объёмный износ J) использовался метод испытаний на трение скольжения по схеме «шарик–диск» с круговой траекторией движения шарика-индентора.

Результаты и их обсуждение. Анализ полученных экспериментальных данных позволил построить зависимость твёрдости покрытий от их элементного состава, а также показал, что механические характеристики и износостойкость покрытий, напыленных при более низкой температуре 300–350 °С, оказываются стабильно выше, чем напыленных при 400–450 °С. Кроме того, установлено, что наибольшие значения износа J имели покрытия с наименьшей толщиной. С целью анализа влияния толщины покрытий δ на их износостойкость была привлечена расчётно-аналитическая модель прогнозирования

износа покрытий при трибологических испытаниях, разработанная авторами ранее [1, 2]. На её основе были построены диаграммы критических состояний ионно-плазменных композиционных покрытий TiN/AlN, позволившие рассчитать критическое значение толщины покрытия δ_{min} , при котором изменяется механизм износа покрытия при трении.

При относительно тонком покрытии ($\delta < \delta_{min}$), расположенном на более «мягкой» (пластичной) подложке, в процессе трибоиспытаний происходит ускоренный износ покрытия по абразивно-механическому механизму в силу прогиба покрытия и его последующего растрескивания, отслоения и скола. При этом отколовшиеся фрагменты покрытия на контактной поверхности трения играют роль абразивных частиц, что и ускоряет износ. При относительно толстом покрытии ($\delta \geq \delta_{min}$) изнашивание происходит по механизму истирания, что при высокой твёрдости покрытия характеризуется значительной его износостойкостью и существенно продлевает срок службы.

Таким образом, показано, что максимальный уровень твёрдости композиционных ионно-плазменных покрытий TiN/AlN достигается при соотношении компонентов системы, близком к стехиометрическому. Однако это не гарантирует максимальной износостойкости покрытия в условиях трибологических испытаний на трение скольжения, поскольку имеется целый ряд других факторов, оказывающих значительное влияние на процесс изнашивания, в частности – температура нанесения покрытия и его толщина.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-79-30007-П).

1. Кудряков О.В., Колесников В.И., Мантуров Д.С., Колесников И.В., Варавка В.Н. Инженерные соотношения для расчётно-аналитического прогнозирования износа покрытий при трибологических испытаниях // Трение и износ. — 2024 (45), № 2, 171—182. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-171-182
2. Кудряков О.В., Колесников В.И., Ковалева И.Н., Колесников И.В., Мантуров Д.С. Расчётно-аналитическое прогнозирование износа покрытий при трибологических испытаниях на основе моделей контактно-усталостного разрушения // Трение и износ. — 2024 (45), № 3, 262—274. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-3-262-274.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ TiAlCuN, TiAlCuCN, TiAlSiN, TiAlSiCN

С.В. Константинов¹, Ф.Ф. Комаров¹, И.В. Чижов¹, В.А. Зайков²

¹«Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь; svkonstantinov@bsu.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Цель. Посредством внесения Cu, Si и C снизить коэффициент трения и скорость износа покрытия TiAlN для повышения срока службы трущихся узлов и деталей машин.

Материалы и методы. Исследования проводились на образцах с медью и кремнием, сформированных методом реактивного магнетронного распыления [1, 2]. Исследования износостойкости проводились по методике «диск на плоскости» в условиях сухого скольжения вращающегося контртела со скоростью 0,5 об/с. Диаметр вращающегося диска – 60 мм. Значение нагрузки составляло 200 мН. Время испытаний – 1500 с. Для измерения площади треков износа использовался микроскоп Ortho-EduA13 3601-T.

Результаты и их обсуждение. Покрытия, полученные посредством мишени № 3 [1] относительно вариантов из мишени № 4 (табл. 1) демонстрируют на 6 % меньшее значение $\mu_{\text{ср}}$, на 30 % меньшую $h_{\text{изн}}$, на 12 % меньшую L . Варьирование режимов (режим 1 и 2 [1]) приводит к снижению $\mu_{\text{ср}}$ 16 %, увеличивает $h_{\text{изн}}$ на 53 % L на 23 %, а также увеличивает V на 133 %. Добавка углерода C [1] снижает $\mu_{\text{ср}}$ на 12 %, $h_{\text{изн}}$ на 59 %, L на 35 % и V на 74 %.

Таблица 1. Влияние мишени, режима нанесения и легирования углеродом C на средние $\mu_{\text{ср}}$ значения коэффициентов трения, параметры треков износа (L , $h_{\text{изн}}$, V) для покрытий с Cu

Параметр	Вариант	$\mu_{\text{ср}}$	$h_{\text{изн}}$, мкм	L , мкм	V , мкм ³
Мишень	3	0,29	3,32	883	188209
	4	0,31	4,74	1007	386917
Режим	1	0,27	4,87	1042	402389
	2	0,33	3,18	848	172738
Состав	CN	0,28	2,36	743	117191
	N	0,32	5,70	1147	457935

Плёнки, полученные посредством мишени № 1 [2] показывают на 16 % большее $\mu_{\text{ср}}$ и обладают значительно большими по размеру лунками износа, в сравнении с образцами из мишени № 2 (табл. 2). Варьирование режимов нанесения (1 и 2 [2]) не оказало значительного влияния на значения коэффициентов трения, однако значительно интенсифицировался износ покрытий: $h_{\text{изн}}$ увеличилась на 110 %, L

увеличилась на 49 %, а также увеличилась площадь износа. Карбонитрид TiAlSiCN в сравнении с TiAlSiN обладает на 22 % меньшим $\mu_{\text{ср}}$. Добавление углерода повысило износостойкость покрытий: снижение $h_{\text{изн}}$ на 80 %, L на 54 % и V на 96 %.

Таблица 2. Влияние мишени, режима нанесения и легирования углеродом C на средние $\mu_{\text{ср}}$ значения коэффициентов трения, параметры треков износа (L , W , $h_{\text{изн}}$) для покрытий с Si

Параметр	Вариант	$\mu_{\text{ср}}$	$h_{\text{изн}}$, мкм	L , мкм	V , мкм ³
Мишень	1	0,36	7,22	1278	1055719
	2	0,31	2,76	767	160851
Режим	1	0,36	7,22	1278	1055719
	2	0,35	3,43	859	220137
Состав	CN	0,29	1,38	574	32702
	N	0,37	6,80	1246	896076

Значение усреднённых трибологических характеристик для осаждённых керамических покрытий с добавлением меди Cu и кремния Si приведены в таблице 3. Покрытия TiAlCuN, TiAlCuCN в сравнении с покрытиями TiAlSiN, TiAlSiCN характеризуются меньшими значениями $\mu_{\text{ср}}$ на 12 %, меньшими L на 8 %, $h_{\text{изн}}$ на 19 % и V на 53 %. Плёнки имеют низкий коэффициент трения и малый износ, и пригодны для получения износостойких покрытий деталей и узлов машин.

Таблица 3. Влияние добавок меди Cu и кремния Si на средние $\mu_{\text{ср}}$ значения коэффициентов трения, параметры треков износа (L , $h_{\text{изн}}$, V)

Параметр	Вариант	$\mu_{\text{ср}}$	$h_{\text{изн}}$, мкм	L , мкм	V , мкм ³
Добавка	Cu	0,30	4,03	945	287563
	Si	0,34	4,99	1022	608285

- Komarov F.F., Konstantinov S.V., Chizhov I.V., Zaikov V.A., Zubar T.L., and Trukhanov A.V. Nanostructured TiAlCuN and TiAlCuCN coatings for spacecraft: effects of reactive magnetron deposition regimes and compositions // RSC Advances. — 2023 (13), 18898—18907. DOI: 10.1039/d3ra02301j.
- Konstantinov S.V., Komarov F.F., Chizhov I.V., and Zaikov V.A. The Structure and Micromechanical properties of TiAlSiN, TiAlSiCN Coatings formed by the Method of Reactive Magnetron Sputtering // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series. — 2023 (59), no. 3, 241—252

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРОВ

В.Г. Копченков, А.А. Порохня

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия; kopchenkov2@rambler.ru

Введение. Абразивное изнашивание потоком частиц характерно для оборудования по добыче и обогащению полезных ископаемых, мелиорации, дорожного и гидротехнического строительства и др.

Постановка задачи. На практике долговечность быстроизнашиваемых деталей повышают различными методами: применением легированных сталей и специальных сплавов, каменного литья и корунда на бакелитовой связке. В последнее время большое внимание уделяется вопросам повышения износостойкости быстроизнашиваемых деталей машин, работающих в абразивных средах, путём гуммирования деталей эластомерами (резины, полиуретаны, высокоэластичные пластики), износостойкость которых, в некоторых условиях нагружения, удаётся повысить по сравнению со стальными в 3–10 раз [1–3]. Рассмотрим причины этого явления.

Методы исследования. При исследовании износостойкости эластичных материалов в потоке или в массе абразивных частиц, удобно использовать энергетическую теорию изнашивания [1, 2]. Согласно этой концепции, предполагается, что в конкретных условиях изнашивания разрушение поверхности эластомеров связано не со всей кинетической энергией, а только с той её частью, которая поглощается эластомером при динамическом воздействии. Для абразивной частицы эта энергия будет потеряна, а для резиновой плоскости поглощённой. Энергией, которую поглощает сама абразивная частица, из-за малости потерь пренебрегаем.

Расчёт поглощённой энергии для резины средней эластичности показывает, что она составляет в среднем 30–40 % от общей кинетической энергии, а для стали Ст3 – 12–21 %, т. е. величина поглощённой энергии резиной более чем в два раза выше, чем для стали и, соответственно, интенсивность изнашивания больше. Но это не подтверждается опытом эксплуатации.

В связи с этим можно сделать вывод, что износостойкость при абразивном изнашивании и тем более различных по природе материалов нельзя оценивать только величиной поглощённой энергии. Необходимо учитывать и деформированный объём, т. е. возникает необходимость введения удельной характеристики – плотности поглощённой энергии e_n .

Под плотностью поглощённой энергии понимается отношение поглощённой кинетической энергии к деформированному объёму резины

Рассмотрим схематически удар сферы о

неподвижную плоскость, выполненную из различных материалов. При этом предполагаем, что размер шаров R , их масса m_1 , скорость v_0 и, соответственно, кинетическая энергия до удара одинаковые. Рассмотрим наиболее простой случай удара шара о плоскость под прямым углом ($\alpha = 90^\circ$).

Полученные результаты. Для оценки воспользуемся основными уравнениями, которые вытекают из теории Герца [4] и адекватно описывают поведение отдельных частиц при скоростях удара до 20 м/с.

Табл.1. Определение деформированного объёма металла и резины

Исходные и расчётные данные	Размерность	сталь Ст3	Резина
Модуль упругости	МПа	$2,1 \cdot 10^5$	5,0
Коэффициент Пуассона		0,28	0,49
Радиус шара	мм	12,5	12,5
Скорость удара	мм	5,0	5,0
Глубина внедрения шара	мм	0,02	5,3
Радиус контура давления	мм	1,0	8,0
Деформированный объём	мм ³	0,3	600

При равной кинетической энергии величина деформированного объёма у резины более чем в 2000 раз выше, чем для стальной плоскости. Такая большая разница деформированного объёма для резины и стали объясняется низким значением модуля упругости резины, т. е. её податливостью.

Заключение. Проведённый анализ показывает, что оценивать износостойкость эластичных материалов при изнашивании их в гидро- и газоабразивной среде наиболее целесообразно комплексным критерием – плотностью поглощённой энергии при ударном воздействии частиц. В свою очередь плотность поглощённой энергии зависит от величин механических потерь, кинетической энергии частиц и деформированного объёма эластомера.

Уровень плотности поглощённой энергии резины составляет около 0,02 % плотности поглощённой энергии стальной.

1. Пенкин Н.С., Копченков В.Г., Сербин В.М. Гуммированные детали машин. — М.: Машиностроение. — 2013
2. Бартев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. — Л.: Химия. — 1972
3. Slikkerveer P.J., Dongen V., and Touwslager F.J. Erosion of Elastomeric Protective Coatings // Wear. — 1999 (236), nos. 189–198
4. Колесников Ю.В., Морозов Е.Н. Механика контактного разрушения. — М.: Изд. ЛКИ. — 2007

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ 1-(2-(ДИМЕТИЛАМИНО)ЭТИЛ)-1H-ТЕТРАЗОЛ-5-ТИОЛА В КАЧЕСТВЕ СТАБИЛИЗАТОРА ЗОЛЕЙ СЕРЕБРА

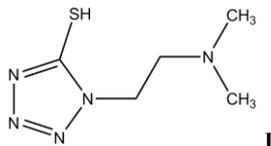
Е.П. Кот¹, М.Н. Ничик^{1,2}, Вит.Э. Матулис¹, С.В. Войтехович²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

²Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; nichick@bsu.by

Проводимые в последние годы исследования показали, что производные меркаптотетразола за счёт своих отличных координационных способностей могут выступать в качестве стабилизаторов частиц металлов нанометрового диапазона [1].

Цель. Получение золей серебра, стабилизированных коммерчески доступным аминопроизводным 5-меркаптотетразола, а именно 1-(2-(диметиламино)этил)-1H-тетразол-5-тиолом (**I**) в качестве лиганда.



Материалы и методы. Синтез золей серебра осуществлён в соответствии с методикой [1] или в результате цитратного восстановления с последующей заменой стабилизатора [2]. В качестве прекурсора наночастиц серебра применяли сульфат серебра. Цитрат натрия, борогидрид натрия, производное тетразола были аналитической степени чистоты. Полученные золи охарактеризованы методами электронной микроскопии, оптической и ИК-Фурье спектроскопии, проведены квантово-химические расчёты электронного строения лиганда **I** и геометрической структуры возможных адсорбционных комплексов лиганда **I** с Ag^+ и Ag_3^+ .

Результаты и их обсуждение. Установлено, что в результате прямого синтеза [1] золей серебра в присутствии лиганда **I** формируются золи, теряющие агрегативную устойчивость в течение 1 часа. В спектрах поглощения виден мало интенсивный максимум при 370 нм. Формирующийся осадок светлого цвета, однако не позволяет однозначно идентифицировать формирование комплексных тетразолатов серебра. В результате синтеза наночастиц серебра в ходе цитратного восстановления, формируются частицы, размер которых составляет 4–7 нм с максимумом в спектрах поглощения при 390 нм. Замена цитрата на лиганд **I**, ведёт к формированию гелеобразного осадка жёлто-оранжевого цвета, который легко отделяется от раствора, а после диализа вновь становится золем серебра с максимумом поглощения при 395 нм. Размер частиц, образовавшихся после диализа, мало отличается от стабилизированных цитратом, однако

формируется небольшое количество частиц, размер которых составляет ок. 11 нм. На основании результатов ИК-Фурье спектроскопии установлено, что в области 2580 нм, характерной для меркаптогруппы, в случае наночастиц серебра, стабилизированных лигандом **I**, характеристические значения исчезают.

Для установления возможной координации меркаптотетразола по отношению к частице серебра проведены квантово-химические расчёты в рамках теории DFT методом B3LYP/6-31G(d) [3]. Установлено, что наиболее отрицательные области электростатического потенциала располагаются возле атомов серы S(6) и атомов азота N(3) и N(4) тетразольного цикла. Таким образом координация будет наиболее выгодной. Величина потенциала в области атома азота аминогруппы также имеет отрицательное значение, значит и такой способ координации может приводить к формированию устойчивых структур. Оптимизация геометрических параметров возможных адсорбционных комплексов лиганда **I** с Ag^+ и Ag_3^+ подтвердила данные выводы. Так, в случае иона Ag^+ координация тетразолат-иона через атом S(6) и атом N(4) тетразольного цикла оказалась наиболее выгодной. В случае кластера Ag_3^+ значительно меньшей энергией обладают структуры, когда тетразолат-ион координируется через атом серы S(6) и атом азота аминогруппы что, вероятно, справедливо для кластеров с большим числом атомов и наночастиц.

Различный способ координации лиганда **I** по отношению к Ag^+ и Ag_3^+ вероятно способствует формированию неустойчивых золей в ходе прямого синтеза частиц серебра.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 2.1.01.01 ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» (№ г.р. 20210515).

1. Voitekhovich S.V., Wolf A., Guhrenz C., Lyakhov A.S., Ivashkevich L.S., Adam M., Gaponik N., Kaskel S., Eychmüller A. // Chem. Eur. J. — 2016 (22), 14746—14752
2. Guhrenz C., Wolf A., Adam M., Sonntag L., Voitekhovich S.V., Kaskel S., Gaponik N., Eychmüller A. Tetrazole-Stabilized Gold Nanoparticles for Catalytic Applications // Z. Phys. Chem. — 2017 (231), no. 1, 51—62
3. Becke A. D. Density-Functional Thermochemistry. III. The Role of Exact Exchange // J. Chem. Phys. — 1993 (98), 5648—5652

ОЦЕНКА РЕСУРСА БИТУМНЫХ ПОКРЫТИЙ ГАЗОПРОВОДОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

А.П. Крень¹, Т.А. Протасеня¹, М.Н. Делендик²

¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;
7623300@gmail.com

²Филиал БНТУ «МИПК и ПК», Минск, Беларусь

В настоящее время защита трубопроводов от электрохимической коррозии осуществляется путём нанесения изоляционных покрытий, либо управлением катодного тока при оптимальном значении переходного электрического сопротивления R . Значительную долю защитных покрытий по-прежнему занимают битумные покрытия. Для оценки их качества используется дорогостоящее оборудование, которое не может применяться непосредственно на объекте контроля. Поэтому развитие оперативных методов контроля защитных покрытий трубопроводов, таких как индентирование, является актуальной задачей.

Целью работы оценка возможности использования индентирования для прогноза остаточного ресурса битумно-мастичной изоляции.

Оборудование и материалы. Для измерения переходного электросопротивления R , как основного диагностического параметра, применялась схема «мокрого контакта» (рис. 1).

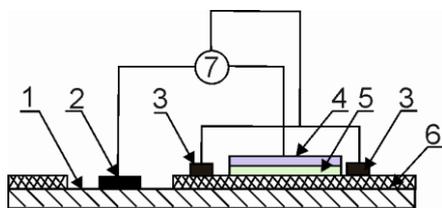


Рис. 1. Схема измерения переходного электросопротивления. 1 – стенка трубы; 2 – контакт с трубой; 3 – экранирующие кольцевые электроды-бандажи; 4 – кольцевой электрод-бандаж; 5 – тканевое полотенце; 6 – изоляционное покрытие трубы; 7 – тераомметр или мегомметр

Для измерения механических характеристик покрытий использовался метод динамического индентирования. Эксперименты проводились с помощью разработанного в ИПФ НАН Беларуси прибора ТПЦ-7 Smart с индентором диаметром $D = 2,2$ мм, массой $m = 7$ г и предударной скоростью $V_0 = 1,2$ м/с.

Основную информацию о свойствах материала несёт регистрируемая прибором диаграмма ударного нагружения. В качестве модели, описывающей отклик материала, была принята модель Максвелла, адаптация которой для случая индентирования позволила получить выражение для расчёта коэффициента жёсткости C_M битумного покрытия по данным ударного взаимодействия:

$$C_M = mw^2 \left(1 + \frac{\ln \left(\frac{V_0}{V_e} \right)^2}{4\pi^2} \right), \quad (1)$$

где $w = \frac{\pi}{t_{imp}}$, t_{imp} – время удара; V_0 и V_e – скорость подлёта и отлёта индентора.

В качестве исследуемых объектов использовались вырезки труб из различных газопроводов, покрытых изоляцией марки БНИ-IV и построенных в разное время.

Результаты испытаний. Эксперименты по определению R показали, что в зависимости от времени эксплуатации оно имеет тенденцию к уменьшению, однако прогнозировать изменение R только исходя из срока службы газопровода невозможно. Проведенные исследования позволили построить график, связывающий величины R и C_M (рис. 2).



Рис. 2. Связь переходного электросопротивления и жесткости покрытия

Область 1 характеризует покрытие способное выполнять свои функции. В области 3 покрытие является непригодным ($R < 1000$ Ом·м², $C_M > 1,3$ МН/м). Зона 4 также соответствует вышедшим из строя покрытиям ($R < 500$, $C_M < 1,3$ МН/м), что объясняется высокой пористостью. Зоной неопределённости является область 2. Тем не менее, можно однозначно утверждать, что при $C_M > 1,3$ вероятность того, что сопротивление изоляции достигло своего критического значения составляет практически 100 %. В этом случае нет необходимости проводить измерения R . Для области 1 и 2 где покрытия могут быть пригодными к дальнейшей эксплуатации существует необходимость в прогнозировании остаточного ресурса.

Выводы: проведенные исследования подтвердили возможность использования метода динамического индентирования для прогнозирования ресурса работоспособности битумно-мастичной изоляции.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ УПРАВЛЯЮЩИЙ КОНТРОЛЛЕР РОБОТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

М.А. Ксенофонов, С.В. Выдумчик, О.О. Гавриленко, С.Л. Горохов,
А.С. Калашников, Т.Г. Павлюкевич

«Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, lab_dozator@mail.ru

Применение современных реакционноспособных полимерных составов для производства новых композиционных и гибридных материалов и изделий на их основе требуют точного соблюдения технологических режимов. Выбор определённого контроллера обусловлен тем, что все управляемые им устройства должны быть синхронизированы, нарушение которых приведёт к резкому ухудшению качества изделия, либо к поломке оборудования.

В данной работе представлен разработанный нами программируемый логический контроллер (рис. 1) на базе микропроцессора STM32F103, который обеспечивает управление оборудованием на каждом этапе технологического процесса, обрабатывает входные данные и генерирует соответствующие выходные сигналы.

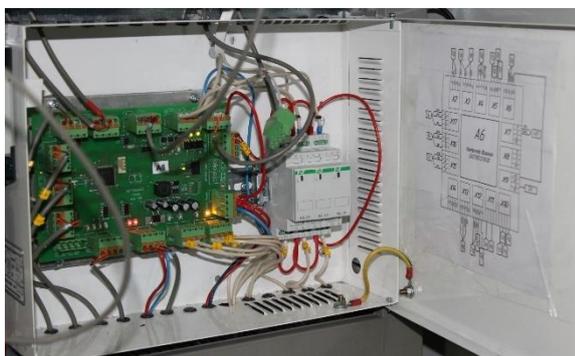


Рис. 1. Программируемый логический контроллер

Контроллер состоит из 2 каналов RS-485 со скоростью обмена до 2 Мбит/с с оптической развязкой. Первый используется для загрузки исполняемых программ в оперативную память контроллера, второй для управления исполнительными устройствами частотных преобразователей с возможностью подключения дополнительного (выносного) пульта управления.

Кроме этого, контроллер имеет 5 каналов импульсных выходов, которые могут управлять драйверами шаговых двигателей или сервоприводов (сигналы STEP-DIR-ENABLE). Максимальная частота сигнала STEP – 15 кГц по 5 осям одновременно. Максимальная частота управления по одному каналу – 78 кГц.

В контроллере предусмотрен протокол обмена

сигналами с компьютером, который представляет собой передачу сжатых TAP файлов в формате TP3. Контроллер обеспечивает две версии протокола. Первая версия передаёт в контроллер сжатый текст TAP файла (G коды). Во второй версии все движения по координатам обчитываются на персональном компьютере, а в контроллер передаётся только частота и количество импульсов для таймера, управляющего конкретной осью. Периодичность формирования таких шагов определяется точностью, с которой сформирован исходный файл обрабатываемой модели. Максимальная скорость – 100 шагов в секунду, то есть минимальное время одного шага – 0,01 с.

Обмен данными с персональным компьютером двухсторонний. Компьютер в данной связке работает в режиме мастер. Стандартный ответ контроллера содержит данные о состоянии индуктивных датчиков и внешнего оборудования. Текст исходной программы контроллера написан на Си в среде Keil uVision. В текущей версии дистанционная перепрошивка устройства не предусмотрена.

Использование программируемого логического контроллера в роботизированном оборудовании позволяет избежать возможных нарушений технологий изготовления изделий из полимерных композитов.

В задачу данного устройства входит сбор и частичный анализ состояния всех узлов автоматизированной системы, что может включать большое количество параметров. В итоге выполняется мониторинг, классификация параметров и принятие решений о продолжении работы, либо аварийной остановке, либо просто о привлечении внимания оператора при завершении рабочего цикла. Одновременно с этим вырабатываются сигналы, которые подлежат регистрации, такие как текущее положение координат робота, температуры компонентов, давления в магистралях и т.д. Анализ состояния периодически поступает на компьютер и становится доступным для записи или отображения на экране компьютера.

Автоматизированное оборудование, оснащённое программируемым логическим контроллером, отличается многофункциональностью, экономичностью, экологичностью, безопасностью, удобством эксплуатации и применяется практически во всех отраслях промышленности для выполнения производственно-технологических операций.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОЙ СМАЗОЧНОЙ СРЕДЫ ПРИ ТРЕНИИ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ

Л.И. Куксенова¹, В.И. Савенко²

¹Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; lkuc@mail.ru

²Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

Процесс контактного взаимодействия в нагруженных сопряжениях является многофакторным. Наиболее развито описание механики контактного взаимодействия. Однако многие важные для практики контактные задачи решаются, как правило, без учета влияния смазочной среды, в которой осуществляется процесс контактирования [1]. При этом опыт эксплуатации трибосопряжений показывает, что в решении многоплановой проблемы их работоспособности смазочному материалу принадлежит особая роль.

Известно, что тяжело нагруженные узлы трения при смазывании жидкими или пластичными смазочными материалами чаще всего работают в режиме граничной смазки. При этом наибольший положительный триботехнический эффект имеет место при наличии в таких смазках поверхностно-активных веществ (ПАВ). Активные компоненты смазочного материала в процессе контактной деформации вызывают адсорбционное пластифицирование тончайшего поверхностного слоя (эффект Ребиндера) [2].

Вместе с тем известно, что поверхностно-активная среда может оказывать на реологическое поведение материала не только пластифицирующее, но и упрочняющее влияние [3], что обусловлено уменьшением подвижности приповерхностных дислокаций в результате их адсорбционной блокировки. В реальных трибосопряжениях в качестве присадок к смазочным материалам используют активные вещества, которые в зависимости от величины и типа механических напряжений, скорости деформации и температуры испытаний могут оказывать как поверхностно-пластифицирующее, так и поверхностно-упрочняющее действие.

Работа посвящена обобщению результатов экспериментальных и теоретических исследований влияния среды на изменение структуры и свойств металлических материалов при разных условиях нагружения с целью разработки методологических основ материаловедческой оценки влияния компонентов смазочного материала на структурно-механическое состояние деформированного слоя металла при трении.

Материалы и методики исследования. Исследовали пару трения медный сплав – сталь. В качестве антифрикционного сплава использовали медь, сплавы на основе Cu-Zn, Cu-Al, Cu-Sn. Применяли жидкие и пластичные смазочные материалы,

содержащие ПАВ. Триботехнические испытания проводили в условиях реверсивного трения скольжения при давлении 5-40 МПа.

Результаты и их обсуждение. На основе представлений физико-химической механики контактного взаимодействия проведён материаловедческий анализ трибологической эффективности смазочных композиций, содержащих ПАВ. Влияние среды выявляли с использованием критериальных подходов, основанных на совокупности макроскопических интегральных критериев (феноменологических показателей трения и износа) и микроструктурных критериев (физического уширения рентгеновских линий, периода кристаллической решетки, элементного состава поверхностного слоя материала зоны контактной деформации). Представлены изменения структурно-механического состояния поверхностных слоев медных сплавов при их трении по стали в поверхностно-активных смазочных средах. Сформулированы представления о роли среды в создании пластифицирующего и упрочняющего трибозффекта. Установлено, что минимальные потери на трение и износ достигаются при создании однофазной структуры α -твёрдого раствора в приповерхностных слоях медных сплавов и при наличии соответствующего концентрационного интервала растворимости легирующего элемента в твёрдом состоянии. Показано, что такие граничные условия обеспечиваются наличием в зоне контактной деформации поликомпонентного трибоматериала стационарных макроскопических диффузионных потоков легирующих элементов. Выявлена роль локальных диффузионных явлений в квазиспинодальных фазовых переходах в процессе трибодформации сплавов. Приведены примеры реализации в парах трения явления избирательного переноса. Даны рекомендации по его применению в узлах трения машин и приборов.

1. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. — М.: Машиностроение. — 1988
2. Шукин Е.Д., Амелина Е.А., Качанова Л.А., Савенко В.И. Физико-химическая механика контактного взаимодействия // Трение и износ. — 1980, № 2, 247—262
3. Shchukin E.D., Kochanov L.A., Savenko V.I. On mechanism of environment-induced plasticizing under contact interaction // Advances in mechanics and physics of surfaces. Eds. R.M. Latanision, R.J. Courtel. London: Harwood academic publishers. — 1981 (1), 111—152

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВЫДЕРЖКИ В ХОДЕ СИНТЕЗА НА СВОЙСТВА ПОЛИЭФИРКЕТОНКЕТОНА

А.П. Куликов, О.П. Папета, А.Н. Салиев, В.Г. Миронов

Тулский государственный университет, Тула, Россия; andrew.molotovich@gmail.com

Полиэфиркетонкетон (ПЭКК) представляет собой полукристаллический термопластик из семейства полиарифиркетонов. Он обладает термостабильностью, химической стойкостью и способностью выдерживать высокие механические нагрузки, что позволяет применять его в аэрокосмической области, нефтегазовой промышленности и медицине.

Благодаря структуре ПЭКК открывается возможность контролировать его жёсткость и гибкость цепи, что открывает широкие возможности в применении данного термопласта. [1]

Актуальность. Основными проблемами при получении ПЭКК являются малая молекулярная масса полимера и побочные реакции, которые приводят к структурным дефектам, сшивке и затрудняют переработку полимера.

В работах [2, 3] проводили исследование влияния температуры синтеза на физико-химические свойства ПЭКК. Результаты показали, что с повышением температуры синтеза, увеличивается вязкость раствора полимера в серной кислоте и ухудшается его перерабатываемость. Этот факт связывается с протеканием при повышенной температуре побочных реакций в ходе полимеризации.

Соответственно, целью нашей работы являлось определение условий синтеза, обеспечивающих получение оптимальной вязкости раствора ПЭКК и его улучшенную перерабатываемость.

Материалы и методы. В стеклянный реактор объёмом 500 см³, оснащённый верхнеприводной мешалкой и трубкой для подачи инертного газа, загружали дифениловый эфир, терефталоилхлорид, изофталоилхлорид в мольном соотношении 0,1:0,06:0,04. В качестве растворителя использовали дихлорэтан. После загрузки мономеров и растворителя при температуре –20 °С порциями добавляли катализатор AlCl₃. Соотношение AlCl₃ к галогенидной группе составило 1,5. Далее температуру поднимали в зависимости от варианта синтеза: от –20 до 25 °С (2 вариант синтеза), и от –20 до 50 °С (3 вариант синтеза), и вели синтез в течение 6 часов (табл. 1). По окончании синтеза полученные полимеры выгружали из реактора и промывали диметилацетамидом, изопропанолом, водой для удаления остатков катализатора и

растворителя, после чего полимеры сушили под вакуумом 6 часов при температуре 120 °С.

Таблица 1. Температурные параметры синтеза полимеров

Вариант синтеза	Температура загрузки, °С	Время, ч	Температура синтеза, °С	Время, ч.
1	-	-	25	6
2	-20	1	25	5
3	-20	1	50	5

Результаты и их обсуждение. Установлено, что при вариантах синтеза 1 и 3 полученный полимер имеет приведенную вязкость 1,03 и 0,62 дл/г (табл. 2). При этом 2-й нагрев полимера, полученного по вариантам 1, 3 полимера не приводит к образованию пика плавления, что свидетельствует о сшивке полимера. Напротив, для варианта 2 выдержка при низкой температуре (–20 °С) с последующим выходом на температуру синтеза 25 °С оказывает положительное влияние на структуру и свойства ПЭКК. Даже при повторном нагреве вариант 3 имеет пик плавления, а его приведённая вязкость составляет 0,50 дл/г, что позволяет использовать полученный полимер для изготовления лент и волокон (табл. 2).

Таблица 2. Свойства полимеров

Вариант синтеза	Приведённая вязкость, дл/г	Температура перехода в вязкотекучее состояние, °С	
		1-ый нагрев	2-ой нагрев
1	1,03	320	–
2	0,50	338	330
3	0,62	313	–

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FEWG-2024-0002.

1. Quiroga Cortés L. et al. Morphology and dynamical mechanical properties of poly ether ketone ketone (PEKK) with meta phenyl links // Journal of Applied Polymer Science. — 2016 (133), no. 19, 43396
2. Sakaguchi Y., Tokai M., and Kato Y. Synthesis of poly (ether ketone) by Friedel—Crafts acylation: effects of reaction conditions // Polymer. — 1993 (34), no. 7, 1512—1515
3. Zolotukhin M. G. et al. Aromatic polymers obtained by precipitation polycondensation: 4. Synthesis of poly (ether ketone ketone)'s // Polymer. — 1997 (38), no. 6, 1471—1476

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ОСАЖДЕНИИ

А.Н. Купо¹, Н.Н. Федосенко¹, В.А. Емельянов²

¹Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь; kupo@gsu.by

²ОАО «Интеграл», Минск, Беларусь

Введение. Активация процесса электрохимического формирования металлических покрытий лазерным излучением позволяет, наряду с увеличением скорости осаждения металлов, улучшить функциональные свойства покрытий, позволяет добиться экономии материалов [1].

Основными факторами ускорения процесса осаждения является термическая активация всех составляющих его элементарных актов. Поэтому целью работы является исследование динамики температуры в зоне термического влияния, выяснение пространственно-временного распределения температуры в его окрестности.

Материалы и механизмы лазерного воздействия. Процесс нагрева металлической мишени излучением определяется следующими основными параметрами: во-первых, теплофизическими свойствами мишени и её геометрией, во-вторых, оптическими свойствами металла и электролита и, наконец, режимом облучения.

Нами проанализирован механизм взаимодействия лазерного излучения инфракрасного диапазона с металлами в процессе лазерного электрохимического осаждения олова и серебра на медные подложки. В работе использовалось лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, плотностью мощности $W \sim 10^6$ Вт/см². Лазерный источник работал в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов $f = 5$ Гц и длительностью импульса $\tau_p = 4 \cdot 10^{-3}$ с.

Показано, что толщина скин-слоя δ для рассматриваемых металлов составляет величину порядка 10^{-8} м. Расстояние l , на которое за время действия лазерного импульса распространяется тепловое поле составляет для меди, серебра и олова следующие величины: (Cu) $\approx 1,3 \cdot 10^{-3}$ м; (Ag) $\approx 1,4 \cdot 10^{-3}$ м; (Sn) $\approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Поскольку, $\delta \ll l$, то это означает, что лазерное излучение, поглощённое металлом, создаёт в нем поверхностный тепловой источник

Результаты моделирования.

При анализе лазерного электрохимического осаждения металлов важным фактором, влияющим на кинетику физико-химических процессов, является теплообмен с электролитом. Поэтому при исследовании механизма лазерного электрохимического осаждения металлов на основе изучения тепловых полей актуальным является анализ влияния конвективного

теплообмена на характер температурного поля на поверхности катода.

Нами проведен анализ температурного поля на поверхности медной подложки для гауссового распределения энергии в лазерном луче. При этом использовалось значение коэффициента конвективного теплообмена $\eta = 10^{-1}$ Вт/см²·град. Распределение температуры за пределами лазерного пятна описывается формулой:

$$T(r,t) = \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot A \cdot \exp(-\chi \cdot k_c^2 \cdot t) \cdot E_0 \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{4 \cdot \chi \cdot t}\right)}{4 \cdot \pi \cdot k_i \cdot h \cdot t} \right] \times \frac{1}{R_s^{-2} + (4 \cdot \chi \cdot t)^{-1}} \cdot \exp\left(\frac{\left(\frac{r^2}{16 \cdot \chi^2 \cdot t^2}\right)^{-1}}{R_s^{-2} + (4 \cdot \chi \cdot t)^{-1}}\right) \quad (1)$$

На рисунке представлено временное распределение температуры в пределах длительности лазерного импульса на расстоянии $r = 0,07$ см.

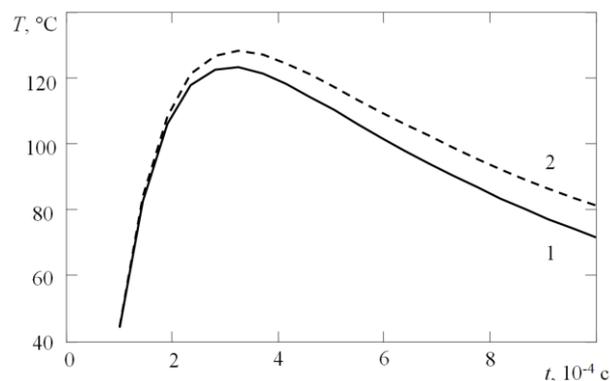


Рис. 1. Температурное поле на поверхности пластины для гауссова распределения энергии в лазерном пятне: 1 – с учётом конвективных потерь, 2 – без учёта конвективных потерь

Как видно из рисунка, наличие конвективного теплообмена существенно снижает температуру в окрестности зоны термического воздействия, причём влияние этого фактора возрастает с течением времени.

1. Kupo A.N. Formation of local metallization systems by laser activation of electrochemical processes in submicron electronics technologies // International Scientific and Practical Online Journal «The Vertices of Science». — 2024, no. 1 (1), 170—175

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

А.Н. Лесун

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь; lesun_an@grsu.by

Особое место в материаловедении машиностроительных нанокompозитов занимают фторкомпозиты, предназначенные для изготовления элементов трибосистем, статических и подвижных герметизирующих узлов, эксплуатируемых в экстремальных условиях – при отсутствии смазки, воздействия агрессивных сред, в вакууме, в диапазоне температур 123–523 К., реверсивном характере движения. Несмотря на исследования научных школ Охлопковой А.А., Виноградова А.С., Машкова Ю.К., Пугачёва А.К. и др. до последнего времени не удавалось устранить структурный парадокс при формировании изделий из фторкомпозитов по сложившейся технологической парадигме, состоящий в снижении параметров основных прочностных характеристик при введении высокопрочных наполнителей [1]. Негативным следствием действующей технологической парадигмы является невозможность реализации упрочняющего механизма действия высокопрочных наполнителей (частиц УДА, ТРГ, УВ, нанокерамик и др.) при введении их в состав матрицы ПТФЭ в количествах, превышающих порог структурного модифицирования (0,5–1,0 мас. %). Вследствие действия совокупных факторов с увеличением содержания наполнителя любого типа происходит падение параметров деформационно-прочностных характеристик композита, а при повышении содержания более 20 мас. % формируется дефектная структура, не позволяющая использовать высоконаполненные фторкомпозиты в узлах трения и конструкциях с повышенными эксплуатационными требованиями.

С использованием гипотезы о возможности проявления эффективного модифицирующего действия частицей, обладающей наноразмером хотя бы в одном направлении, и на базе принципа энергетического и технологического соответствия был разработан ряд технологических приёмов, обеспечивающих формирование активных центров межфазного взаимодействия на стадиях подготовки компонентов, формирования изделий (заготовок) и калибрования (рисунки).

Системный подход к анализу особенностей модифицирующего действия наноразмерных объектов различного состава, строения и технологии получения обусловил разработку научных принципов создания функциональных машиностроительных нанокompозиционных материалов на основе промышленно выпускаемых фторопластов и технологий их

переработки в изделия с повышенными параметрами эксплуатационных характеристик [2].

Разработаны составы высоконаполненных фторкомпозитов, содержащих 25–35 мас. % углеродного наполнителя с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик вследствие механохимического взаимодействия на границе раздела «матрица-наполнитель» при реализации технологических факторов формирования изделий в специальной оправке [3]. Результаты апробирования разработанных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена свидетельствуют о целесообразности их практического использования для изготовления триботехнических и герметизирующих изделий, используемых в машиностроении, энергетике, химической промышленности и специального оборудования, применяемого в горнодобывающей промышленности.



Рис. Технологические методы получения высокопрочных износостойких фторкомпозитов с повышенным содержанием углеродного наполнителя (УВ)

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021-2025 годы (задание 8.4.1.51).

1. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И., Калистратова Л.Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. — М.: Машиностроение. — 2005
2. Авдейчик С.В., Воропаев В.В., Скаскевич А.А., Струк В.А. Машиностроительные фторкомпозиты: структура, технология, применение. — Гродно: ГрГУ. — 2012
3. Антонов А.С., Струк В.А., Авдейчик С.В., Лесун А.Н., Ключко П.В., Нахват Д.В. Состав триботехнического материала: пат. ВУ 24248. — Оpubл. 05.04.2024

НАБУХАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГИДРОГЕЛЕЙ И МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КООРДИНАЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ

К.С. Ливонович, З.С. Ливонович, Т.Г. Шутова

Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;
kslivonovich@ichnm.by

Введение. Биосовместимые композиционные материалы активно разрабатываются с целью получения имплантируемых устройств и лекарственных форм с пролонгированным релизом субстанции. Одним из перспективных подходов является получение композиционных материалов на основе биосовместимых гидрогелей и металл-органических координационных полимеров (МОКП) с последующим формированием массива микроигл [1]. Интерес представляют свойства композитов при контакте с физиологическими средами.

Целью работы являлось изучение процессов набухания композиционных материалов на основе МОКП и гидрогелей полиэлектролитов.

Материалы и методы. МОКП на основе циркония и тримезиновой кислоты (MOF-808) получен в соответствии с методикой [2]. Карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ, 250 кДа, Sigma) и хитозан (ХД1250, 1250 кДа, Glenham Science) массами по 100 мг смешивали с MOF-808 для получения заданной массовой доли МОКП ($\omega_{\text{MOF-808}}$). К сухой смеси добавляли 4 мл 0,125 М молочной кислоты, тщательно перемешивали и оставляли на ночь при комнатной температуре. Полученный гель выдерживали в 1 % растворе CaCl_2 30 мин, промывали водой и сушили при 40 °С.

Структуру композитов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, 15 кВ, JEOL, Япония). Набухание композитов исследовали в воде и изотоническом растворе NaCl (0,9 %). Навеску массой 50 мг погружали в соответствующий растворитель объёмом 20 мл и выдерживали в течение 4 ч при комнатной температуре (20 ± 1 °С). Каждый час образец взвешивали и определяли степень набухания (α).

Результаты и их обсуждение. Установлено, что частицы МОКП равномерно распределены в матрице из полиэлектролитного комплекса (рис. 1). Элементный анализ показывает последовательное увеличение доли циркония в композитах с увеличением массы MOF-808.

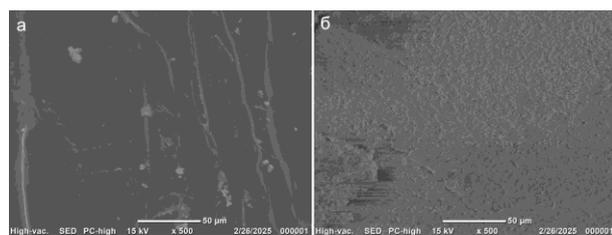


Рис. 1. СЭМ изображения образцов гидрогеля ХД1250/КМЦ (а) и его композита с MOF-808 с массовой долей МОКП 33 % (б)

Значение α последовательно уменьшается по мере увеличения $\omega_{\text{MOF-808}}$ в композите как в воде, так и растворе NaCl. В воде при $\omega_{\text{MOF-808}}$ 33 % и более α достигает равновесного значения в течение 1 ч (рис. 2, а).

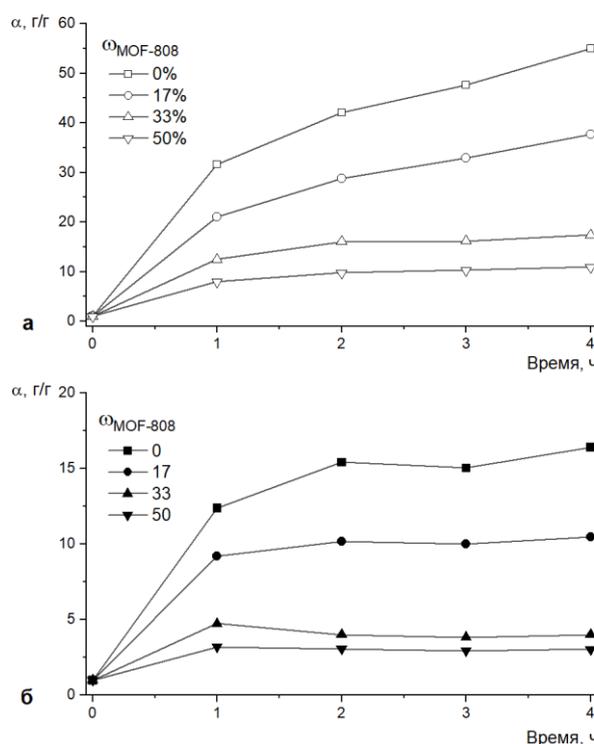


Рис. 2. Кинетика набухания (а) образцов композитов с различными $\omega_{\text{MOF-808}}$ при выдерживании в воде (а) и 0,2 М NaCl (б)

Набухание композитов в растворе NaCl уменьшается в 3–4 раза по сравнению с водой при аналогичных значениях $\omega_{\text{MOF-808}}$. При этом значение α достигает равновесного значения в течение 1 ч вне зависимости от $\omega_{\text{MOF-808}}$ (рис. 2, б). При массовой доле МОКП в композите более 33 % α в NaCl через 1 ч достигает предельной величины в $4,5 \pm 0,5$ г/г.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта X23РНФМ-048).

1. Yang X.-X. [et al.] Composition-Engineered Metal–Organic Framework-Based Microneedles for Glucose-Mediated Transdermal Insulin Delivery // ACS Appl. Mater. Inter. — 2020 (12), 13613–13621
2. Aunan E. [et al.] Modulation of the Thermochemical Stability and Adsorptive Properties of MOF-808 by the Selection of Non-structural Ligands // Chem. Mater. — 2021 (33), 1471–1476

ПОЛУЧЕНИЕ ТРИАМИДОТРИСУЛЬФОИМИДА
САХАРИН-5-КАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ

Ф.М. Мамедалиева, Э.Т. Асланова, Б.А. Мамедов

Министерство науки и образования, Институт полимерных материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; fereh.m@rambler.ru

Введение. В последние годы в области химии высокомолекулярных соединений особое внимание уделяется разработке методов синтеза высокотермостойких полимеров.

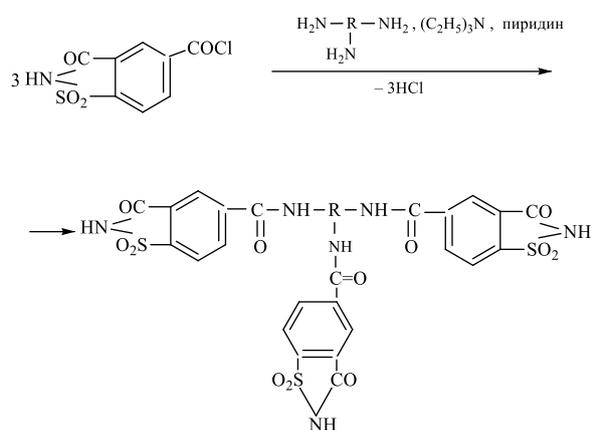
Многочисленные сообщения по синтезу и применению термостойких полимеров обобщены в монографиях [1, 2], где приводятся результаты синтеза, химических превращений, установление структуры и физические свойства полиимидов и других имидсодержащих полимеров.

Полимеры, содержащие сульфамидные группы, являются плёнко- и волокнообразующими материалами и имеют некоторые преимущества по сравнению с обычными полимерами. Они обладают лучшей окрашиваемостью, большой устойчивостью к радиации, свету и устойчивы по отношению к кислотному и щелочному гидролизу.

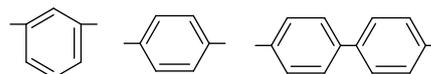
Исходя из вышеизложенного и цели работы, необходимо было разработать эффективные методы синтеза новых мономеров на базе сахарин-карбонновых кислот для получения полимеров и олигомеров с сульфамидными звеньями в основной цепи.

Экспериментальная часть. В трёхгорлую круглодонную колбу, снабжённую механической мешалкой и трубкой для отвода азота, помещали 30 мл ДМАА и 1.85 г (0.01 моль) триамина. Далее в атмосфере инертного газа в реакционную колбу добавляли 5 г (0.02 моль) хлорангидрида. Для нейтрализации HCl в колбу добавляли (C₂H₅)₃N или пиридин. Температуру поддерживали постоянной при 45–50 °С. После прибавления хлорангидрида перемешивали реакционную массу ещё 30 мин. В ходе реакции образовалось вещество тёмного цвета. После завершения процесса в реакционную массу добавляли 150 мл дистиллированной воды и фильтровали на фильтре Шотта. Выделенный продукт высушивали при комнатной температуре и доводили до постоянной массы в вакуумном шкафу. Выход 84 %.

Для получения высокотермостабильных гетероциклоцепных полимеров, а также создания на их основе новых композиционных материалов синтезирован триамидотрисульфоиимид на основе хлорангидрида сахарин-5-карбонновой кислоты, полученного по методике [3], с алифатическими и ароматическими триаминами по следующей схеме:



где R = (CH₂)₂, (CH₂)₄, (CH₂)₆.



Состав и структура этих соединений подтверждены данными элементного анализа и ИК-спектроскопии. В ИК-спектрах триамидотрисульфоиимида сахарин-5-карбонновых кислот полосы поглощения в области 1638 см⁻¹ относятся к группам C-N; полосы поглощения 1389 и 1276–1175 см⁻¹ характерны для асимметрического валентного колебания группы –SO₂– сахаринового цикла; а 3266 см⁻¹ относятся к N-H группе.

Результаты и их обсуждение. Полученный триамидотрисульфоиимид сахарин-5-карбонновой кислоты представляет собой кристаллическое и игольчатое вещество жёлто-коричневого цвета, которое растворяется в апротонных растворителях – диметилформамиде (ДМФА), диметилацетамиде (ДМАА), диметилсульфоксиде (ДМСО), N-метилпирролидоне, а также в диоксане и м-крезоле. Выявлено, что триамидотрисульфоиимид сахарин-5-карбонновой кислоты может быть использован в качестве мономера для получения растворимых и термостойких полиамидосульфимидов.

- Chan W.H., Lam-Leung S.Y., Ng C.F., Ding J., and Xi S. Synthesis and characterization of random poly(amide-sulfonamide)s: 3. Copolymers from two diamino monomers // *Polymer*. — 1995 (36), 4503–4508
- Михайлин Ю.А. Термостойчивые полимеры и полимерные материалы. — СПб.: Профессия. — 2006.
- Асланов Т.А., Асланова Э.Т., Мамедалиева Ф.М., Ищенко Н.Я. // *Азерб. Хим. Журнал*. — 2015, № 3, 54–58

ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩИЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИЕ ТЕРМОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

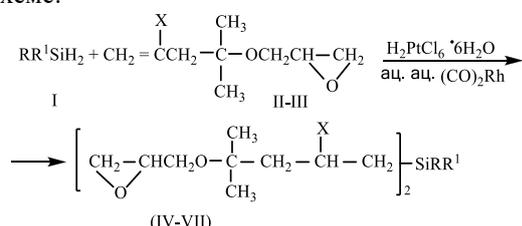
А.Ф. Мамедова, О.В. Аскеров, Е.А. Ибадов, Г.Дж. Ханбабаева, Н.Т. Ширалиева

Министерство науки и образования, Институт Полимерных Материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; ipoma@science.az

Введение. Развитие химической промышленности и применение термостойких материалов в сельском хозяйстве, технике, промышленности, медицине увеличивает спрос на термостойкие материалы, тем самым перед исследователями ставит задачу получения термостойких материалов, сохраняющих при эксплуатации термо-, тепло-, влаго- и бензостойкость.

Цель. Исследование методов синтеза кремнийорганических диоксиранов. На их основе можно получить композиционные материалы, отличающиеся тепло- и термостойкостью.

Материалы и методы. Синтез галогенсодержащих кремнийорганических диоксиранов осуществлён путём присоединения алкил(арил)гидридсиланов к галогенсодержащим непредельным оксиранам в присутствии платинохлористоводородной кислоты или ацетилацетоната дикарбонила родия. Реакция протекает по С=C - связи по правилу Фармера, при этом оксирановое кольцо остается незатронутым по схеме:



X=Cl, R=R¹=C₆H₅ (IV); X=Cl, R=C₂H₅, R¹=C₆H₅ (V); X=Br, R=R¹=C₆H₅ (VI)

X=Br, R=C₂H₅, R¹=C₆H₅ (VII)

Строение синтезированных соединений (III-VI) подтверждено данными современных физико-химических методов анализа. В ИК спектрах обнаружены полосы поглощения, характерные для Si-C-алк. (1250 см⁻¹), C-Cl (787 см⁻¹), C-Br (680 см⁻¹), эпоксидной группы (895, 914, 3060 см⁻¹).

Экспериментальная часть. В ампулы вытесненным воздухом помещают 18.4 г (0.1 моль) дифенилгидридсилана, 12.0 г (0.1 моль) свежеперегнанного 1-глицидилокси-1,1-диметил3-хлорбут-3-ена и 0.1 г платинохлористоводородной кислоты или ацетилацетоната дикарбонила родия. Затем ампулу запаивают в токе азота и помещают в масляный термостат, где поддерживают температуру 115–120 °С в течение 22 часов. Затем ампулу вскрывают в бензоле и отфильтровывают от механических примесей. После отгонки растворителя остаток подвергают вакуумной перегонке при температуре 120 °С (остаточное

давление 0.5 мм рт. ст.). Полученный диоксираносилан (IV) представляет собой прозрачную вязкую массу светло-коричневого цвета. Выход количественный.

Найдено, %: С 60.34, Н 8.13, Cl 13.73, Si 5.44. C₂₆H₄₂Cl₂SiO₄. Вычислено, %: С 60.35, Н 8.10, Cl 13.70, Si 6.00.

Аналогично получены соединения (V-VII) с молекулярной массой 566(V), 607(VI), 651 (VII).

Результаты и обсуждение. Синтезированные диоксираны (IV-VII) использованы для определения антимикробной активности диоксиранов (IV-VII). Изучена антимикробная активность синтезированных диоксиранов (IV-VII) методом серийных разведений в жидкой питательной среде по отношению к грамположительным (золотистый стафилококк), грамотрицательным (кишечная и синегнойная палочки) бактерий и дрожжеподобных грибов (Кандида). В опытах с бактериями использовали мясopентонный агар, а для грибов была взята среда Сабуро. Микробная нагрузка во всех испытаниях составляла 5·10⁶ микробных тел в 1 мл. Высевы производились через 10, 20, 30, 40, 60 минут. Длительность инкубации для бактерий составила 18–24 г при 37 °С, а для грибов – 1–2 дня при 28 °С. Определение концентрации для (IV-VII) и показатели антимикробной активности (IV-VII) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Антимикробная активность диоксиранов IV-VII

Тест культуры	Экспозиция высево, мин	Минимальная подавляющая концентрация испытуемых диоксиранов			
		IV	V	VI	VII
Золотистый стафилококк	10				
	20	125	250	125	250
Кишечная палочка	10				
	20	126	250	125	250
Синегнойная палочка	10	125	500	–	–
	20	–	–	–	62.5
	30	–	–	62.5	–
Кандида	10	–	–	62.5	–
	30	–	125	–	–
	40	62.5	–	–	–
	60	–	–	–	62.5

Как видно из табл. 1, соединения IV, VI при МПК 125 мкг/мл вызывают гибель золотистого стафилококка и кишечных палочек, а II и VI, после VII не вызывает гибель этих культур. Соединение III вызывает гибель грибов кандиды мк/мл, а IV и V 62.5.

СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.А. Манафов, С.М. Халилова, Г.Д. Исмаилова, С.А. Салахова, К.Г. Амирасланова

Министерство науки и образования, Институт полимерных материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; khalilova.leyla@inbox.ru

Введение. Неоднократно доказано, что развитие мировых технологий представляет экологическую опасность для существования человека из-за большого количества образующихся и накапливающихся отходов производства. По этой причине не вызывает сомнений тот факт, что загрязнение окружающей среды отходами оказывает негативное воздействие на жизнь и здоровье человека. В настоящее время ухудшение состояния окружающей среды вызвано использованием миллионов тонн пластика.

В настоящее время спрос на полимерные композиционные материалы увеличивается с каждым годом. Знание состава, молекулярной массы, дисперсности и условий переработки олефинов и наполнителей, используемых для получения требуемых композиционных материалов, является ключевыми факторами. При производстве полимерных композиционных материалов необходимо определять оптимальные пропорции компонентов.

Цель. Основной целью научно-исследовательской работы является получение композиционных материалов с новыми свойствами. Для этого определяют прочность на разрыв и относительное удлинение полученных композитов.

Экспериментальная часть. Наполненные системы на основе минеральных пород и полиолефинов имеют большое теоретическое и практическое значение. Получены новые составы с использованием в качестве наполнителей отработанного полиэтилена и полипропилена, а также взятые из местной породы Гобустанского района Азербайджана вулканические грязи. Определены физико-механические свойства полученных композиций и получены интересные результаты. Физико-механические свойства полученных композиций приведены в таблице.

Результаты и их обсуждение. В таблице приведены результаты, полученные с аппретом (6–10) и без него (1–5). В каждую систему добавляли 3 г наполнителя. В качестве аппрета использован сополимер гексена-1 с акриловой кислотой.

Таблица. Физико-механические свойства полученных композиций

№	Состав композитов	Прочность при растяжении σ , МПа	Относительное удлинение ϵ		ПТР, г/моль
			мм	%	
1.	ПП:ПЭ:нап. = 35:35:30	18.21	3	12	Тек.
2.	ПП:ПЭ:нап. = 30:30:40	17.27	3	12	3.72
3.	ПП:ПЭ:нап. = 25:25:50	22.98	3	12	1.82
4.	ПП:ПЭ:нап. = 20:20:60	21.71	3	12	0.71
5.	ПП:ПЭ:нап. = 15:15:70	16.4	3	12	0.14
6.	ПП:ПЭ:нап. = 35:35:30	18.4	1.3	17	6.4
7.	ПП:ПЭ:нап. = 30:30:40	18.3	3	12	5.3
8.	ПП:ПЭ:нап. = 25:25:50	25.6	5.5	22	1.73
9.	ПП:ПЭ:нап. = 20:20:60	19.9	4.3	17	0.71
10.	ПП:ПЭ:нап. = 15:15:70	21.3	3	12	0.2

Как видно из таблицы, предел прочности увеличился с 16.4 МПа до 25.6 МПа. Относительное удлинение уменьшилось с 22 % до 12 %. Композиции с различным объёмным соотношением были получены путём вторичной переработки с использованием местных природных минеральных ресурсов и полимерных отходов. При увеличении количества минерального наполнителя наблюдается увеличение прочности на разрыв. Индекс текучести расплава (ИПР) составил 0.10/10 мин. При соотношении ПП:ПЭ:напол.=35:35:30 в присутствии проклеивающего вещества максимальный результат составляет 6,4 г/10 мин.

Определены их физико-механические свойства и состав. В настоящее время физико-механические свойства полученных композитов находятся на высоком уровне, что позволяет рекомендовать их к использованию в промышленности.

Полученные полимерные композиции используются в промышленности, частично предотвращая ухудшение состояния окружающей среды.

1. Шевченко В.Г. Основы физики композиционных материалов. — М. Изд-во МГУ. — 2010
2. Торул В.А. Шупак Е.Н., Туманов В.В. // Механика композиционных материалов. — 1984, № 4, 635

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АНИЛИНОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ

С.С. Машаева, Ф.М. Мамедова, С.А. Гаджиева, Т.Б. Мададова, Н.А. Мамедова

Министерство науки и образования, Институт полимерных материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; ipoma@science.az

Цель. Создание композиционных материалов с комплексом эксплуатационных свойств – одно из актуальных направлений материаловедения. Различные наполнители, модификаторы и пластификаторы добавляются к известным полимерам и эластомерам для придания им новых свойств или улучшения существующих [1, 2]. Данная научно-исследовательская работа посвящена синтезу анилиноформальдегидных смол, модифицированных олигомерами, и получению композиционных материалов на основе указанных смол, полистирола и бутадиен-стирольного каучука.

Материалы и методы. В работе использовался полистирол, гранулы общего назначения (ГОСТ 20282-86), бутадиен-стирольный каучук (СКС-30 АРКМ-15), анилин (ч.д.а), 37 % формальдегид и синтезированный на лабораторной установке олигонафтол.

Анилин и формальдегид в мольном соотношении 1:1.2 взаимодействовали при температуре 55 °С в присутствии H₂SO₄, потом в реакционную смесь добавлялся олигонафтол. Реакция продолжалась 2–3 часа при постоянном перемешивании. Образцы были приготовлены в различных массовых соотношениях на основе БСК, полистирола и модифицированной АФС. Смеси гомогенизировали в вальцовой машине при температуре 100–120 °С. Образцы формовали методом горячего прессования при 150–160 °С под давлением 5–8 МПа в течение 10 мин. Пластинки охлаждали до комнатной температуры. Структура и физико-механические свойства полученных смол и образцов изучены с использованием современных методов анализа: ИК-спектроскопия (спектрометр Agilent Cary 630 FTIR от Agilent Technologies), термостойкость по Вика, термогравиметрический (ТГА) и дифференциально-термический анализ (ДТА) (аппарат марки NETZSCH STA 449F3).

Предел текучести, относительное удлинение при разрыве и предел прочности при растяжении образцов полимерных композитов исследовались в

соответствии со стандартом ГОСТ 11262-80.

Результаты и их обсуждение. Взаимодействием анилина, формальдегида и олигонафтола синтезированы модифицированные анилиноформальдегидные смолы, их состав и структура изучены методом ИК-спектроскопии.

Смолы обладают хорошими адгезионными и ингибирующими свойствами, поскольку сохраняют в своей структуре группы NH- и OH.

Изучены теплофизические и физико-механические свойства изготовленных образцов на основе полистирола, БСК и смол (1, 3 и 5 мас.%). В табл. 1 представлены результаты исследований влияния состава образцов ПС/БСК/МАФС на предел прочности при растяжении и относительное удлинение.

Таблица 1. Характеристики образцов на основе ПС/БСК/МАФС

№	Состав образцов	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Теплостойкость по Вика, °С
1	ПС/БСК	16.94	12	95
2	ПС/БСК/1мас.% МАФС	21.52	10	125
3	ПС/БСК/2мас.% МАФС	23.64	16	145
4	ПС/БСК/3мас.% МАФС	23.76	16	147

Как видно из таблицы, при добавлении МАФС в состав композитных образцов наблюдается улучшение их свойств, а результаты анализов ТГА и ДТА показали, что термостойкость тоже увеличивается.

Перечисленные свойства считаются важными показателями для определения областей применения композиционных материалов.

1. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета. — 2013
2. Шашок Ж.С., Вишневикий К.В. Технология эластомерных композиций. Учебно-методическое пособие. — Минск: БГТУ. — 2014

ОЦЕНКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Г. Меликсетян

Национальный Политехнический Университет Армении, Ванадзорский филиал, Ванадзор, Армения;
n_meliksetyan@mail.ru

Результаты исследований процессов высокотемпературного трения (выше 350 °С) тормозных фрикционных материалов приводит к необходимости выделения двух основных постоянно действующих факторов. Это, с одной стороны, фактор механических и структурных изменений материала рабочего слоя и, с другой стороны, фактор действующего напряжённо-деформированного состояния. Первый фактор непрерывно и необратимо меняет свойства материала, а второй – способствует разрушению рабочего поверхностного слоя. Термодинамическое состояние продуктов износа выявляет, какой именно из этих факторов является доминирующим [1, 2].

Цель работы: Изучение термодинамического состояния частиц износа тормозных фрикционных материалов в условиях высокотемпературного трения.

Результаты и обсуждение. Вначале на установке FM-9 по стандарту SAE J661-2012 экспериментальному исследованию подверглись образцы фрикционных тормозных материалов ведущих европейских фирм. Далее методом ДТА на дериватографе ОД-102 изучались термодинамические свойства продуктов износа весом 25 мг, образовавшиеся при высокотемпературном трении (рис. 1).

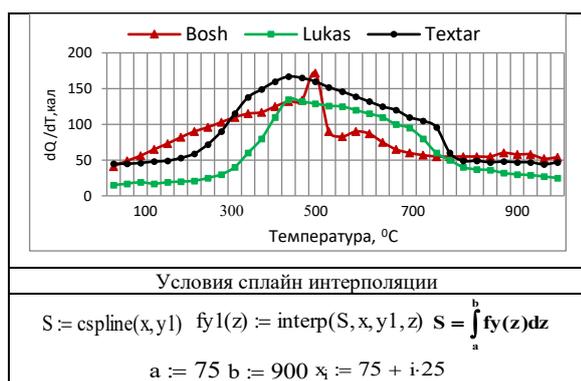


Рис. 1. Кривые ДТА продуктов износа после кубической сплайн интерполяции

Экзотермический характер кривых показывает, что продукты износа находятся в термически неравновесном и активном состоянии. Площадь, ограниченная между кривыми и осью температуры, является количественной мерой оценки поглощённой (выделенной) теплоты. При аргументации полученных данных в зависимости от типа связующих и износостойкости исследуемых материалов выявляется,

что между способностью поглощения теплоты, типа связующего и износостойкостью определённой корреляции нет (рис. 2).

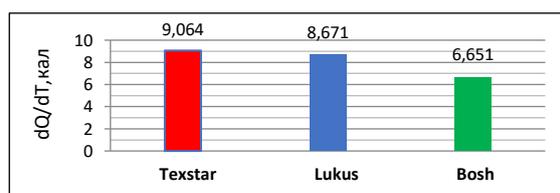


Рис. 2. Значения поглощённой теплоты продуктов износа

В частности, свойства продуктов износа Texstar на основе комбинированного связующего и Lukas на основе каучукового связующего по термической активности и способности поглощения теплоты почти одинаковые.

Выводы. Объяснить процесс образования продуктов износа, основываясь только на механохимические изменения, не представляется возможным. Располагая определённой термодинамической активностью, продукты износа могли бы и дальше поглощать определённую теплоту на поверхности трения, однако они экструдировались из зоны фрикционного контакта в результате растрескивания рабочего слоя под воздействием больших поверхностных напряжений, превышающих предел прочности материала при срезе. Разработку новых тормозных фрикционных материалов с управляемыми свойствами рационально проводить двумя методами:

- регулированием протекающих механохимических и структурных изменений их смещением в область более высоких температур;
- управлением напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя.

Благодарности. Работа выполнена в рамках научной темы базовой проблемной лаборатории «Трибология» НПУА за 2024–2025 гг. при финансовой поддержке Комитета по науке Министерства образования, науки, культуры и спорта РА.

- Meliksetyan N.G., Myshkin N.K., Agbalyan S.G., and Meliksetyan G.N. Friction and Wear of Asbestos-Free Brake Friction Materials // Journal of Friction and Wear. — 2022 (43), no. 6, 416—422
- Меликсетян Н. Г., Агбальян С.Г. Трибологические исследования фрикционных тормозных материалов в Национальном Политехническом Университете Армении // Collection of scientific papers on materials XIV International Scientific Conference "Scientific achievements of the third millennium" . —USA Los Angeles. — 2021, 33—41

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СООЛИГОМЕРА П-БЕНЗОХИНОНА С 4-ВИНИЛПИРИДИНОМ И ЭПОКСИДИАНОВОЙ СМОЛЫ ЭД-20

М.К. Мирмехтиева, Г.С. Ахмедова, Б.А. Мамедов, М.Р. Рагимова,
М.М. Ибрагимова, С.М. Мамедова

Институт Полимерных Материалов Министерства науки и образования Азербайджанской Республики,
Сумгаит, Азербайджанская Республика; mirmekhtieva@mail.ru

Цель. В настоящее время композитам и нанокомпозитам уделяется большое внимание, так как они обладают высокими теплофизическими и физико-механическими свойствами, и изделия, конструкции на их основе термостойкие, прочные и с долгим сроком эксплуатации. В связи с этим цель работы – создание новых композитов на основе сополимера п-бензохинона с 4-винилпиридином и ЭД-20, изучение их свойств и областей практического применения.

Материалы и методы. Для получения сополимеров были использованы п-бензохинон (п-БХ) и 4-винилпиридин (4-ВП). п-БХ ($T_{пл} = 338 \div 340$ К), его очистили путем сублимации. 1,4- ВП фирмы “Merck” перегоняли в вакууме. В качестве катализатора использовали триэтиламин (ТЭА) – $T_{кип.} = 390$ К, $d_p^{20} = 0.73$ г/см³ и КОН. В качестве растворителей использовали: этанол, бутанол, тетрагидрофуран (ТГФ), ацетон и прочие растворители. Эпоксидная смола ЭД-20: молекулярный вес 390–430, динамическая вязкость при 298 К = 130–200, содержание эпоксидных групп 19.9÷22%.

Для получения композитов к однородной смеси 10 г сополимера п-БХ с 4-ВП и 10 мл диоксана при интенсивном перемешивании добавляли 7.5 г ЭД-20, а затем 20%-ный спиртовой раствор КОН. Далее композиционную смесь подвергали вакуумированию при 13.3 Па и 323 К для полного удаления растворителя. Затем, после заливки в различные формы отверждали. Режим отверждения: 373 К – 2 ч., при 423 К – 1 ч., при 448 К – 0.5 ч., при 473 К – 20 мин.

Теплостойкость отверждённых композитов измеряли на приборе Вика под напряжением 5 кг/см². Твёрдость отверждённых композитов определяли на маятниковом приборе МЭ-3. ИК-спектры снимали на спектрометре Specord M-80.

Результаты и их обсуждение. Сополимеризация п-БХ и 4-ВП была проведена в среде этанола в присутствии ТЭА при 303÷348 К. Установлено, что продукты сополимеризации – это олигомеры, которые состоят из гидрохинонных и винилпиридиновых структурных фрагментов. Значения молекулярных масс сополимеров составляет $M_n=1800$ и $M_w=1440$.

Поскольку в составе синтезированных сополимеров СООГХВП имеются гидроксильные группы, а реакция фенольных гидроксильных групп с оксидановым кольцом лежит в основе получения

эпоксидных смол, то представляло интерес провести реакцию взаимодействия СООГХВП с эпоксидиановой смолой ЭД-20. Кинетику взаимодействия СООГХВП с ЭД-20 изучали при 373÷403 К и эквивалентном соотношении эпоксидных и гидроксильных групп. Катализатор – раствор триэтиламина в бутаноле (ТЭАБ) в виде 2 %. Кинетические параметры были определены для начальных стадий процесса. Было установлено, что процесс протекает с заметно высокой скоростью, несмотря на относительную высокую вязкость среды. Увеличение ТЭАБ приводит к росту степени превращения эпоксидных групп, однако, даже при высоких содержаниях ТЭАБ при 403 К превращение эпоксидных групп не превышает 65 %. Существенное влияние на скорость процесса оказывает изменение температуры реакции. При комнатной температуре смесь ЭД-20 с СООГХВП длительно не подвергается изменению. При 363 К фиксируется заметный расход эпоксидной группы, а при 373 К конверсия эпоксидных групп ЭД-20 достигает 30 %.

Определены кинетические параметры: значение начальной скорости $W_0 = (0.89 \div 5.10) \cdot 10^{-5}$ кг/л·мин, значения константы скорости $k = (5.9 \div 21.4) \cdot 10^{-2}$ л/кг·мин и величина энергии активации $E = 58.4$ кДж/моль.

Продукты реакции СООГХВП с ЭД-20 представляют собой прозрачные стеклообразные вещества. Они частично растворяются в диоксане, ТГФ и ацетоне. При отверждении они превращаются в трёхмерные полимерные материалы – композиты, обладающие высокими теплофизическими физико-механическими свойствами (табл.1).

Таблица 1. Условия проведения отверждения эпиксополимера СООГХВП и ЭД-20 и некоторые свойства отвержденных продуктов в присутствии 2% ТЭАБ

N	T, К	τ, мин	Степень отверждения, %	Твёрдость по Бринеллю, кг/см ²	Теплостойкость по Вика, К	$D_{910}, \text{см}^2$ $D_{1070}, \text{см}^2$
1	393	30	48	11	373	1.05
2	393	50	53	13	378	0.89
3	393	80	65	14	383	0.55
4	393	120	70	15	388	0.48
5	403	10	55	13	373	0.90
6	403	20	63	14	383	0.60
7	403	80	72	16	398	0.42
8	403	60	79	17	403	0.33

СИНТЕЗ И СВОЙСТВ МАЛЕИНАТ-МЕТАКРИЛАТНЫХ ОЛИГОЭФИРОВ ПОЛИОКСИХЛОПРОПИЛЕНА

А.М. Мустафаев¹, Р.И. Исмаилова¹, У.К. Исмаилова¹, Ф.Х. Шахгелдиев², Б.А. Мамедов¹

¹Институт Полимерных Материалов Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики, Сумгаит, Азербайджанская Республика; ipoma@science.az

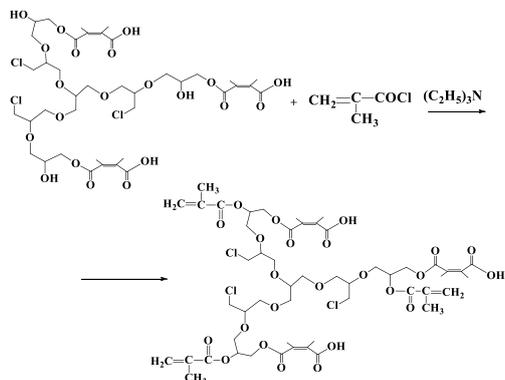
²Сумгаитский Государственный Университет, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

Введение. Многочисленные гетерополифункциональные производные пропантриола считаются ценными соединениями в тонком органическом синтезе. Среди соединений, синтезируемых на основе пропантриола, особое значение имеют эпоксидные смолы с алифатической структурой. Олигоэфиры, полученные в результате взаимодействия олигомеров, содержащих эпоксидные группы, с метакриловой кислотой и малеиновым ангидридом, могут применяться в качестве модификаторов эпоксидных смол [1, 2].

Цель. Целью представленной работы является синтез малеинат-метакрилатсодержащих олигоэфиров и получение на основе полученных соединений полимерных материалов с высокими эксплуатационными характеристиками. Показано, что композиции, содержащие в своём составе малеинат-метакрилатную группу, вступают в химическую связь с молекулой эпоксидной смолы при химическом структурировании, что приводит к заметному улучшению ряда эксплуатационных характеристик изделий из полученных композиционных материалов и главным образом, к сохранению стабильности их свойств при длительном использовании [2].

Материалы и методы. При взаимодействии синтезируемого олигометакрилатного эфира с малеиновым ангидридом получают более разветвлённых олигоэфиров, содержащих в молекуле олигомера как малеинатную, так и метакрилатную группы.

При взаимодействии синтезированного трималеинатного эфира полиоксихлорпропилена с хлор ангидридом метакриловой кислоты синтезирован малеинат-метакрилатный олигоэфир полиоксихлорпропилена с выходом 90–93 %:



Общий выход ненасыщенных полиэфиров колеблется в пределах от 87 % до 93 %. Структуры полученных соединений подтверждены данными ИК- и ЯМР-спектроскопии.

Экспериментальная часть. В реакционную колбу помещают 0,01 моль триглицидного эфира полиоксихлорпропилена, 0,03 моль малеинового ангидрида, 0,5 мл пиридина, 15 мл толуола. Смесь перемешивают магнитной мешалкой при 60 °С в течение 3 часов. После завершения реакции промывают водой. После сушки и отгонку растворителя получают продукт с выходом 75 %.

Синтезированный олигоэфир трималеинат-метакрилат полиоксихлорпропилена был испытан в качестве модификатора эпоксидной смолы ЭД-20. Результаты приведены в таблице.

Таблица. Физико-механические показатели композиции

Показатель	Содержание модификатора, %		
	10	20	30
Предел прочности при растяжении, МПа	90	120	85
Относительное удлинение при разрыве, %	7	15	13
Теплостойкость по Вика, °С	130	160	150
Огнестойкость, с	Самозатухающий	Самозатухающий	Самозатухающий

Результаты и обсуждения. В результате исследований доказано, что процесс отверждения синтезированного метакрилат-малеинатного олигоэфира полиоксихлорпропилена с ПЭПА изучали методом дифференциально-термического анализа. Установлено, что триметакрилат-малеинатный олигоэфир полиоксихлорпропилена может быть использован в качестве модификатора для эпоксидной смолы ЭД-20, в результате чего можно получить композиционные материалы с высокими физико-механическими свойствами.

1. Мустафаев А.М., Исмаилова Р.И., Ищенко Н.Я., Шахгелдиев Ф.Х., Рамазанов Э.А., Мамедов Б.А. Получение и исследование гибридных эпоксидных композиций на основе триглицеридного олигоэфира и смолы ЭД-20 // Журнал Химических Проблем. — 2018, № 4, 544—549
2. Ismailova R.I., Mustafayev A.M., Ishenko N.Ya., Guseinov I.A., Mamedov B.A. Synthesis and Use of Polyoxychloropropylene-Epoxy methacrylate Oligoesters as Active Modifier of Epoxy Dine Resin ED-20 // International Journal of Engineering Research & Science (IJOER). — 2018 (4), № 2, 1—6

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЭВД И ПАРА-ДИ-(2-ЭТОКСИКАРБОНИЛЦИКЛОПРОПИЛ)БЕНЗОЛА

Х.Г. Назаралиев, Р.З. Шахназарли, Э.А. Рамазанов

Институт Полимерных Материалов Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики, Сумгаит, Азербайджанская Республика; ipoma@science.az

Введение. В настоящее время одной из важнейших и актуальных проблем, стоящих перед наукой и техникой, является разработка антибактериальных композиционных материалов [1, 2]. Большинство композиций, полученных на основе промышленных полимеров, под воздействием различных микроорганизмов подвергаются разрушению, что приводит к сокращению срока их службы. Для предотвращения процесса микробиологической деструкции композиций обычно в состав их вводят различные противомикробные соединения [3]. В представленной работе в качестве добавки, предотвращающей микробиологическую деструкцию композиций на основе полиолефинов использовано синтезированное нами соединение – пара-ди-(2-этоксикарбонилциклопропил)-бензол (П-ЭЦПБ) [4]:

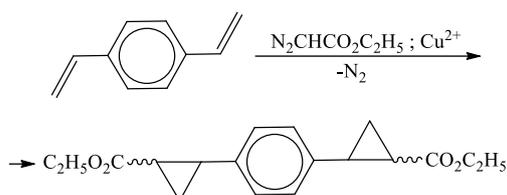


Рис. 1. Схема синтеза пара-ди-(2-этоксикарбонилциклопропил)-бензола

Результаты и обсуждение. Сложноэфирные и циклопропановые группы, имеющиеся в структуре этого соединения, придают композициям специфические свойства. В представленной работе осуществлена модификация синтезированным соединением минерального наполнителя из Апшеронского месторождения Азербайджана, который впоследствии применён в составе композиций на основе ПЭВД. Наночастицы минерального наполнителя были получены с применением аналитической мельницы А-11 при скорости вращения 2800 об/мин. Размеры частиц, которые определяли на оборудовании Linseiz Start 1600 (Германия), составили 35–100 нм. В состав минерального наполнителя входят различные оксиды и некоторое количество (~7 мас. %) наноглины. Полимерные композиции готовили на вальцах при 140°C. Для этого минеральные наночастицы предварительно пропитывали пара-ди-(2-этоксикарбонилциклопропил)бензолом и затем вводили в расплав ПЭВД в следующих пропорциях: ПЭВД:минерал: П-ЭЦПБ: 1 – 100:0:0; 2 – 94:5:1; 3 – 89:10:1; 4 – 84:15:1; 5 – 79:20:1.

Разработанные композиции отличались повышенными физико-механическими показателями (табл. 1). Одновременно композиции приобретали антибактериальные свойства.

Таблица 1. Физико-механические показатели композиций

№	Состав композиции (ПЭВД+минерал+ П-ЭЦПБ). %	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	ПТР, 10 г/мин	Теплостойкость, °С
1	ПЭВД	8,04	125	1,5	130
2	ПЭВД+5+1	8,88	80	0,84	135
3	ПЭВД+10+1	8,12	75	0,80	136
4	ПЭВД+15+1	8,53	73	0,76	137
5	ПЭВД+20+1	9,06	60	0,57	137

Изучение антимикробных свойств композиций проводили путем определения их грибовостойкости с применением суспензий грибов вида *Aspergillus niger* и *Candida albicans* на пластинах размером 30x30 мм и толщиной 1–2 мм. Грибовостойкость образцов композиций оценивали в баллах. Испытания показали, что при введении П-ЭЦПБ в количестве 1 мас. % совместно с 5–20 мас. % минерального наполнителя в состав композиции наблюдается незначительный рост спор грибов, по сравнению с немодифицированным ПЭВД, что указывает на сильный фунгицидный эффект синтезированного соединения, что можно объяснить наличием в структуре синтезированного соединения циклопропановых функциональных групп. Полученные композиции можно предложить к использованию при изготовлении товаров бытового назначения.

1. Горбачев А.В., Файзулина И.З., Вольфсон С.И. и др. Композиционный материал на основе полиолефинов и модифицированных растительных наполнителей. // Пластмассы. — 2023, № 1-2, 48–52
2. Тверитникова И.С., Кириш И.А., Банникова О.А. и др. Исследование многослойных полимерных пленок модифицированных антимикробным компонентом, предназначенных для упаковки молочных продуктов // Пищевая промышленность. — 2020, № 12, 66–69
3. Чуловская А.Л., Гарасько Е.В., Кравченко Т.П. Композиционный материал на основе полипропилена с биоцидными свойствами. // Успехи в химии и химической технологии. — 2013 (27), № 3, 115–118
4. Nazaraliyev Kh.G., Shahnarli R.Z., Ramazanov E.A. et al. Synthesis and properties of para-di-(2-ethoxycarbonylcyclopropyl) benzene as a new biologically active plasticizer. // Processes of Petrochemistry and Oil Refining (PPOR). — 2024 (25), no. 4, 1178–1186

ВЫБОР АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА И КОНТРОЛЬНОЙ РЕЗИНЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОДОШВ ОБУВИ

М.А. Нейфельд¹, А.Н. Буркин¹, Ю.В. Дойлин²

¹Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь; mneufeld8@yandex.by
²ОАО «Витебскдрев», Витебск, Беларусь

Введение. Для лабораторных испытаний применяют специальные истирающие материалы: шлифовальное полотно, корундовые круги и барабаны, абразивные порошки, металлические сетки. В странах СНГ стандартным истирающим материалом служат шлифовальные шкурки на тканевой или бумажной основе, которые могут быть легко заменены при потере истирающей способности, это значительно труднее осуществить в случае абразивных кругов и особенно барабанов. Для того чтобы не слишком ужесточить условия истирания по сравнению с эксплуатационными, используется сравнительно небольшой размер зерна №8. Согласно переводной таблице по ГОСТ Р 52381-2005 «Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава» современное обозначение шлифовального полотна с зернистостью 8 – F150 или P180.

Относительная износостойкость резин зависит от типа абразивного материала (например, отношение интенсивностей истирания двух резин на шкурках различных типов измеряется от 0,36 до 1,25). Истирающая способность стандартных истирающих материалов контролируется с помощью эталонной резины, единой рецептуры которой не существует [1]. Она является достаточно дефицитным товаром и её необходимо заказывать в отличие от резин, выпускаемых серийно.

В связи с изложенным выше, цель настоящей работы заключалась в изучении возможности использования серийно выпускаемых резин для низа обуви в качестве эталона сравнения.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования были выбраны: пластины из непористой резины «Резит» производства ОАО «ЗПИ» (г. Киров) и контрольная резина, используемая для проведения проверок лабораторного оборудования. Для данных материалов были определены такие физические свойства как плотность и твёрдость. Плотность определялась по ГОСТ 409-2017 «Пластмассы ячеистые и резины губчатые. Метод определения кажущейся плотности», а твёрдость по ГОСТ 263-75 «Резина. Метод определения твёрдости по Шору А». Физические свойства данных материалов представлены в табл. 1.

Испытания по определению износостойкости полимерных материалов проводились на приборе Табера с применением абразивного полотна марки P180, которое было нарезано на полоски размером 12×151 мм, с нанесением на них двухсторонней ленты для последующего её закрепления на резиновых дисках.

Таблица 1. Физические свойства материалов

Образец	Наименование показателей	
	Плотность, г/см ³	Твёрдость, усл.ед.
«Резит»	1,21	91-95
Контрольная резина	1,40	82-83

Для испытания были выкроены 7 образцов размером 100×100 мм, проведены испытания пятью циклами, каждый из которых составляет 1000 оборотов и рассмотрена кинетика износа.

Полученный достоверный интервал говорит о том, что для подобного рода исследований достаточно 5 образцов.

По проведённым исследованиям были получены зависимости убыли массы по отношению к количеству циклов соответственно: по контрольной резине с коэффициентом аппроксимации 0,5–0,6, а по «Резиту» от 0,8 до 0,9. Последнее свидетельствует о том, что разброс результатов по непористой резине «Резит» существенно ниже, чем по контрольной резине.

Заключение. Стандарты, связанные с испытанием на абразивный износ полимерных материалов для подошв обуви позволяют провести только сравнительный анализ их свойств [2]. Применение серийно выпускаемых резин, например «Резит», позволит проводить подобные сравнения для сопоставления результатов испытания с иными полимерными материалами для низа обуви: термоэластопластами, полиуретанами, термопластичными резинами и др.

1. Истирание резин / Г.И. Бродский, В.Ф. Евстратов, Н.Л. Сахновский, Л.Д. Слодилов. — М.: Химия. — 1975
2. ГОСТ ISO 4649-2024 Резина и термоэластопласты. Определение сопротивления истиранию с использованием вращающегося цилиндрического барабанного устройства. — Введ. 2025-07-01. — Москва: Российский институт стандартизации. — 2024

Триботехнические свойства смазочных композиций с мезогенными молекулярными комплексами

В.В. Новиков¹, С.А. Сырбу²

¹Ивановский государственный университет, Иваново, Россия; novikov-ww@mail.ru

²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Россия

Введение. Жидкие кристаллы, как трибоактивные вещества, привлекали внимание специалистов в области трибологии со второй половины прошлого столетия. Наличие у молекул мезогенов геометрической анизотропии оказалось интересным не только с точки зрения проявления ими жидкокристаллических свойств, но и с точки зрения их поведения в трибосистемах [1]. Возможности получения новых мезогенных молекул расширились с применением подходов супрамолекулярной химии.

Целью настоящей работы являлось определение трибологических свойств новых синтезированных нами [2] мезогенных молекулярных комплексов (ММК) 4-*n*-алкилоксикоричных кислот (п-АОКК) с 4,4'-бипиридилем (БП) и 1,2-бис(4-пиридил)этаном (БПЭ) (рис.) в условиях граничного трения, как фундаментального аспекта свойств смазочного материала.

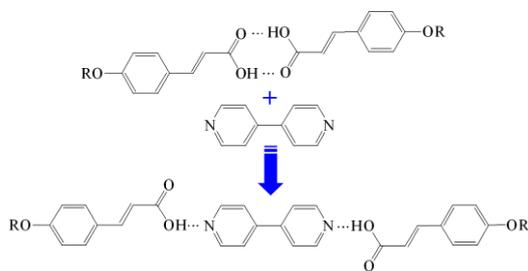


Рис. Схема образования молекулярного комплекса БП – п-АОКК состава 1:2

Материалы и методы. Задачами исследования было получение смазочных композиций с использованием ММК и проведение с ними трибологических испытаний. В ходе изготовления смазочных композиций выяснилось, что ММК в базовом вазелиновом масле ГОСТ 3164-78 (ВМ) лишь в незначительном количестве. В составе смазочного материала кристаллы п-АОКК и ММК могут быть использованы не как присадка, а как твёрдый наполнитель. При температурах выше температуры плавления кристаллов ММК оказалось возможным также изучить трибологические свойства их расплавов.

Испытания на трение при комнатной и повышенной температурах (до 200 °С) проводились на лабораторном трибометре ТЛПТ-01 в условиях граничного трения при возвратно-поступательном движении [3], который моделирует условия граничного трения, характерные для работы направляющих скольжения или винтовых пар, применяемых, например, в запорной арматуре систем противопожарного

водоснабжения.

Особую важность для узлов трения винтовых пар и направляющих в условиях обеднённой смазки являются свойства смазки создавать на поверхности долговечную смазочную плёнку. В качестве показателя эффективности «работы» ММК использовался показатель числа циклов до разрушения этой плёнки. Испытания на долговечность проводились по методике ЭНИМС.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что при охлаждении в области существования изотропной жидкой фазы коэффициент трения медленно снижался. В области существования мезофаз его значения стабилизировались. Процесс кристаллизации сопровождался резким падением коэффициента трения из-за выпадения в расплаве наноразмерных молекулярных кристаллов, которые затем застывали в виде тонкой плёнки. В ходе проведения экспериментов было установлено, что наилучшими механическими свойствами обладали короткоцепочечные гомологи п-АОКК. С ростом длины цепи радикала механические свойства плёнок п-АОКК и ММК улучшались.

Полученные нами смазочные композиции ММК+ВМ не проявили антифрикционных свойств, что свидетельствует об их низкой поверхностной активности. Однако они значительно (до 16...19 раз) увеличили долговечность смазочной плёнки в условиях обеднённой смазки, что свидетельствует об их высоких противоизносных свойствах. Введение композиции ММК+ВМ в состав пластичной смазки ЦИАТИМ-201 позволило стабилизировать коэффициент трения на величине 0,10...0,11 в диапазоне температур от 30...150 °С.

Полученные результаты свидетельствуют о возможной перспективности дальнейших исследований по созданию функциональных смазочных материалов с ММК.

Ссылки на использованные источники

1. Ермаков С.Ф. Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем. — Минск: Беларуская навука. — 2011
2. Syrbu S.A., Fedorov M.S., Giricheva N.I., Novikov V.V., Filipov I.A., and Kiselev M.R. Supramolecular complexes based on 4-*n*-alkoxycinnamic acids and pyridine derivatives: // Mesomorphic properties and prospects of applying to tribosystems // J. Mol. Liq. — 2020, 305, 112796 (6 p.)
3. Патент на полезную модель № 169882. Устройство для измерения силы трения / Новиков В. В., Сырбу С. А., Бурченков К.С. и др. Выдан Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам 5.04.2017. — М. — 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШИРИНЫ ЛИНИИ ЭКСТРУЗИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ FGF ПЕЧАТИ

П.Н. Осипов

Тульский государственный университет, Тула, Россия; pavel.osipov.98@list.ru

Введение. 3D-печать из полимеров и композитов набирает популярность, особенно в машиностроении. Технология 3D-печати предлагает ряд преимуществ, позволяющих эффективно решать различные задачи. Метод Fused Granular Fabrication (FGF) основан на прямой экструзии полимерных гранул. FGF отличается более высокой скоростью печати по сравнению с FDM и более низкой стоимостью материалов для печати [1, 2].

Прочность печатаемых изделий зависит от множества факторов. Из относящихся к параметрам печати можно выделить:

- Температуру стола
- Температуру экструзии
- Скорость печати
- Высоту слоя
- Степень заполнения
- Ориентацию детали на столе
- Ширину линии экструзии

Цель работы. Целью работы является экспериментальное исследование влияния ширины линии экструзии на физико-механические свойства изделий, изготовленных методом FGF-печати.

Материалы и оборудование. Изготовление образцов (рис. 1) производилось на высокотемпературном принтере для FDM-печати Total Z Anyform 500 PRO. В качестве термопластичного материала использовался полиамид угленаполненный (PA12-CF). Перед печатью гранулы подвергались сушке при температуре 80 °С. Печать производилась с охлаждением при следующих параметрах:

- Ширина линии экструзии – 1;2;3 мм;
- Плотность заполнения – 90%;
- Температура сопла – 190 °С;
- Скорость печати – 10 мм/с;
- Температура в камере – 30 °С;
- Температура стола – 120 °С.

Испытания на разрыв проводились в соответствии с ГОСТ 11262-2017 на универсальной испытательной машине РЭМ-Ф в режиме растяжения со скоростью 2 мм/с.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены образцы, напечатанные при различных значениях ширины линии экструзии и угла ориентации. В таблице 1 представлены результаты испытаний образцов.

Результаты испытаний показали, что наибольший предел прочности достигается при ширине

линий 3 мм с ориентацией линий заполнения 0°. Так же можно сделать вывод что увеличение предела прочности в образцах, напечатанных с ориентацией линий заполнения 90°, происходит вследствие улучшения межслоевой адгезии.

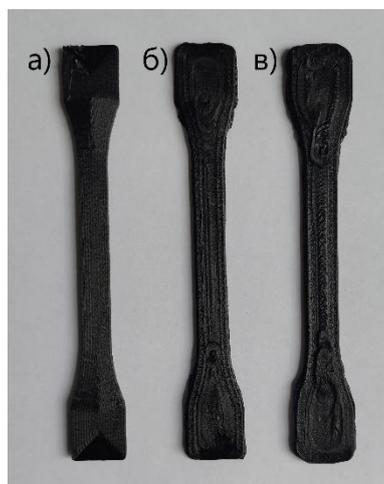


Рис. 1. Образцы при разной ширине линии экструзии: а) 1 мм; б) 2 мм, в) 3 мм

Таблица 1. Результаты испытаний на разрывной машине

Ширина линии экструзии, мм	Угол ориентации	Предел прочности при растяжении, МПа
1	0°	37,7
1	90°	29,3
2	0°	59,8
2	90°	58
3	0°	71
3	90°	67,4

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FEWG-2024-0002.

1. Шафигуллин Л. Н., Романова Н. В., Габдрахманов А. Т. Анализ материалов и технологий гранульной 3D печати для изготовления деталей автомобилей // ББК 34.4-1в6я43 П278 Организаторы конференции. – С. 61.
2. Nguyen P.Q.K. et al. Influences of printing parameters on mechanical properties of recycled PET and PETG using fused granular fabrication technique // Polymer Testing. — 2024 (132), 108390.
3. Ferreira I., Vale D., Machado M., and Lino J. Additive manufacturing of polyethylene terephthalate glycol /carbon fiber composites: An experimental study from filament to printed parts // Proc. IMechE Part L: J Materials: Design and Applications. — 2018 233(9):146442071879519.

СИНТЕЗ ПОЛИПИРРОЛА ХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ И КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Е.Г. Петрова¹, М.Д. Сушкевич^{1,2}, А.А. Рогачев¹

¹Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь; petrovaeg@ichnm.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. Метод химического осаждения из газовой фазы позволяет получать однородные покрытия и тонкие плёнки на подложках различной природы, и потому представляет большой интерес для получения проводящих полимеров [1]. Традиционно данный метод требует использования высоких температур либо создания разреженной атмосферы для облегчения перевода конденсированного вещества в газовую фазу. Целью работы была разработка методики получения полипиррола методом осаждения из газовой фазы при атмосферном давлении и комнатной температуре и исследование влияния концентрации окислителя на протекание данного процесса.

Материалы и методы. Синтез полипиррола проводили на подложках из кварца и кремния. На подложку наносили 2 мкл раствора хлорида железа (III) в этаноле с концентрациями $5 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-2}$ М, высушивали при комнатной температуре на воздухе и вносили в сосуд, содержащий насыщенные пары пиррола. Кинетические кривые полимеризации записывали на приборе кварцевого микровзвешивания QCM 200 (Stanford Research Systems, Inc, США). Математическое моделирование кривых изменения массы QCM-датчика проводилось при помощи встроенного пакета функций программы Origin.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены кривые изменения массы QCM-датчика при различных концентрациях окислителя. Все полученные кривые имеют S-образную форму и не выходят на насыщение за время наблюдения, что говорит о продолжающейся полимеризации. Для математического описания кинетических кривых процесса наилучшим образом подошло уравнение логистической функции вида:

$$y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p}, \quad (1)$$

где A_1 , A_2 , x_0 – некоторые константы. В литературе встречается использование логистических зависимостей для описания адсорбции ионов металлов из растворов на сорбентах различной природы [2, 3]. Можно предположить, что полученных кривые описывают адсорбцию газофазного пиррола на активных окислительных центрах. На начальных стадиях процесса быстрое изменение массы детектора в случае более высоких концентраций хлорида железа связано

с повышенной плотностью окислительных центров. С другой стороны, быстро сформированный плотный слой продукта может препятствовать дальнейшей диффузии мономера к окислительным центрам, и процессы адсорбции протекают менее интенсивно, чем в случае пониженных концентраций FeCl_3 . Значения параметров полученных уравнений приведены в табл. 1.

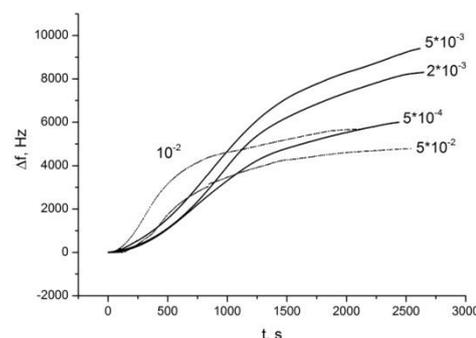


Рис. 1. Кинетические QCM-кривые полимеризации пиррола

Таблица 1. Параметры логистического уравнения для описания полимеризации пиррола при разных концентрациях хлорида железа

$C_{\text{FeCl}_3} \cdot 10^3, \text{M}$	A_1	A_2	x_0	p	R^2
0,5	25,79	6656,77	1007,47	2,37	0,999
2,0	104,11	9058,31	1116,08	2,60	0,999
5,0	150,85	10473,31	1112,45	2,33	0,999
10,0	-33,78	10067,36	1292,99	2,25	0,999
50,0	-6,43	7358,86	1079,23	2,28	0,999

Значения коэффициентов x_0 и p можно считать условно постоянными и связанными с механизмом процесса: $\langle x_0 \rangle \sim 1,2 \cdot 10^3$ и $\langle p \rangle \sim 2,3$, в то время как коэффициенты A_i могут быть связаны с концентрациями реагентов.

Ссылки на использованные источники

- Kim J.-S., Oh H., and Parsons G.N. Growth behavior and substrate selective deposition of polypyrrole, polythiophene, and polyaniline by oxidative chemical vapor deposition and molecular layer deposition // J. Vac. Sci. Technol. — 2022 (A 40), 063401
- Celekli A., Yavuzatmaca M., and Bozkurt H. An eco-friendly process: Predictive modelling of copper adsorption from aqueous solution on Spirulina platensis // Journal of Hazardous Materials. — 2010 (173), V. 2, 123–129
- Vieira M.G.A., Gimenes M.L., and da Silva M.G.C. Modelling of the process of adsorption of nickel in bentonite clay // Chemical Engineering Transactions. — 2009 (17), 421–426

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИИ ПРИМЕРЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ К ВЛАЖНОМУ ГРУНТУ

С.Н. Попов, А.В. Андреева, М.Е. Саввинова

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», Якутск, Россия;
savvapopov49@mail.ru

Актуальность проблемы и цель разработки

Одним из последствий потепления климата является интенсификация выпучивания свайных фундаментов из многолетнемерзлого грунта, наблюдаемая в осенне-зимний периоды, которая может негативно влиять на безопасность эксплуатации зданий, сооружений и конструкций в арктических условиях. Одним из основных факторов, определяющих величины выпучивания, является адгезия примерзания влажных грунтов к поверхности фундаментных свай и опор. Применение защитных покрытий в зоне сезонного протаивания в грунте с пониженной адгезией примерзания может значительно уменьшить усилия пучения и вертикальные перемещения элементов оснований.

Принципиальная конструкция устройства для измерений адгезии примерзания различных материалов и покрытий к влажным грунтам представлена на рис. 1.

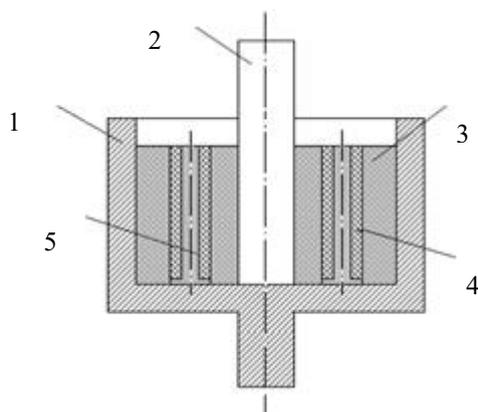


Рис. 1. Устройство для измерения адгезии

Конструкция устройства содержит цилиндрический корпус 1, прикрепляемый к нижнему захвату разрывной испытательной машины и цилиндрической формы образец 2, прикрепляемый к верхнему захвату. Пространство 3 между образцом и корпусом

заполняется влажным грунтом. В грунте между образцом и корпусом равномерно распределены втулки 4 из замкнутопористого пенопласта, с металлическими пригрузами 5. Высота втулок с пригрузом должна соответствовать толщине слоя грунта.

Измерения адгезии примерзания влажного грунта к поверхности образца осуществляют в следующем порядке. Сборку устройства осуществляют внутри низкотемпературной камеры испытательной машины. Корпус закрепляют в нижнем захвате. Образец прикрепляют к верхнему захвату по центру корпуса. В корпус устанавливают пенопластовые втулки с пригрузами и заполняют его влажным грунтом. Затем осуществляют замораживание устройства. Величину адгезии примерзания грунта к образцам материалов и покрытий определяют по усилию сдвига образца при его вертикальном перемещении. В процессе замораживания влажного грунта происходит расширение их объема, на величину до 9 %, воздействующее на пенопластовые втулки и сжимающее их. Сжатие втулки при условии превышения объема пор относительно увеличения объема грунта будет нейтрализовать их дополнительное давление на образец и исключит искажение результатов измерения адгезии примерзания.

Проведённые исследования нескольких типов полимерных покрытий показали возможность использования предлагаемой методик для выбора материалов с минимальными показателями адгезии примерзания.

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011100162-9) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

1. Патент РФ 2835818 Устройство для определения адгезии примерзания материалов и покрытий к влажному грунту и льду / Попов С.Н., Андреева А.В., Саввинова М.Е. // Бюл. № 7, опуб. 04.03.2025

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

С.Н. Попов, Т.М. Соловьев

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», Якутск, Россия;
savvaropov49@mail.ru

Актуальность проблемы и цель разработки. Для повышения надёжности и долговечности машин и механизмов, эксплуатирующихся, например, в горнодобывающей промышленности, актуальной задачей является разработка новых материалов с повышенной износостойкостью при гидроабразивном воздействии. Одной из ответственных задач при этом является обеспечение возможности достоверного и оперативного определения количественных показателей износостойкости материалов и покрытий в лабораторных условиях.

Конструкция устройства представлена на рис. 1.

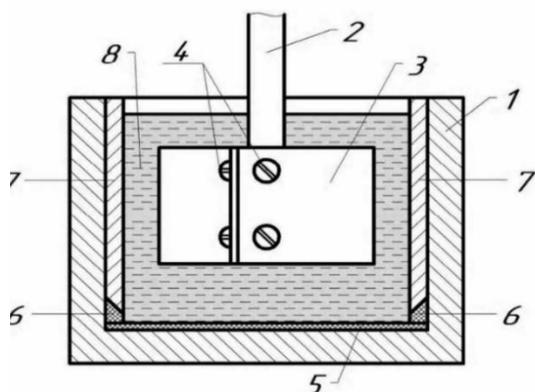


Рис. 1. Устройство для исследования материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии

Устройство содержит корпус 1, с размещённым внутри смесителем 2, лопасти 3 которого прикреплены к его краям винтами 4. Дисковидный образец 5 изготовленный из исследуемого материала или покрытия, нанесённого на подложку, размещён на дне сосуда. По периметру образца на его поверхности установлено защитное кольцо 6 трапециевидного сечения, на котором помещена металлическая втулка 7, взаимодействующая с кольцом по конической поверхности. Гидроабразивная смесь 8 заполняет внутреннее пространство сосуда.

Втулка прижимает защитное кольцо одновременно к поверхности образца по его периметру и к боковой поверхности сосуда из-за распределения силы веса втулки по конической контактной поверхности. В результате этого абразивные частицы не могут взаимодействовать с образцом и исключают возможность его изнашивания по периметру.

Оригинальность конструкции подтверждена патентом РФ [1].

Методика испытаний. Образцы материалов изготавливают в виде дисков по размеру дна сосуда. Образцы покрытий получают путём их нанесения на дисковидные подложки. После измерения исходной массы образцы помещают на дно сосуда и по периметру устанавливают защитное кольцо и металлическую втулку. Затем сосуд наполняют гидроабразивной средой с заданной размерностью и концентрацией абразивных частиц. Размещают в полости сосуда смеситель и закрепляют его в патроне сверлильного станка. При включении станка с заданной скоростью вращения раскрученная гидроабразивная смесь взаимодействует с поверхностью дисковидного образца и изнашивает его поверхность. По результатам испытаний различных материалов и покрытий возможно определение наиболее износостойких рецептурных составов.

Испытания разработанного устройства показали возможность его широкого применения для определения показателей гидроабразивной износостойкости различных материалов и покрытий. Предложенная схема испытаний позволила существенно повысить достоверность измерения интенсивности износа и уменьшить, например, для композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена погрешность до 15–20 %. В качестве абразивных частиц применяется карбид кремния с размерностью 1–3 мм, смешанных с водой в соотношении 1:1 по массе.

Разработанная методика оформлена в виде стандарта организации и зарегистрирована в ФБУ «Якутский ЦСМ» [2].

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011100162-9) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

1. Патент РФ 228565 U1 Устройство для исследования износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии / Попов С.Н., Соловьев Т.М. // Бюл. № 25 опуб. 03.09.2024
2. Попов С.Н., Соловьев Т.М. Метод определения износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии. Стандарт организации СТО 03534081-002-2024. ФБУ «Якутский ЦСМ» №037/01178 от 26.11.2024

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ, ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СТЕПЕНЯХ ЗАПОЛНЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ОБЪЕМА

А.А. Потапов, И.С. Говоров, В.П. Красильников

¹Тулский государственный университет, Тула, Россия; potapov-krsinstall@mail.ru

FDM-печать предоставляет уникальные возможности для создания сложных геометрических форм и оптимизации использования материала. Это позволяет экономить как материальные, так и временные ресурсы, а также изготавливать изделия с меньшей массой, заменяя традиционные металлы полимерными материалами и композитами. Одним из ключевых инструментов оптимизации является изменение степени заполнения внутреннего объема изделия. Изменение степени заполнения не только влияет на массу детали, но и существенно изменяет её эффективные механические свойства, такие как модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона [1, 2]. Следовательно, актуальной задачей является разработка модели, которая описывала бы взаимосвязь между степенью заполнения и эффективными механическими характеристиками материала.

Цель работы. Определение фактических значений характеристик изделия с использованием моделей микромеханики, позволяющих определить эффективные значения физико-механических свойств при различных степенях заполнения в виде аналитических зависимостей.

Моделирование. Эффективные характеристики материала при различных степенях заполнения были определены с помощью численного моделирования в программе COMSOL Multiphysics. При моделировании использовалась разработанная модель на основе метода асимптотического осреднения, предполагающего, что материал изделия имеет периодически повторяющуюся структуру, образованную набором минимальных элементов. Для расчёта эффективных механических свойств материала, имитирующего структуру слоёв, сформированную в процессе FDM-печати с чередующимися направлениями слоёв 0° и 90° , была использована соответствующая модель (рис. 1).

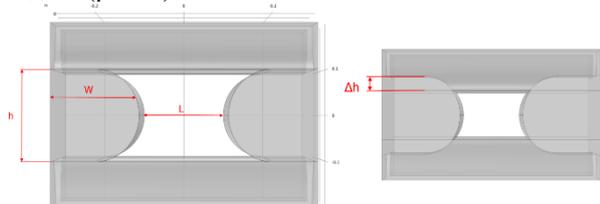


Рис. 1. Модель ячейки: h – высота слоя; W – ширина слоя; L – расстояние между линиями печати; Δh – перекрытие слоя

Для упрощения процедуры определения упругих характеристик материала, осуществлялось вычисление матрицы податливости:

$$C=D^{-1} \quad (1)$$

Результатом решения задачи было получение элементов матрицы жёсткости D .

Степень заполнения (V) зависела от параметров печати (W , H , L) и рассчитывалась по объёму. Для выбора наилучшего перекрытия слоя (Δh) было проведено моделирование с варьированием Δh в диапазоне от 0,05 до 0,15. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало, что оптимальным является $\Delta h=0,1$ мм (10%).

Результаты. В результате численного решения были получены эффективные характеристики материала: модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, - в зависимости от степени заполнения. На основании результатов моделирования были получены аналитические зависимости эффективных характеристик материала от степени заполнения:

$$E_{11}/E_m=0,047+0,011*V-442*10^{-6}*V^2+797*10^{-8}*V^3+398*10^{-10}*V^4 \quad (2)$$

$$E_{33}/E_m=-0,108+0,019*V-774*10^{-6}*V^2+125*10^{-7}*V^3+586*10^{-10}*V^4 \quad (3)$$

$$G_{12}/G_m=0,082+0,014*V-612*10^{-6}*V^2+943*10^{-8}*V^3+421*10^{-10}*V^4 \quad (4)$$

$$G_{23}/G_m=-0,117+0,018*V-755*10^{-6}*V^2+114*10^{-7}*V^3+497*10^{-10}*V^4 \quad (5)$$

$$\mu_{21}/\mu_m=0,026+0,009*V-373*10^{-6}*V^2+644*10^{-8}*V^3+315*10^{-10}*V^4 \quad (6)$$

$$\mu_{31}/\mu_m=-0,108+0,031*V-106*10^{-5}*V^2+162*10^{-7}*V^3+785*10^{-10}*V^4 \quad (7)$$

где E_{11} – модуль упругости в продольном направлении; E_{33} – модуль упругости в направлении в поперечном направлении; G_{12} , G_{23} – модули сдвига в соответствующих направлениях; μ_{21} , μ_{31} – коэффициенты Пуассона в соответствующих направлениях.

Точность разработанных моделей была оценена путём сравнения с экспериментальными данными, полученными на образцах из АБС-пластика. Расхождение между моделью и экспериментом составило 7–8 %, что признано допустимым.

Заключение. Разработанные математические модели позволили установить аналитические зависимости, связывающие эффективные характеристики с величиной степени заполнения, что необходимо для ее оптимизации.

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FEWG-2024-0002.

1. Wan L. et al. Computational micromechanics-based prediction of the failure of unidirectional composite lamina subjected to transverse and in-plane shear stress states // Journal of composite materials. — 2020 (54), no. 24, 3637–3654
2. Taheri-Behrooz F. and Pourahmadi E. A 3D RVE model with periodic boundary conditions to estimate mechanical properties of composites // Struct. Eng. Mech. — 2019 (72), no. 6, 713–722

ОГНЕСТОЙКИЕ ТЕПЛОТРАЖАЮЩИЕ КОМПОЗИТНЫЕ СЛОИ НА ТЕКСТИЛЬНОЙ ОСНОВЕ

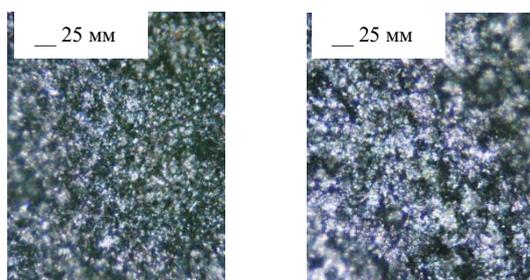
О.В. Рева, Д.В. Криваль, А.В. Врублевский

Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь; volha107@rambler.ru

Введение. При разработке материалов для защитной одежды пожарных-спасателей одной из важных задач является создание тепло-светоотражающих огнестойких и одновременно механически прочных гибких текстильных композитов. Решение задачи возможно нанесением на трудновоспламеняемые ткани термостойких металлосодержащих полимерных смол [1, 2], например силиконовых или карбосилоксановых. Однако требуемые показатели по огнестойкости комплексного изделия не достигаются без дополнительного введения в полимерную композицию замедлителей горения; а во многих случаях и предварительной пропитки ткани раствором антипирена.

Результаты и обсуждение. Нами были изучены характеристики силиконовых и силоксановых труднгорючих смол, допированных триазиновыми, аммонийными, полифосфатными и полифосфинатными замедлителями горения и алюминиевой пудрой, нанесённых на оксидиазольные и силикатные текстильные подложки механическим распылением. Исследованные ткани являются практически негорючими и не требуют дополнительной огнезащитной пропитки.

Установлено, что все исследованные слои вне зависимости от природы текстильной подложки и внесённого в полимерную матрицу замедлителя горения, имеют однородную плотную беспористую структуру поверхности, рис. 1. Толщина композитного слоя составляет ~20–25 мкм, размер частиц замедлителей горения не превышает 500 нм, что в результате нивелирует рельеф текстильной подложки. Отсутствие пор в композитном слое свидетельствует о высокой грунтующей способности металлонаполненных силиконовых связующих, что должно обеспечивать стойкость слоя на текстильной основе к распространению теплового потока и высокую отражающую способность.



добавка триазина

добавка полифосфината

Рис. 1. Структура поверхности металлосодержащих силиконовых слоёв на силикатных и оксидиазольных подложках

По результатам испытаний текстильных материалов, на поверхности которых имеются грунтовочные слои металлосодержащих смол, коэффициент отражения ИК-излучения составляет 71–74 % при требовании не ниже 70 %.

Огневые испытания показали, что и триазиново-фосфинатные, и аммонийно-полифосфатные огнезащитные композиции при введении в алюмосодержащие силиконовые и силоксановые смолы позволяют достичь требуемой по ГОСТ стойкости к горению для композитного изделия на текстильной основе при содержании синергического комплексного замедлителя горения не более 10 мас. %. По устойчивости к воздействию теплового потока все исследованные образцы соответствуют предъявляемым требованиям (температура на обратной стороне исследуемого пакета после 7 минут испытаний не должна превышать 50 °С). Испытанные материалы на обратной стороне исследуемого пакета имеют температуру 47–48 °С.

При испытаниях прочности композитных материалов с наилучшими огнезащитными характеристиками на разрыв было установлено, что их прочность существенно выше регламентированной: так, для оксидиазольного материала разрывная нагрузка составляет 1500–1200 Н; для силикатной ткани – 1500–1700 Н при 800 Н нормативной. Соппротивление раздирано: 58–63 Н и 92–96 Н соответственно при 32 Н нормативных.

Заключение. Установлен оптимальный состав и способ нанесения на силикатную и оксидиазольную текстильную основу композитных огнестойких металлосодержащих слоёв с высокой механической прочностью, устойчивостью к распространению теплового потока и способностью к отражению ИК-излучения. Разработаны комплексные эффективные огнезащитные композиции на основе триазиновых, фосфинатных и аммонийно-полифосфатных замедлителей горения, совместимые с силиконовыми и силоксановыми полимерными связующими, обеспечивающие требуемую по ГОСТ огнестойкость композиционного материала при содержании сложносоставного замедлителя горения в смоле 8–10 мас. %.

1. Артемов, А.П. Металлизация текстильных изделий // В мире оборудования. — 2002, № 10, 27—30
2. Дмитракович, Н.М. Сравнительный анализ технологических процессов получения огнестойких тканей с металлизированным покрытием / Дмитракович, Н.М., Ю.Г. Русецкий, В.В. Гнутенко и др. // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2004, № 6(16), 27—35

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ГЕМОСТАТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ИХ МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

А.В. Рогачев¹, Д.Л. Горбачев¹, А.А. Рогачев², М.А. Ярмоленко¹

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Беларусь; simmak79@mail.ru

²Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Одной из основных причин гибели людей в период ведения современных боевых действий является обильное внутреннее кровотечение. Без его купирования в 90 % фиксируется летальный исход. Это обуславливает непрерывный поиск эффективных экономически обоснованных технологических способов создания гемостатических материалов для использования в полевых условиях.

Цель. Целью настоящей работы являлось исследование особенностей молекулярной структуры и антибактериальных свойств многослойного покрытия на основе допамина, фосфатидилсерина, октенидина и транексамовой кислоты, перспективность использования слоевой системы при создании гемостатических перевязочных материалов.

Материалы и методы. В представленной работе в качестве материала основы предложено использовать нетканый материал на основе вискозы «Спанлейс» (Россия). На основании анализа литературных источников по тематике исследования предложена конструкция покрытия: CaO + допамин + (фосфатидилсерин + октенидин) + (фосфатидилсерин + транексамовая кислота). Октенидин был выбран в качестве антибактериального компонента. Антисептик обладает выраженной антибактериальной активностью в отношении широкого спектра бактерий. При этом устойчивость патогенных микроорганизмов к препарату в отсутствие биоплёнки низкая.

Покрытия формировали в вакууме в результате воздействия потока низкоэнергетических электронов на порошки исходных соединений или их механические смеси [1]. Слоевоe покрытие осаждалось в одном технологическом цикле без разгерметизации вакуумной камеры. Композиционные слои наносили в процессе воздействия потока электронов на механическую смесь порошков.

В качестве материала подложек были использованы кремниевые пластины – рентгенофотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), пластины NaCl, плёнки металлизированного лавсана – ИК исследования, кремниевые пластины – микроскопические исследования, кварцевые и силиконовые (5×5 см) пластины – UV-Vis исследования. Кремниевые, кварцевые пластины перед нанесением подвергались стандартной процедуре очистки.

Термообработку покрытий проводили в атмосфере воздуха при температуре 121° в течение 30 минут. Температура и продолжительность отжига

соответствуют температуре и продолжительности процесса стандартной стерилизации изделий медицинского назначения в автоклаве. Установление влияния паровой обработки на свойства покрытий будет являться целью следующего этапа исследований.

Результаты и их обсуждение

Структура покрытия на основе допамина не имеет заметных отличий от молекулярной структуры исходного соединения. Полимеризация допамина в тонком слое реализуется при температурах > 150 °С. Нанесение подслоя CaO способствует полимеризации допамина. Это связано с образованием гидроксида кальция при взаимодействии подслоя с атмосферой воздуха (щелочная среда). Влияние подслоя на процесс полимеризации проявляется только в условиях высокотемпературной обработки двухслойной системы. Воздействие потока электронов на смесь порошков транексамовой кислоты и фосфатидилсерина приводит к осаждению композиционного покрытия, представляющего высокодисперсную механическую смесь исходных соединений. Сильное межмолекулярное взаимодействие в композиционном слое препятствует быстрому растворению транексамовой кислоты в водной среде. Воздействие потока низкоэнергетических электронов на октенидин сопровождается частичной деструкцией пиридиновых колец. Наибольшей деструкции при нанесении подвержен фосфатидилсерин. Под действием потока низкоэнергетических электронов происходит частичное разрушение кислород- и фосфорсодержащих групп. Композиционное покрытие на основе фосфатидилсерина и октенидина представляет высокодисперсную механическую смесь исходных компонентов. Между компонентами покрытия присутствует сильное межмолекулярное взаимодействие. По этой причине скорость высвобождения антисептика в водную среду снижается более чем в 2 раза. Установлена высокая антибактериальная активность многослойной системы в отношении ряда патогенных микроорганизмов, в частности *E. coli*, *S. aureus*.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР задания 2.4.02.01 (№ гос./рег. 20212074) и 2.2.02.08 (№ гос./рег. 20212077).

1. A.V. Rogachev, Y. Liu, Z. Li, A.A. Rogachev, X. Tan, Xiaohong Jiang, A.E. Pyzh, V.A. Yarmolenko, A.S. Rudenkov, and M.A. Yarmolenko, D.L. Gorbachev Low-energy electron beam deposition of drug coatings intended for burn treatment //Applied Surface Science. — 2025 (687), 162211

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМ

А.С. Руденков

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Беларусь; rudenkov@gsu.by

Легирование углеродных покрытий кремнием и металлами позволяет сочетать два противоположных по характеру воздействия технологических приёма управления фазовым составом: легирование кремнием способствует увеличению содержания sp^3 -гибридизированных атомов углерода и улучшить термо- и коррозионную стойкость углеродных покрытий [1], легирование металлами приводит к увеличению содержания графитовой фазы и улучшает механические свойства покрытий [2].

Цель. Целью настоящей работы является определение влияния термообработки морфологию фазовый состав и механические свойства кремний-углеродных покрытий, легированных хромом.

Материалы и методы. Кремний-углеродные покрытия, легированные хромом, были получены путем ионно-лучевого диспергирования мишени из карбида кремния со вставками проволоки из хрома. Фазовый состав полученных композиционных покрытий определялся средствами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) при помощи спектрометра Senterra (Bruker, Германия) с длиной волны возбуждающего излучения 532 нм. Нанотвёрдость H и модуль упругости E определялись средствами нанотвёрдомера «НаноСкан 4D» (ФГБНУ «ТИСНУМ», Россия), оснащённого алмазным индентором Берковича. Термообработка покрытий осуществлялась в течении 30 минут при температурах (T) 150 °C, 300 °C, 450 °C, 600 °C. Элементный состав покрытий до термообработки был определён при помощи энергодисперсионного анализа средствами электронного микроскопа Stereoscan-360 (Cambridge Instruments, Англия): углерод – 40,6 ат. %; кремний – 42,1 ат. %; хром – 5,9 ат. %; кислород – 11,4 ат. %.

Результаты и их обсуждение. Углеродный пик КР спектров рассматриваемых в настоящей работе покрытий был разложен, согласно общепринятой методике [3], на два пика при помощи функции Гаусса: D-пик вблизи 1380–1400 cm^{-1} и G-пик, локализованный около 1550 cm^{-1} . При увеличении температуры термообработки до 300 °C включительно соотношение интенсивностей I_D/I_G незначительно возрастает (табл. 1) и может свидетельствовать как о процессах графитизации, так и об уменьшении размеров sp^2 -кластеров углерода [4]. Дальнейшее увеличение температуры термообработки приводит к уменьшению соотношения I_D/I_G , что может быть связано с усилением процессов графитизации, и, как следствие, увеличением размеров sp^2 -кластеров.

С увеличением температуры термообработки нанотвёрдость и модуль Юнга кремний-углеродных

покрытий, легированных хромом, снижаются (рис. 1), что обусловлено процессами графитизации и согласуется с данными КР спектроскопии.

Таблица 1. Результаты статистической обработки КР спектров кремний-углеродных покрытий, легированных хромом

Термооб- работка, °C	D-пик		G-пик		I_D/I_G
	Положе- ние, cm^{-1}	Ширина, cm^{-1}	Положе- ние, cm^{-1}	Ширина, cm^{-1}	
-	1438	152	1540	91	2,03
150	1436	153	1537	89	2,10
300	1429	160	1543	82	2,12
450	1426	156	1544	86	1,97
600	1416	178	1532	79	1,89

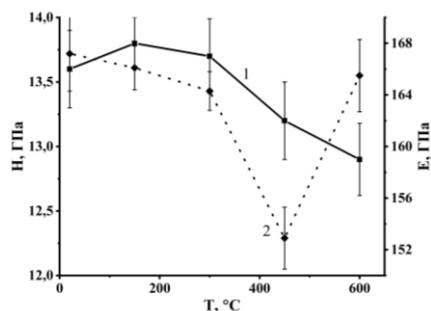


Рис. 1. Влияние термообработки на нанотвёрдость H (1) и модуль Юнга (2) композиционных покрытий

Изменение нанотвёрдости может быть обусловлено действием закона Холла-Петча, согласно которому уменьшение нанотвёрдости может быть связано с увеличением размеров sp^2 -кластеров. Увеличение модуля Юнга при термообработке при 600 °C может быть обусловлено выгоранием графита и взаимодействием свободных атомов кремния и хрома с кислородом с образованием оксидов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР 3, задание 3.1.2 (№ гос./рег. 20211993).

1. Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы / Под ред. А.В. Рогачева. — М.: Радиотехника. — 2020
2. Dimigen H. and Klages C.P. Microstructure and wear behavior of metal-containing diamondlike coatings // Surface and Coatings Technology. — 1991 (49), 543—547
3. Chu P.K. and Li L. Characterization of amorphous and nanocrystalline carbon films // Materials Chemistry and Physics. — 2006 (96), 253—277
4. Ferrari A.C. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Physical Review B. — 2000 (61), 4095—4107

МОРФОЛОГИЯ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАРБОНАТА

А.С. Руденков, С.А. Фролов

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Беларусь; rudenkov@gsu.by

Развитие современных технологий вакуумного синтеза полимерных покрытий открывает новые возможности для получения слоёв с заданной структурой поверхности, определяющей их функциональные свойства и сферы применения [1, 2].

Цель. Целью настоящей работы является определение влияния подслоя серной кислоты на молекулярную структуру и морфологические особенности покрытий на основе поликарбоната.

Материалы и методы. Методом электронно-лучевого диспергирования исходных компонентов были сформированы покрытия на основе поликарбоната (ПК) и покрытия на основе поликарбоната на подслое из серной кислоты (H_2SO_4). Формирование подслоя серной кислоты возможно благодаря низким значениям давления насыщенных паров, препятствующим ее быстрому испарению в вакууме [3]. Остаточное давление в вакуумной камере перед осаждением покрытий составляло $4 \cdot 10^{-3}$ Па. После осаждения покрытия подвергались термообработке на воздухе в течение 60 минут при температуре 200 °С. Морфология поверхности покрытий была изучена средствами атомно-силовой микроскопии (микроскоп Solver Pro, NT-MDT, Россия). Площадь сканирования – 5×5 мкм. Молекулярная структура покрытий была определена при помощи инфракрасного Фурье спектрофотометра Vertex-70 (Bruker, Германия).

Результаты и их обсуждение. Средствами АСМ показано (табл. 1), что покрытия на основе поликарбоната характеризуются низкой субшероховатостью Rms, наименьшей плотностью и наименьшими размерами отдельных структурных образований на площади сканирования.

Таблица 1. Морфологические особенности покрытий на основе поликарбоната

Образец	Термообработка	Средняя высота, нм	Rms, нм	Плотность зёрен, шт.	Средний диаметр зёрен, нм
ПК	нет	2,7	0,3	70	28,6
	да	25,3	3,5	167	82,0
H_2SO_4 /ПК	нет	14,8	2,4	281	63,0
	да	16,2	3,3	267	60,0

Термообработка покрытий на основе поликарбоната приводит к увеличению субшероховатости, количества и размеров зёрен вследствие структурирования полимера в процессе нагрева.

Двухслойные покрытия на основе поликарбоната и серной кислоты характеризуются более развитой морфологией по сравнению с однослойными покрытиями на основе поликарбоната. Данный факт, по всей видимости, объясняется процессами графитизации

поликарбоната вследствие взаимодействия с серной кислотой.

В ИК-спектре покрытия на основе поликарбоната присутствуют все полосы поглощения, характерные для ИК-спектра исходного соединения. Термическая обработка покрытий при температуре 200 °С (60 мин) не приводит к видимому изменению ИК-спектра покрытия.

ИК-спектр двухслойного покрытия является суперпозицией ИК-спектров поликарбоната и серной кислоты (рис. 1). Необходимо отметить, что порядок следования слоёв не влияет на ИК-спектры вышеуказанного покрытия.

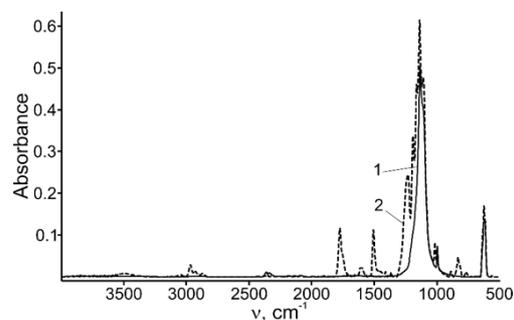


Рис. 1. ИК-спектры термообработанных покрытий: 1 – слой H_2SO_4 ; 2 – H_2SO_4 /ПК

При этом говорить об отсутствии химического взаимодействия при формировании двухслойной системы нельзя. Двухслойные системы характеризуются выраженным «медным» цветом. Цвет покрытия на основе поликарбоната – светло-жёлтый. Известно, что полосы поглощения углеродных структур, способных образовываться в результате химического взаимодействия органического слоя с серной кислотой, не являются выраженными в ИК-спектре [2].

Таким образом, термообработка в сочетании с использованием подслоев на основе серной кислоты являются эффективными инструментами управления рельефом и молекулярной структурой покрытий на основе поликарбоната.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках НИР 2 задания 1.12 (№ гос./рег. 20211994).

1. Витязь П.А. Наноматериаловедение: учеб. пособие для учреждений высш. образования по техн. специальностям. — Мн.: Вышэйшая школа. — 2015
2. Рогачев А.А. Физико-химия полимерных покрытий, осаждаемых из активной газовой фазы. — М.: Научный мир. — 2014
3. Амелин А.Г. Технология серной кислоты: учебное пособие для вузов. — М.: Химия. — 1983

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ГАЗОТРУБОПРОВОДОВ ПОДЗЕМНОГО ЗАЛЕГАНИЯ

А.Т. Рудковский¹, Н.Р. Прокопчук²

¹УП «Мингаз», Минск, Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

Эксплуатация систем газоснабжения предусматривает техническое диагностирование газопроводов. Его цель - определение состояния газопроводов и установление ресурса их дальнейшей эксплуатации. В настоящей работе осуществлена оценка долговечности труб из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) с различным сроком эксплуатации и различным SDR экспресс-методом в соответствии с Государственными стандартами Республики Беларусь: СТБ [1, 2]. Метод основан на определении энергии активации термоокислительной деструкции E_d полимерных материалов по данным динамической термогравиметрии. Термический анализ выполнен на приборе NETZSCH STA 449 F3. Интервал температур 20–500 °С скорость линейного подъема температуры 5 град/мин. Эксплуатационными факторами, действующими на полиэтиленовые трубы подземного залегания, понижающие значение параметра E_d , являются: температура (определяемая температурой грунта снаружи и температурой метана внутри); механические напряжения в стенке трубы (определяемые давлением газа в трубе, давлением массы грунта, высотой 1,6 м, давлением массы самой трубы; агрессивные среды (газ внутри трубы и солевые водные растворы снаружи трубы; действие жидкой среды (эффект Ребиндера). Максимальное рабочее давление 0,4 МПа, коэффициент запаса прочности от 3 до 5, средняя температура стенок труб $\pm 10^\circ\text{C}$. Уравнение долговечности для ПЭВП имеет вид [2].

$$\tau_T = [10^{-0,1167E_{\text{расч}}-0,936} * e^{E_{\text{расч}}/RT}]/365 \quad (1)$$

где T – температура эксплуатации изделия; $E_{\text{расч}}$ – расчётная энергия активации, определяющая долговечность. $E_{\text{расч}}$ будет ниже E_d за счёт действия на изделие эксплуатационных факторов ($\Delta E_{\text{экс.ф}}$) $E_{\text{расч}} = E_d - \Delta E_{\text{экс.ф}}$

Механические напряжения в стенке трубы, вызванные давлением газа, определяются по формуле Кесселя (2):

$$\delta_{\text{ст}} = (P_n(d_n - \delta_{\text{ст}}) / 2 \delta_{\text{ст}}) * K_3$$

где P_n – номинальное давление в трубе, МПа; d_n – наружный диаметр трубы, мм; $\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенки трубы, мм; K_3 – коэффициент запаса прочности материала трубы.

Пример расчёта долговечности.

Труба №1 (введена в эксплуатацию 19.08.1999 г)

Наружный диаметр трубы $d_n = 63$ мм, толщина стенки трубы 6 мм.

$$\text{SDR} = 63/6 = 10,6.$$

Для SDR = 11,0

$$K_3 = 5,0, \delta_{\text{ст}} = (0,4(63 - 6)/2*6)*0,5 = 10,0 \text{ МПа}$$

$$\Delta E_{\text{мех}} = \delta_{\text{ст}} \gamma = 10 * 1,6 = 16 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta E_{\text{мех(сум)}} = 16 + 3 + 1 = 20 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta E_{\text{хим(сум)}} = 28 \text{ кДж/моль}, \Delta E_{\text{м.вз. (сум)}} = 8 \text{ кДж/моль}$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{экс.ф.}} &= \Delta E_{\text{мех(сум)}} + \Delta E_{\text{хим(сум)}} + \Delta E_{\text{м.вз. (сум)}} = \\ &= 20 + 28 + 8 = 56 \text{ кДж/моль} \end{aligned}$$

$$E_{\text{расч}} = E_d - \Delta E_{\text{экс.ф}} = 135 - 56 = 79 \text{ кДж/моль}$$

$$\tau_{10^\circ} = [10^{-0,1167*79-0,936} * e^{79/2,356}]/365 =$$

$$= [10^{-10,16} * 3,9 * 10^{14,0}]/365 = 74 \text{ года}$$

Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица. Эксплуатационная долговечность газовых труб из ПЭВП

Дата ввода трубы в эксплуатацию	Остаточный ресурс работоспособности, годы	Потенциальная долговечность труб, годы
19.08.1999 г.	74	74+24 = 98
29.12.2017 г.	100	100+6 = 106
04.03.2011	87	87+12 = 99
30.12.2007	100	100+16 = 116
08.12.1993	63	63+30 = 93

Наблюдается хорошее соответствие между остаточным ресурсом и сроком эксплуатации всех труб (от даты ввода в эксплуатацию до 2023 г.), потенциальная эксплуатационная долговечность ПЭВП труб в условиях РБ колеблется от 93 до 116 лет Среднее ее значение составляет 102 года.

1. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов: СТБ 1333.0-2002 — Введ. 28.06. 2002. — Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. — 2002
2. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности изделий профильных из поливинилхлорида: СТБ 1333.1-2002. — Введ. 28.06. 2002. — Минск: М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь. — 2002

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ СОСТАВА ПОЛИВИНИЛКАРБАЗОЛ – ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТ

Д.В. Сапсалёв^{1,2}, Г.Б. Мельникова¹, Т.Н. Толстая¹, С.А. Чижик¹

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь; dsapsalev@list.ru

²Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка, Минск, Беларусь

Наноструктурированные полимерные покрытия широко используются в различных областях науки и техники (оптика, электроника, биотехнология и пр.). Одним из способов получения новых функциональных материалов на основе высокомолекулярных соединений является формирование тонкоплёночных покрытий из смесей полимеров и (или) блок-сополимеров. При этом однородные покрытия с уникальными свойствами могут быть сформированы без использования дорогостоящих подходов, в том числе наноимпринтинга и нанолитографии [1–3].

Доступным и экономически эффективным методом получения тонкоплёночных полимерных покрытий является спин-коатинг [4].

Цель работы – формирование и исследование структурно-механических характеристик тонкоплёночных покрытий состава поливинилкарбазол (ПВК) – полиметилметакрилат (ПММА).

Материалы и методы. Тонкоплёночные покрытия ПВК (Sigma-Aldrich, $M = 1100000$), ПММА (Sigma-Aldrich, $M = 10000$) и их смесей формировали методом спин-коатинга на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин [5].

Для реализации метода спин-коатинга аликвоту раствора ПВК ($c = 0,25$ мг/мл), ПММА ($c = 0,25$ мг/мл) или их смесей в хлороформе объёмом 6 мкл прикапывали на подложки, вращающиеся со скоростью 3200 об/мин. Вращение не прекращали в течение 1 мин для удаления остаточных количеств растворителя.

Морфологию и локальные механические свойства поверхности полимерных покрытий исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ, установка NT-206, ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь). Модуль упругости (E) рассчитывали по модели Джонсона–Кенделла–Роберта на основании данных наноиндентирования с использованием кантилеверов (NSC 11 А, жёсткость 3 Н/м, Mickromash, Эстония).

Результаты и их обсуждение. На основании данных АСМ о структуре покрытий, сформированных из смесей полимеров, установлено, что наиболее плотные однородные плёнки формируются при следующих процентных (по массе) содержаниях ПВК и ПММА соответственно: 20 % – 80 %, 35 % – 65 %, 50 % – 50 %.

Показано, что наибольшими значениями локального модуля упругости E характеризуется поверхность покрытий ПВК, что обусловлено жёсткостью его макромолекул. Покрытия ПММА и ПВК – ПММА исследуемых составов характеризуются

значениями локального модуля упругости близкими к E покрытий ПММА и изменяются в диапазоне 322,5–448,3 ± 15% МПа (табл. 1). Наибольшие значения силы адгезии 125,1 нН и 107,5 нН характерны для образцов ПВК–ПММА составов 35 – 65 мас. % и 50 – 50 мас. % соответственно.

Таблица 1. Локальные значения модуля упругости ($E \pm 15\%$, МПа) и силы адгезии ($F_{адг} \pm 15\%$, нН) покрытий ПММА, ПВК и ПВК – ПММА, сформированных методом спин-коатинга на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин

Состав покрытия (ПВК–ПММА, мас. %)	$E \pm 15\%$, МПа	$F_{адг} \pm 15\%$, нН
0 – 100	404,9	70,6
20 – 80	438,0	77,6
35 – 65	322,5	125,1
50 – 50	448,3	107,5
65 – 35	337,3	78,3
100 – 0	514,1	88,9

Заключение. Разработана методика формирования тонкоплёночных покрытий состава поливинилкарбазол – полиметилметакрилат методом спин-коатинга. На основании данных АСМ о структуре поверхности покрытий на основе смесей полимеров, установлены оптимальные массовые соотношения ПВК и ПММА в их составе: 20% – 80%, 35% – 65%, 50% – 50%.

Анализ локальных механических характеристик поверхности сформированных покрытий показал, что наибольшие значения локального модуля упругости характерны для плёнки ПВК. Покрытия ПММА и ПВК–ПММА имеют близкие значения локального модуля упругости.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований на 2021–2025 гг. «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.25).

- Xue, L. Phase separation induced ordered patterns in thin polymer blend films / L. Xue, J. Zhang, Y. Han // Prog. Polym. Sci. — 2012 (37), 564–594
- Bates F.S. Polymer-polymer phase behavior // Science. — 1991 (251), 898–905
- Coveney S. Fundamentals of Phase Separation in Polymer Blend Thin Films. — New York: Springer. — 2015
- Highly sensitive NO₂ sensors based on organic field effect transistors with Al₂O₃/PMMA bilayer dielectrics by sol-spin coating / Qiang Xie [et al.] // Organic Electronics. — 2019 (74), 69–76
- Сапсалёв, Д.В. Тонкие композиционные пленки полиметилметакрилата с наночастицами диоксида кремния / Д.В. Сапсалёв [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. — 2021, № 2, 36–49

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА А-С:Ti ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ СЕПАРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ

К.А. Саховский¹, Д.Г. Пилипцов²¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь; sakhovskij.kirill.07@gmail.com²Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

Введение. При осаждении а-С покрытий за счёт испарения графита электрической дугой, независимо от режима горения дуги (импульсный или стационарный), в потоке углерода присутствуют макрочастицы, представляющие собой заряженные кластеры графита и осколки материала катода, возникающие за счёт эрозии катода. Размеры частиц находятся в диапазоне от сотен нанометров до нескольких микрон и определяются временными и энергетическими параметрами работы испарителя, зависят от материала катода и существенно снижают эксплуатационные свойства осаждаемых покрытий [1].

Цель работы – исследование структуры и механических характеристик а-С:Ti покрытий, осаждённых из сепарированных потоков плазмы.

Полученные результаты и их анализ. Формирование композиционного плазменного потока осуществлялось путём испарения композиционного титан-углеродного катода импульсной дугой при различном напряжении разряда. Методом КР спектроскопии установлено немонокотное влияние напряжения разряда на изменение структурно-фазового состава а-С:Ti покрытий: при напряжении разряда равном 350 В, достигаются максимальные значения sp^3/sp^2 отношения в покрытии. РФЭС установлено формирование Ti–C связей в покрытии, концентрация которых зависит от напряжения разряда. АСМ показало снижение шероховатости покрытий при изменении напряжения разряда от 250 В до 350 В, с последующим ростом, связанным с особенностями генерации импульсных металл-углеродных плазменных потоков и эффективностью сепаратора. Результаты триботехнических испытаний, проведенных по схеме сфера-плоскость (контртело – сфера диаметром 5 мм выполненная из стали ШХ15) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Объёмная интенсивность изнашивания контртела j и коэффициент трения μ для пар трения а-С:Ti-ШХ15

Напряжение разряда, В	μ	$j, 10^{-16} \text{ м}^3/(\text{Н}\times\text{м})$
250	0,45	9,3
300	0,49	9,8
350	0,35	7,6
400	0,51	10,9
450	0,54	12,3

Показано, что для покрытий, осаждённых при напряжении разряда 350 В, наблюдается минимальный износ контртела, который зависит от высокого содержания в покрытии sp^3 связей, отношения

концентраций химически не связанного с углеродом титана и Ti–C карбидных связей, а также низкими значениями шероховатости. Для покрытий, осаждённых при напряжениях разряда 400 В и 450 В, установлены высокие значения износа контртела, что связано с высоким содержанием карбидных (TiC) соединений, образующих зерно большого размера в покрытии, которое приводит к высокой шероховатости формируемых покрытий. Нанесение а-С:Ti покрытий при данных режимах на рабочие поверхности инструмента или узлов трения нецелесообразно, т.к. вызывает абразивный износ сопряжённых поверхностей. При напряжении от 200 В до 250 В импульсного разряда в условиях сепарации потока металл-углеродной плазмы установлен рост коэффициента трения, что связано с высокой шероховатостью покрытий, обусловленной островковой структурой поверхности, а также низким содержанием углеродной фазы, которая в процессе трения в результате термоокислительной деструкции разрушается, и образующиеся в зоне трения продукты разрушения приводят к росту коэффициента трения и увеличению износа контр тела.

Установлено влияния режима испарения (напряжения разряда) составного титан-графитового катода на твёрдость и модуль упругости покрытий, осаждённых в условиях сепарации плазменного потока (рис. 1).

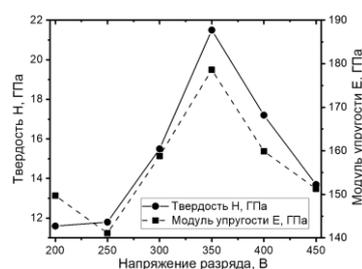


Рис. 1. Механические свойства а-С:Ti покрытий

Показано, рис. 1, что твёрдость определяется режимом испарения и образующейся структурно-фазовым составом покрытий.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования Республики Беларусь (проект № 20212075).

Ссылки на использованные источники

1. Композиционные углеродные покрытия, осаждённые из импульсной катодной плазмы / под ред. А.В. Рогачева. — М.: Радиотехника. — 2020

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАЗМЕРНОСТЕЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ТРИБОЛОГИИ

Н.С. Скобелева, А.С. Парфенов, А.В. Волков, Е.В. Березина

Ивановский государственный медицинский университет Минздрава России, Иваново, Россия;
alsparf@gmail.com

Цель работы. Определение факторов, влияющих на эффективность смазочного материала в зоне трения, в случае применения многокомпонентных смазок, включающих в себя сурфактанты, нано- и микроразмерные присадки и крупные аддитивы, методом размерного анализа.

Главная задача размерного анализа – уменьшение числа независимых переменных в задаче без потери физического содержания, что особенно ценно в задачах машинного обучения. Согласно теореме Беккингема, если в проблеме фигурирует n переменных с k основными размерностями, то её поведение можно описать с помощью $n-k$ безразмерных групп.

Методы построения безразмерных комплексов. Безразмерные комплексы активно применяются в трибологии. Классический пример – кривая Штрибека, дающая функциональность между безразмерным параметром коэффициента трения и безразмерной группой – числом Герси, включающим в себя произведение скорости и вязкости, отнесённых к удельной нагрузке.

Аналогичным образом можно поступить, строя безразмерные π -комплексы для интенсивности износа. В общем случае, каждый безразмерный комплекс должен описывать параметры системы [1].

В случае моделирования ситуации, когда свойства смазочного материала модифицируются путём внедрения в него наночастиц, следует обратить внимание на следующие комплексы: отношение размера наночастицы к шероховатости поверхности. Вторым геометрическим безразмерным комплексом является отношение прочностных свойств наноприсадки относительно поверхностей трения. В случае рассмотрения разных режимов трения (граничного и гидродинамического) безразмерный комплекс может быть связан с толщиной смазочного слоя, коэффициентом «покрытия» присадкой поверхностей трения и отношением размера частиц к толщине плёнки.

Безразмерные комплексы, связанные с применением сурфактантов, должны учитывать ключевые свойства этого класса присадок: концентрацию в смазочном материале, характеристики адсорбции и десорбции. В размерном анализе такие эффекты учитываются косвенно, через гипотезы о функциональной форме зависимости.

Модификация смазочного материала полимерными (ПМА, полиизобутилен) или биополимерными (хитозан, целлюлозные добавки) присадками может

приводить к следующим эффектам: повышение вязкости смазочного материала, увеличение толщины смазочной плёнки, путём адсорбции на поверхностях трения. В первом случае их эффект уже учитывается имеющимися реологическими безразмерными группами (например, число Герси), во втором – действуют механизмы, схожие с моделью для сурфактантов.

Таблица 1. Базовые размерности величин

Плотность ρ : [M][L] ⁻³	Твердость H : [M][L] ⁻¹ [T] ⁻²
Нагрузка F : [M][L][T] ⁻²	Модуль упругости E : [M][L] ⁻¹ [T] ⁻²
Скорость скольжения V : [L][T] ⁻¹	Линейные размеры контакта, шероховатость, характерный размер частиц: [L]
Вязкость μ : [M][L] ⁻¹ [T] ⁻¹	Концентрация: C_s , [L] ⁻³
Интенсивность изнашивания W : [L] ³ [T] ⁻¹ .	

Результаты и их обсуждение. В качестве основного подхода в работе предлагается использовать ряд безразмерных комплексов в качестве независимых переменных (features) для обучения моделей машинного обучения. Вместо исходных параметров (скорости скольжения, вязкости, нагрузки) должны быть рассчитаны π -группы, используемые в качестве входов для модели машинного обучения. Применение подобного подхода позволяет добиться инвариантности признаков к масштабированию, что полезно при использовании для обучения данных из различных источников, с отличающимися параметрами эксперимента [2, 3].

Применимые модели машинного обучения для подобной задачи: множественная регрессия для аппроксимации зависимостей, деревья решений и случайный лес – для оценки значимости факторов и нелинейных зависимостей, методы кластеризации (kNN) – для выявления схожих паттернов у смазочных материалов различной природы.

1. Возможности метода размерностей для моделирования трибосистем со смазочным слоем / Н. С. Скобелева, Е. В. Березина, А. В. Волков [и др.] // Чебышевский сборник. — 2024 (25), № 4, 299—307. DOI 10.22405/2226-8383-2024-25-4-299-307
2. Marian, M. Physics-Informed Machine Learning—An Emerging Trend in Tribology / M. Marian, S. Tremmel // Lubricants. — 2023 (11), no. 11, 463. DOI 10.3390/lubricants11110463.
3. A review of recent advances and applications of machine learning in tribology / A. T. Sose, S. Y. Joshi, L. K. Kunche [et al.] // Physical Chemistry Chemical Physics. — 2023 (25), no. 6, 4408—4443. DOI 10.1039/D2CP03692D.

ПОЛИМЕР-СИЛИКАТНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И МИНЕРАЛОВ ПОДГРУППЫ КАОЛИНИТА

П.Н. Тарасова, Ю.В. Капитонова, Н.Н. Лазарева, А.А. Охлопкова

Северо-Восточный федеральный университет, Якутск, Россия; pn.tarasova@mail.ru

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) все чаще заменяют металлы и сплавы в машиностроении, обеспечивая надёжность и долговечность деталей машин и техники. Перспектива применения ПКМ в узлах трения обусловлена рядом достоинств таких как меньшая масса, практически бесшумная работа, демпфирующая способность, а также в большинстве случаев работоспособность без применения смазочного материала. Одним из наиболее предпочтительных полимеров для технической промышленности является политетрафторэтилен (ПТФЭ), характеризующийся уникальным сочетанием физико-механических, химических и трибологических свойств. К ним относятся высокая прочность, низкий коэффициент трения, стойкость к высоким и низким температурам, а также химическая инертность. Тем не менее, ПТФЭ характеризуется низкой износостойкостью, высоким коэффициентом линейного термического расширения и недостаточной стойкостью к деформациям даже при небольших нагрузках.

Одной из актуальных задач современного материаловедения является разработка полимерных материалов с оптимальным набором антифрикционных и прочностных характеристик. Известно, что повышение износостойкости достигается при введении в полимер наполнителей-модификаторов. Однако при введении большого количества наполнителей повышается жёсткость полимера, соответственно, материал становится хрупким. В данной работе в качестве наполнителей-модификаторов использовали алюмосиликаты подгруппы каолинита. К минералам данной подгруппы относятся каолинит, галлуазит, диксит, накрит и др. Наиболее распространённым среди них является каолинит, который имеет пластинчатую морфологию частиц. Галлуазит, имея одинаковый химический состав с каолинитом, характеризуется трубчатым строением. Таким образом, **целью** работы является исследование свойств и структуры ПТФЭ при введении алюмосиликатов, характеризующихся различной морфологией частиц, в сочетании со шпинелью магния (ШМ). Высокая структурная активность ШМ, подтверждённая в ранее проведённых исследованиях, послужила предпосылкой использования в качестве дополнительного модификатора.

Материалы и методы. В качестве наполнителей полимерной матрицы ПТФЭ ПН-90 (ОАО

«Галлополимер Пермь», Россия) были выбраны глинистые минералы подгруппы каолинита с общей химической формулой $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$: каолинит марки КБЕ-1 Глуховецкого месторождения (Украина); галлуазит марки АНТ-3810 ООО «Молекулярные технологии и новые материалы» (Россия). В качестве функциональной добавки использовали нанодисперсную шпинель магния (ШМ) – двойной оксид магния и алюминия, продукт синтеза ИХТТМ СО РАН (г. Новосибирск). ПКМ были получены в результате сухого смешения компонентов методом холодного формования с последующим спеканием. Массовое содержание наполнителей алюмосиликат/ШМ в ПКМ составило 1, 2 и 5 мас. %.

Результаты и обсуждение. Введение алюмосиликатов в ПТФЭ сопровождается изменением физико-механических и трибологических характеристик. Зафиксировано повышение износостойкости ПТФЭ при введении каолинита и ШМ в 1380 раз, а при введении галлуазита и ШМ – в 205 раз. При этом стоит отметить, что применение бинарного наполнения – алюмосиликат/ШМ способствует улучшению износостойкости до 10 раз относительно введения только одного наполнителя. Физико-механические показатели практически не меняются у композита, содержащего каолинит, а в случае галлуазита наблюдается снижение с ростом содержания наполнителя. Исследование особенностей структурообразования в ПТФЭ при введении алюмосиликатов показало перестройку надмолекулярной структуры с формированием сферолитоподобных образований в полимере. Спектральными методами анализа исследованы процессы трибоокисления и формирования вторичных структур при трении, происходящих с участием компонентов ПКМ и металлического контртела. Установлено формирование вторичной структуры на поверхности ПКМ, которая способствует столь значительному повышению износостойкости композита. На ИК-спектрах образцов после трения зарегистрированы полосы поглощения, относящиеся к продуктам трибоокисления. Протекание трибоокислительных реакций является одной из причин формирования вторичной структуры на поверхности трения композита. Таким образом, сравнение влияния галлуазита и каолинита на характеристики ПТФЭ, показывает преимущество наполнения каолинитом в сочетании со шпинелью магния.

ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИВИТЫХ СОПОЛИМЕРОВ ХИТОЗАНА С АКРИЛАМИДОМ И МАЛЕИНОВОЙ КИСЛОТОЙ

Е.К. Фомина^{1,2}, Е.В. Гринюк^{1,2}, И.А. Климовцова¹, Ю.О. Кокошко², Д.Л. Кудрявский^{1,2}

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; famina@bsu.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. Не всегда представляется возможным совместить в одной композиции различные полимеры, обладающие оригинальными физико-химическими свойствами. Проблема решается получением привитых или блок-сополимеров. Например, в случае привитых сополимеров биоразлагаемого нетоксичного хитозана с акриловыми мономерами удаётся избавиться от основного недостатка полисахаридов – низкой механической прочности. Путём подбора типа прививаемого мономера можно целенаправленно получить сополимер с определённым набором функциональных групп (ионогенных или неионогенных, гидрофильных или гидрофобных), что должно привести к появлению способности у получаемого сополимера определённым образом реагировать на внешние воздействия (температуру, pH, ионную силу раствора, химические реагенты (ионы тяжёлых металлов [1], глюкозу, ферменты)).

В данной работе проводили прививку к хитозану акриламида (АА) и малеиновой кислоты (МК), что позволило увеличить pH-чувствительность хитозана, а также его сорбционную способность по отношению к ионам тяжёлых металлов.

Цель работы. Определить условия синтеза привитых сополимеров хитозана с АА и МК при вещественном и радиационном иницировании, обеспечивающие получение гидрогелей с высокой сорбционной способностью.

Результаты и их обсуждение. Для синтеза сополимеров смешивали хитозан (ТСИ, Япония), растворенный в 2 % уксусной кислоте, и водные растворы АА и МК. В случае вещественного иницирования сополимеризации к полученной водно-полимерной композиции в качестве инициатора добавляли персульфат аммония (ПСА), а затем сшивающий агент (*N,N'*-метилден-бис-акриламид) и перемешивали реакционную смесь при температуре 70 °С в среде аргона. Полученный сополимер очищали посредством многократного набухания в дистиллированной воде. В случае радиационного иницирования смесь подвергали воздействию различных доз γ -излучения (20, 30, 40, 50, 60 кГр). Сополимер очищали путем диализа, сушили и измельчали до порошкообразного состояния.

Установлено, что при радиационном иницировании деструкция цепей хитозана преобладает над процессами сшивания, что приводит к снижению вязкости водных дисперсий привитых сополимеров при возрастании дозы γ -излучения. При вещественном иницировании степень прививки и конверсия

мономеров почти в 2 раза больше по сравнению с радиационным иницированием, что обусловлено отсутствием кислородного ингибирования реакции. Вследствие формирования сетчатой структуры сополимеров происходит уменьшение их степени кристалличности по сравнению с необлучённым хитозаном, что установлено методом рентгенофазового анализа. На Фурье-ИК спектрах привитых сополимеров наблюдается значительное снижение интенсивности полос валентных колебаний связей НС–ОН (1057 см⁻¹) и Н₂С–ОН (1015 см⁻¹), а также полосы деформационных колебаний аминогрупп (1539 см⁻¹) по сравнению со спектром исходного хитозана. На основании этого можно предположить, что активными центрами прививки являются как гидроксильные, так и аминогруппы хитозана.

Степень прививки и конверсия мономеров увеличиваются при возрастании содержания ПСА от 0,5 до 1,5 мас. % по отношению к суммарной массе полимера и мономеров в реакционной смеси. При вещественном иницировании максимальная эффективность прививки составляет 92 %, а конверсия мономера – 91 %.

Полученные гидрогели на основе привитых сополимеров обладают pH-чувствительностью. Максимальная степень набухания при pH 1 составляет 1350 % вследствие протонирования аминогрупп хитозана в кислой среде. Кроме того, водопоглощающие свойства увеличиваются при pH 9, что связано с диссоциацией карбоксильных групп привитых цепей сополимера АА с МК.

Сорбционная способность привитых сополимеров по отношению к ионам Cu(II) возрастает при увеличении степени прививки, что обусловлено участием в сорбции не только аминогрупп хитозана, но и карбоксильных групп привитых цепей сополимера АА с МК. Максимальное значение сорбции составило 62 мг/г. Для описания изотерм адсорбции наиболее подходящей оказалась модель Ленгмюра. Сорбция является благоприятной и обратимой.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке задания 1.3.04.05 «Радиационно-химическое модифицирование структуры и свойств синтетических и природных биodeградируемых полимеров» ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии».

1. Saleh Al. Sh. [et al.] Radiation grafting of acrylamide and maleic acid on chitosan and effective application for removal of Co(II) from aqueous solutions // Rad. Phys. Chem. — 2018 (144), 116–124

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИВИТЫХ СОПОЛИМЕРОВ ХИТОЗАНА С *N*-ИЗОПРОПИЛАКРИЛАМИДОМ

Е.К. Фомина^{1,2}, Е.В. Гринюк^{1,2}, И.А. Климовцова¹, Т.Ю. Лесько², Д.Л. Кудрявский^{1,2}

¹Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь; famina@bsu.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. Наиболее широко применяемым в биомедицине термочувствительным полимером является поли-*N*-изопропилакриламид (PIAAm). Нижняя критическая температура смешения (НКТС) этого полимера с водой составляет 32 °С. Выше этой температуры происходит коллапс гидрогелей на основе PIAAm, обусловленный конформационным переходом макромолекул «клубок-глобула». Матрица PIAAm используется в качестве носителя лекарственных веществ или подложки для культивирования клеток. Однако PIAAm обладает низкой способностью к биодegradации и характеризуется слишком быстрым высвобождением активных соединений. Кроме того, поскольку часто используется доставка лекарства к области воспаления, имеющей температуру выше нормальной температуры человеческого тела, то существует потребность в сополимерах с НКТС выше, чем 32 °С. Прививка *N*-изопропилакриламида (PIAAm) к макромолекулам хитозана, в цепи которого содержатся гидрофильные амино- и гидроксильные группы, приводит к тому, что значение НКТС привитого сополимера возрастает [1]. Причём НКТС можно строго регулировать, изменяя степень прививки.

Цель работы. Получить привитые сополимеры хитозана с PIAAm посредством радиационного иницирования и установить влияние условий синтеза на термочувствительные свойства привитых сополимеров.

Результаты и их обсуждение. Для получения сополимеров готовили растворы хитозана (ТСИ, Япония) в водном растворе уксусной кислоты, а также водные растворы мономера PIAAm. Затем их смешивали и подвергали воздействию ионизирующего излучения на электронном ускорителе УЭЛВ-10-10. Энергия пучка электронов была 6,8 МэВ при полном токе пучка электронов 820 мкА. Облучение вели при комнатной температуре. Дозы облучения составляли 10, 20, 30, 40 и 50 кГр. Массовые концентрации хитозана и PIAAm в реакционной смеси – 2:4, 2:5, 2:6, 2:7, 2:8, 2:10. После облучения растворы теряли текучесть, что свидетельствовало о формировании сетчатой структуры привитых сополимеров. Полученные сополимеры очищали посредством диализа в дистиллированной воде, сушили и измельчали до порошкообразного состояния.

Установлено, что степень прививки и конверсия мономера увеличивается с ростом дозы облучения, а также с возрастанием содержания PIAAm в

реакционной смеси. Степень набухания гидрогелей, полученных радиационной прививкой PIAAm к цепям хитозана, уменьшается, а величина гелевой фракции возрастает с увеличением концентрации мономера в реакционной смеси, а также с увеличением дозы облучения. Поскольку на Фурье-ИК спектрах привитых сополимеров (рис. 1) наблюдается значительное снижение интенсивности полос валентных колебаний связей НС–ОН (1057 см⁻¹) и Н₂С–ОН (1015 см⁻¹), сделано предположение, что прививка цепей происходит к гидроксильным группам хитозана.

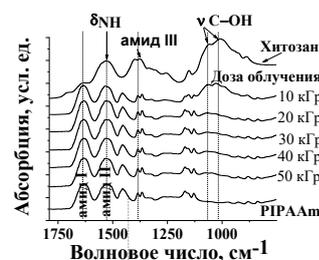


Рис. 1. Фрагменты Фурье-ИК спектров порошков хитозана, PIAAm, а также привитых сополимеров хитозана с PIAAm

Посредством измерения мутности водных суспензий привитых сополимеров, а также их степени набухания в диапазоне температур от 20 до 60 °С установлено, что для привитых сополимеров НКТС составляет ≈ 37,5 °С, в то время как для гомополимера (PIAAm) ≈ 33 °С (рис. 2).

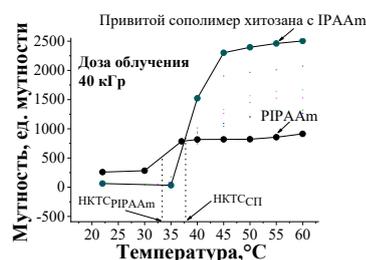


Рис. 2. Зависимость мутности водных суспензий гомополимера PIAAm и привитого сополимера хитозана с PIAAm от температуры

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта Х25УЗБ-077).

1. Babelyte M. [at al.] Synthesis and Characterization of Thermoresponsive Chitosan-graft-poly(*N*-isopropylacrylamide) // *Polymers*. — 2023 (15), 3154

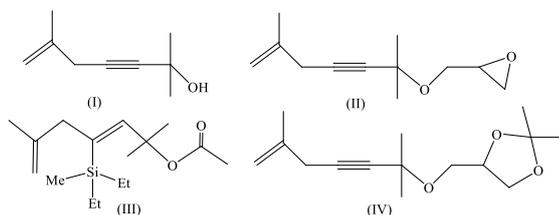
ВЛИЯНИЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ АЛКИНОВ И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.И. Шатинова, В.Д. Джафаров, М.А. Манафов, Н.А. Алимierzоева

Министерство Науки и Образования, Институт Полимерных Материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; mshatirova@mail.ru

Цель: Целью работы является изучение влияния указанных соединений на механические и реологические свойства полиэтиленовых композиций, содержащих α -кварц и альбит. Полимерные композиционные материалы на основе полиэтилена с неорганическими наполнителями находят широкое применение в строительстве, в упаковке, в машиностроении и в электронике, благодаря хорошему балансу механических свойств, химической стойкости и технологичности. Повышение прочностных и адгезионных характеристик таких систем традиционно достигается за счёт поверхностной модификации наполнителей или введения активных добавок. Минеральные наполнители, такие как α -кварц и альбит, не только обеспечивают повышение твёрдости и термостойкости композиции, но и могут влиять на кристалличность и термостойкость полиэтилена. Однако ограниченная совместимость между полярными поверхностями наполнителей и неполярной матрицей полиэтилена остаётся серьёзным ограничением. В связи с этим перспективным направлением является использование низкомолекулярных органических соединений, обладающих как гидрофильными, так и гидрофобными фрагментами, способных улучшать межфазное взаимодействие [1–5].

Результаты и их обсуждение: В настоящей работе в качестве таких модификаторов были выбраны производные 2,6-диметилгепт-6-ен-3-ин-2-ола, содержащие функциональные группы (гидроксил, эпоксид, силильный эфир, диоксолан) (I-IV) со следующей формулой:



Результаты испытаний показали, что **соединение I** оказывает умеренно-пластифицирующее влияние, улучшая текучесть и удлинение, но не сильно усиливая прочность. **Соединение II (эпоксид)** даёт лучшее сцепление с наполнителем, повышая прочность, но снижает пластичность; **соединение III (силановый эфир)** работает как поверхностно-активный агент, улучшая переработку и баланс свойств, а **соединение IV** показало наибольшее улучшение прочности и удлинения — вероятно, за счёт наличия гибкой диоксолановой группы и хорошей совместимости с ПЭ. Установлено, что структура модификатора оказывает значительное влияние на прочностные и реологические характеристики полиэтиленовых композиций. При этом наибольший эффект достигнут при использовании диоксоланового производного (IV), что позволяет рекомендовать его в качестве эффективного пластифицирующего и модифицирующего агента для ПКМ на основе полиэтилена.

Материалы и методы: Строение синтезированного аддуктов (I-IV) подтверждено данными ИК- и ЯМР ^1H -спектров.

1. Жигунов Д.А., Хабибулин И.Г. Композиционные материалы на основе полиэтилена и неорганических наполнителей: структура, свойства, применение. // Казанский технологический вестник. — 2015, № 4, 55—60
2. Мусина Р.К., Ахметов А.И., Нуретдинов Р.Х. Функционализация полиолефинов и их модификация полярными добавками // Пластические массы. — 2020, № 1-2, 38—42
3. Zhang Y. and Ma P. Surface modification of mineral fillers for polymer composites: A review // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. — 2017, no. 45, 1—11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.09.021>
4. Lu J. and Zheng S. Influence of functional low-molecular-weight additives on interfacial adhesion in polyethylene composites // Polymer Engineering and Science. — 2011 (51), no. 12, 2408—2416. <https://doi.org/10.1002/pen.21969>
5. Боровикова Л. Н., Попов С.П. Адгезионные свойства полиэтиленовых композиций с модифицированными наполнителями // Полимерные материалы. — 2019, № 2, 12—16

ВЛИЯНИЕ АМИНОПРОИЗВОДНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ КОМПОЗИЦИИ ЭД-20

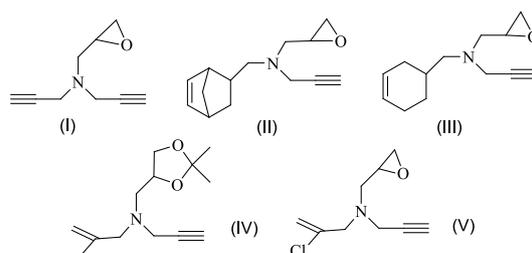
М.И. Шатинова¹, У.Ш. Джафарова², А.Р. Караева¹, Ш.Ф. Нагиева¹, Ш.К. Шейдаева¹

¹Министерство Науки и Образования, Институт Полимерных Материалов, Сумгаит, Азербайджанская Республика; *mshatirova@mail.ru*

²Министерство Науки и Образования, Институт химии присадок имени академика А.М. Гулиева, Баку, Азербайджанская Республика

Цель. Эпоксидные полимеры находят широкое применение в качестве конструкционных, клеевых и электроизоляционных материалов, благодаря высокому уровню прочности, термостойкости и хорошим электрическим характеристикам. Тем не менее, их высокая хрупкость и ограниченная эластичность в ряде случаев требуют модификации структуры с целью улучшения эксплуатационных свойств. Одним из эффективных путей решения данной задачи является введение активных низкомолекулярных модификаторов, содержащих реакционноспособные фрагменты, способные участвовать в процессах сшивания и сополимеризации.

Результаты и их обсуждение. В данной работе рассмотрено влияние пяти новых азотсодержащих соединений, включающих эпоксидные и алкинильные фрагменты, на свойства эпоксидной композиции на основе ЭД-20, отверждённой полиэтиленполиамином (ПЭПА). Модификация эпоксидных смол алкинильными и эпоксидсодержащими соединениями является активно развивающимся направлением [1–4]. Использование аминов с алкинильными группами позволяет интенсифицировать процессы сшивания за счёт реакции Маннехайма или взаимодействия с эпоксидными группами, что приводит к образованию пространственно-сшитой сетки [5, 6]. Дополнительное включение оксиранов позволяет увеличивать плотность сшивки и улучшать диэлектрические характеристики, особенно в области низких частот [7]. Применение гибридных модификаторов, сочетающих алкинильные, эпоксидные и алициклические фрагменты, позволяет достигать синергетического эффекта по механическим и электрическим свойствам [8, 9]. Однако, большинство работ ограничено использованием промышленных добавок, тогда как перспективными являются модификаторы направленного синтеза с регулируемой структурой [10].



Материалы и методы. На основании полученных данных можно заключить, что наибольший эффект достигается при введении 20 масс. ч. модификатора; в этом случае достигается наилучший баланс между прочностью, эластичностью, термостойкостью и диэлектрическими свойствами. Все исследованные модификаторы (I–V) оказывают положительное влияние на свойства эпоксидной композиции на основе ЭД-20. Модификаторы IV и II способствуют максимальному увеличению прочности (до 70 МПа) и термостойкости (до 130 °С), снижая при этом диэлектрические потери.

Полученные данные позволяют рекомендовать модификаторы IV и II в качестве эффективных функциональных добавок к эпоксидным композициям для применения в электроизоляционной технике.

1. Попов А.А., Смолы эпоксидные: Справочник. — М.: Химия. — 1990.
2. Литвинова Н.В. и др. // Полимеры. — 2018, № 5, 45–52
3. Xiao-Fang Song, Jiang-Tao Qin, Ting-Ting Li et al. // J. Appl. Polym. Sci. — 2020. 137(48), 48516
4. Zhang Y. et al. // Polymers. — 2021. 13(9), 1445
5. Баранов П.А. и др. // Высокомогл. соединения. — 2019. 61(3).
6. Sun J. et al. // Macromol. Mater. Eng. — 2019. 304(1):1800519.
7. Кузнецов В.Ф., Ковалев Н.Н. // Электроизоляционные материалы. — М.: Энергоатомиздат. — 2002
8. Wang Y. et al. // Eur. Polym. J. — 2022. 167:111059
9. Gao L. et al. // J. Mater. Sci. — 2023, № 58, 937–951
10. Иванова М.А., Лебедев А.И. // Вестник МГУ. Серия 2. Химия. — 2021, № 4, 88–94

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСИЙ ПЛАСТИЧНЫЙ СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ – УГЛЕРОДНАЯ НАНОСТРУКТУРА

М.А. Шилов^{1,2}, Н.В. Усольцева²

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Иваново, Россия;

²Ивановский государственный университет, Иваново, Россия; nv_usoltseva@mail.ru

К настоящему времени получены интересные результаты в области управления трением, износом и смазыванием, которые, однако, решают лишь часть из многообразия проблем трибологии. Так, например, показано, что наиболее перспективным в решении проблемы снижения трения и износа представляется поиск и использование многофункциональных присадок в составе различных смазочных материалов (СМ). На смену традиционным порошкообразным графиту и дисульфиду молибдена (MoS₂) с конца прошлого века широко стали использоваться углеродные наноструктуры (УНС): графены (2D), углеродные нанотрубки (1D), фуллерены (0D), шунгитовый нанокремнезём (0D) и т.д. Применение присадок углеродных наноструктур (УНС) в СМ показало их эффективность в улучшении трибологических свойств.

В узлах трения машин и механизмов смазочные материалы испытывают высокие нагрузки, однако в большинстве работ их наличие при определении реологических характеристик СМ не учитывают, что приводит к ложным расчётам фактической толщины смазочного слоя и распределения давления в зоне контакта.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы стало определение зависимости динамической вязкости дисперсий ПСМ/УНС от температуры, концентрации и давления.

Материалы и методы. В качестве базовой основы модельной смазки с дисперсиями УНС использовали вазелин медицинский (VM). Кроме того, были испытаны три промышленно выпускаемые ПСМ: импортный ПСМ I, а также отечественные ПСМ II и ПСМ III. В качестве присадок использовали УНС 0D – 3D размерности. Экспериментальные данные получали с применением реометра Anton Paar Physica MCR 302.

Результаты и их обсуждение. Как для промышленно выпускаемых ПСМ, так и для модельных были определены зависимости динамической вязкости от температуры (рис. 1)

Полученные в диапазоне температур от 20 до 140 °С зависимости динамической вязкости от температуры были аппроксимированы моделью Баруса. Эта модель традиционно применяется для описания давлением-зависимых характеристик вязкости смазочных материалов, однако её экспоненциальную

природу можно адаптировать и для анализа температурно-вязкостных зависимостей ПСМ.

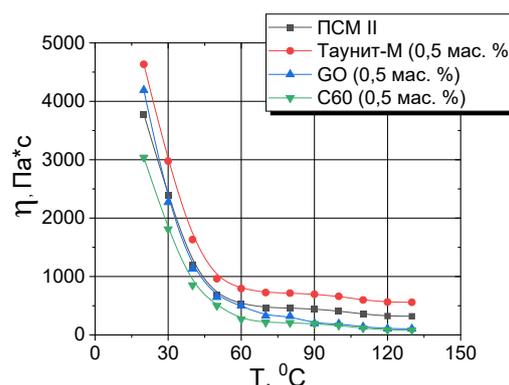


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости от температуры для дисперсий ПСМ II/УНС

Общую тенденцию влияния пространственной организации УНС на снижение значения динамической вязкости можно представить рядом: 2D → 1D → 3D → 0D. Эта закономерность совпадает с закономерностью снижения температуры каплепадения.

При определении зависимости динамической вязкости от давления использовали режимы скоростей сдвига, позволяющие находиться в диапазоне линейной области вязкоупругого поведения материала.

Анализ данных показал, что добавление УНС с высоким аспектным отношением и обладающих определённой величиной ориентации может значительно повысить коэффициент пьезовязкости ПСМ. Это связано с тем, что наноструктуры образуют трёхмерную сеть в матрице смазки, которая действует как физический барьер для сдвиговых деформаций. Увеличение аспектного отношения углеродных наноструктур приводит к увеличению длины и гибкости наноструктур. Это позволяет им более эффективно переплетаться друг с другом, образуя более прочную и устойчивую сеть. В некоторых случаях УНС могут иметь поверхностный заряд, приводящий к электростатическим взаимодействиям между ними, что усиливает их способность к переплетению и образованию прочного каркаса.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №. FZZM-2023-0009).

МАКРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕПРЕРЫВНОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ АКРИЛАМИДА В РАСТВОРАХ ДИМЕТИЛФОРМАМИДА

М.Б. Шуляковская¹, Е.С. Карасевич¹, Е.В. Гринюк²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; marieshulyakouskaja@gmail.com

²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ, Минск, Беларусь

Введение. Полимеры на основе акриламида (АА) широко применяются в различных видах промышленности. В частности, известны суперсорбенты на основе акриловых сополимеров, позволяющие поглощать большие объёмы воды. Традиционно полимеры АА и его производных получают методом радикальной полимеризации в массе или растворе. Однако в последнее время широко изучается альтернативный способ получения акриловых мономеров – фронтальная полимеризация (ФП), являющаяся автоволновым процессом. ФП по праву можно отнести к «зелёным» технологиям, так как такой метод не требует дополнительного подвода энергии. Полимеризация АА в растворах диметилформамида (ДМФА) является перспективной для получения суперсорбентов и/или водорастворимых полимеров [1, 2].

Цель. Изучить ФП АА в ДМФА, а именно макрокинетические параметры процесса, а также определить условия протекания процесса в непрерывном режиме движения фронта.

Материалы и методы. В качестве мономера использовали АА, растворитель – ДМФА; инициатор – персульфат аммония (ПСА). Мольное соотношение «мономер – растворитель» составляло 1:1.

Скорость фронта определяли, измеряя временной интервал, за который фронт проходит определённое расстояние. Температуру фронта измеряли с помощью термпары К-типа, погруженной в раствор мономера.

Результаты. Установлено, что осуществление процесса ФП в непрерывном режиме возможно при концентрации инициатора не ниже 0,1 мол. %, однако стабильное движение фронта наблюдалось при концентрации ПСА 0,25 мол. % и более.

Зависимость скорости распространения фронта от концентрации ПСА представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, наблюдается возрастание скорости распространения фронта при увеличении концентрации ПСА в реакционной смеси. Максимальная скорость распространения фронта составила $13,0 \pm 0,2$ см/мин при концентрации ПСА 2 мол. %.

Зависимость максимальной температуры фронта от концентрации инициатора представлена на рис. 2.

Как следует из рис. 2, с увеличением концентрации инициатора температура фронта неравномерно возрастает и колеблется в диапазоне 130–160 °С.

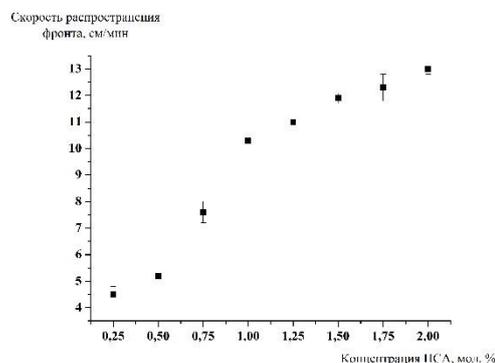


Рис. 1. Зависимость скорости распространения фронта (см/мин) от концентрации инициатора в реакционной смеси (мол. %)

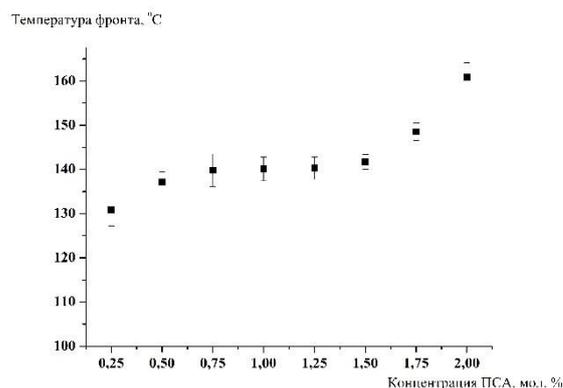


Рис. 2. Зависимость температуры фронта (°С) от концентрации инициатора (мол. %) в реакционной смеси

Заключение. Изучена принципиальная возможность проведения ФП АА в непрерывном режиме в растворах ДМФА, определена минимальная концентрация инициатора, необходимая для проведения процесса, а также изучены макрокинетические параметры протекания процесса

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (код проекта Х25УЗБ-077).

1. Davtyan S.P. and Tonoyan A.O. Frontal Polymerization in Continuous-Flow Reactors // *Rev. J. Chem.* — 2019 (9), no. 4, 175–196
2. Li Q. et al. Advances in frontal polymerization strategy: From fundamentals to applications // *Prog. Polym. Sci.* — 2022 (127), 101514

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Abbasova L.Sh.	124	Sokal L.A.	128
Aleshin Andrey N.	31	Tu Z.	82
Aliyeva Hasanova Z.	126	Vahabova V.A.	129
Amirov S.	126	Wang T.	29, 82
Arzumanova N.B.	125	Wu J.	29, 52, 78, 79, 80, 81, 82
Bildyukevich A.V.	77	Wu L.	82
Biteniēks Juris	31	Xu J.	80
Borodich Feodor M.	4, 28	Yang T.	29, 78, 82
Burts K.S.	77	Yessimova D.	52
Cheng Qian.	4	Ying P.	29, 78, 82
Fedorenko A.A.	77	Yu J.	78, 81
Fu Y.	82	Zhang Baode	31
Gao Zaida	4	Zhang P.	29, 78, 79, 80, 81, 82
Ge H.	29	Zhang X.	82
Gorb Stanislav N.	4	Zhou S.	82
Grigoriev A.Ya.	5, 29, 78	Абасзаде Г.Н.	130, 139
Gryniuk E.V.	128	Абдалова С.Р.	133
Guliev K.G.	129	Абед Н.С.	20, 21, 113
Gutsev D.	29, 78	Авдейчик О.В.	131
Hasanov R.	126	Агабеков В.Е.	144
Huang M.	29	Адериха В.Н.	83
Huseynova Z.	127	Азизов Е.А.	137
Ismayilov I.A.	125	Айзикович С.М.	119
Jiang Zhizhen	4, 28	Акулич З.И.	71, 72
Jin Xiaoqing	4, 28	Акунец Е.Г.	104
Kakhramanov N.	127	Алексеев А.Г.	143
Kleperis Janis	31	Алексенко В.О.	109
Kostjuk S.V.	77	Алексиев А.Р.	86
Kovalev A.	52	Алиева А.О.	137
Lalayeva R.N.	125	Алиева Д.Н.	130, 139
Levchenko V.	6, 29, 52, 78, 79, 80, 81, 82	Алимирзоева Н.А.	141, 151, 202
Li Pu	28	Алиханова А.И.	132
Lin C.	29	Аллахвердиева С.Н.	149
Lin Ch.	82	Аллахвердиева Х.В.	133
Liu Kuanyu.	28	Амирасланова К.Г.	178
Mammadov B.A.	124	Ананко А.М.	11
Mammadova R.	126	Андреев М.А.	94
Meng Y.	52	Андреева А.В.	188
Mustafayeva F.	127	Антонов А.С.	134, 135
Myshkin N.K.	7, 29, 52, 78, 82	Антонова А.Л.	136
Peng F.	82	Артюшков Е.Л.	36
Pentjuss Evalds.	31	Аскеров О.В.	137, 177
Philas T.	29	Асланова Э.Т.	138, 176
Plisko T.V.	77	Атакишиева В.О.	138
Shuliakouskaia M.B.	128	Ахмедова Г.С.	181

Ахмедова Р.А.	130, 139	Гараева А.А.	138
Бабич В.Е.	32	Гарбарук В.Ю.	24, 65
Байрамов М.Н.	147	Герасименко С.А.	74
Баранова А.С.	140	Гилевич А.	106
Бардушкин В.В.	102	Глевицкая Т.А.	108
Башлакова А.Л.	33	Глотов А.И.	45
Бекташи Н.Р.	141	Глуховеря Е.Г.	22
Бекташи С.А.	141, 151	Говор Т.А.	146
Белоцерковский М.А.	100	Говоров И.С.	190
Беляк О.А.	11, 57	Голодок Р.П.	48, 94
Березина Е.В.	198	Гольдаде В.А.	92, 98
Бильдюкевич А.В.	14, 108, 114	Горбачев Д.Л.	192
Богданович С.П.	19, 91	Гордиенко М.Р.	41
Бойко А.А.	34, 110	Горин М.С.	57
Борисова М.Э.	13, 43, 47, 98	Горохов С.Л.	170
Борисова Р.В.	12	Гракович П.Н.	85, 101
Борозна В.Д.	142	Грецкий Н.Л.	148
Бочкарева С.А.	109	Григорьев Ф.А.	53, 88
Брель Д.В.	84, 115, 122	Григорьев Ю.В.	26
Брундуков А.С.	85	Гринюк Е.В.	200, 201, 205
Буковский П.О.	117	Грошев И.М.	66
Буркин А.Н.	64, 184	Гулиева О.М.	158
Бурть Е.С.	14, 108, 114	Гулиева Т.М.	147
Буслович Д.Г.	109	Гупта В.	148
Бухаров С.Н.	86, 112, 113	Гусиев Н.Х.	149
Ваганов В.В.	15	Гут М.М.	39, 89
Ваганов Г.В.	15, 35	Гуцев Д.М.	90, 104
Варавка В.Н.	165	Давыдов А.А.	91, 103
Вархолински Б.	106	Дамдинов З.Ш.	23
Васильев А.П.	143	Дамдинова Т.Ц.	23
Васькевич В.В.	97	Данилова С.Н.	12
Вебер Д.А.	45	Данильченко К.Д.	97
Вердиева Т.Г.	149	Двойнишников С.В.	41
Веремей И.С.	100	Делендик М.Н.	169
Винидиктова Н.С.	36, 37, 69	Джавадов М.Я.	150
Вислоух К.А.	87	Джайасингхе Б.М.Д.Н.С.	13
Войтехович С.В.	168	Джанахмедов А.Х.	150
Волгина Е.А.	38	Джафаров В.Д.	141, 202
Волков А.В.	198	Джафаров В.Дж.	151
Волков С.С.	119	Джафарова У.Ш.	203
Волнянко Е.Н.	87	Диденко А.Л.	47
Воробьева Е.В.	87, 144	Дмитриев Н.Н.	54
Воронюк И.В.	72	Дойлин Ю.В.	184
Ворса В.Ж.	71	Дорошко Д.Ю.	37
Врублевский А.В.	191	Дорошко Е.Ю.	36
Выдумчик С.В.	170	Достуева В.М.	152
Гавриленко О.О.	170	Дробыш Т.В.	50
Гаджиева С.А.	179	Дробышевская Н.Е.	34, 110
Гайшун В.Е.	97	Дроздова Е.А.	22
Галушкин И.А.	96	Дубровский В.В.	16, 99
Гамзелева Т.В.	106	Дьяконов А.А.	61
Гао Янг	145	Елкин А.А.	40

Емельянов В.А.	173	Ковалева И.Н.	99, 107
Ефимчик К.В.	67	Ковалёва С.А.	100
Жорник В.И.	55, 93, 100	Ковалёва Я.А.	101
Жуманазар Н.Н.	140	Коваленко Д.Л.	97
Зайков В.А.	166	Коваленко М.А.	68, 69, 92, 98
Захаров А.Д.	11	Коваль В.Н.	74, 83
Здоровец М.В.	140	Коваль И.В.	85
Зерщиков К.Ю.	40	Ковальков Н.С.	64
Зиямухамедова У.А.	107	Козлов Д.А.	164
Зотов С.В.	92, 96, 98	Кокошко Ю.О.	200
Зуев В.О.	41	Колесников В.И.	57, 102, 165
Ибадов Е.А.	177	Колесников И.В.	165
Ибрагимова М.М.	181	Комаров Ф.Ф.	166
Иванов Л.Ф.	115, 122	Конакова О.В.	69
Иванькова Е.М.	15	Константинов С.В.	166
Ивахник А.В.	55, 93	Копченков В.Г.	167
Игнатович Ж.В.	153	Корниенко Л.А.	109
Ильющенко А.Ф.	56, 94, 95	Корольков И.В.	140
Исакович О.И.	71	Костюкевич П.А.	42
Искендерова Э.Г.	141	Кот Е.П.	168
Исмаилов И.А.	160	Кравченко В.И.	135
Исмаилов Р.И.	20, 21	Красильников В.П.	190
Исмаилова Г.Д.	178	Крафт В.Е.	13, 43
Исмаилова Р.И.	182	Крень А.П.	169
Исмаилова У.К.	182	Криваль Д.В.	191
Исмаилова Ч.О.	130, 139	Кривогуз Ю.М.	103, 118, 120
Кабардин И.К.	41	Кропотин О.В.	17
Кадолич Ж.В.	96	Ксенофонтов М.А.	170
Казанин А.М.	154	Кудина Е.Ф.	67
Казьмин А.А.	70	Кудрицкий В.Г.	90, 104
Какаулин С.В.	41	Кудрявский Д.Л.	200, 201
Калашников А.С.	170	Кудряков О.В.	165
Каленчук А.А.	22	Кузей А.М.	42
Калинин Л.А.	116, 122	Кузнечик О.О.	94
Калиш П.Э.	155	Кузнецова Т.А.	106
Камалов А.М.	15, 43, 47	Куксенова Л.И.	171
Камалов Т.О.	20, 21	Кулемина С.М.	105
Каманина Н.В.	18	Куликов А.П.	172
Капитонова Ю.В.	44, 156, 199	Купо А.Н.	173
Караева А.Р.	203	Курбанова Н.И.	147
Карапетян А.Н.	157	Лавров И.В.	102
Карасевич Е.С.	205	Лазарева Н.Н.	12, 44, 156, 199
Каримова Н.Н.	151	Лапицкая В.А.	106, 119
Карпушенко И.С.	66	Лемешонок С.Н.	153
Карсакова М.В.	111	Лесун А.Н.	174
Кахраманов Н.Т.	133, 158, 159	Лесько Т.Ю.	201
Кашперов А.А.	96	Лешок А.В.	56, 95
Керимов А.Х.	160	Лещев К.А.	11
Киселевич В.В.	161, 162	Ливонович З.С.	175
Климовцова И.А.	200, 201	Ливонович К.С.	175
Клочко П.В.	131, 163	Лихоманова С.В.	18
Князев Е.В.	45	Ломач В.А.	49, 115

Лукатенок П.Л.	73	Осипов П.Н.	186
Луцко В.Ф.	70	Охлопкова А.А. ..	8, 12, 25, 44, 143, 156, 199
Мададова Т.Б.	179	Охлопкова Т.А.	12
Маевский А.А.	97	Павлов А.А.	47, 98
Макаренко В.М.	115	Павлюкевич Т.Г.	170
Макаренко О.А.	103, 120	Панин С.В.	9, 109
Максименко А.В.	104	Папета О.П.	172
Максимов Д.В.	57	Парфенов А.С.	198
Мальшев В.Н.	117	Петрова Е.Г.	187
Мамедалиева Ф.М.	176	Петрова Н.Н.	61
Мамедли С.Б.	141	Петроковец Е.М.	54
Мамедов Б.А.	130, 139, 152, 176, 181, 182	Пилипцов Д.Г.	145, 197
Мамедова А.Ф.	137, 177	Плиско Т.В.	14, 114
Мамедова Н.А.	179	Подгорная В.В.	107
Мамедова С.М.	181	Подденежный Е.Н.	34, 110
Мамедова Ф.М.	179	Поликарпов А.П.	71, 72
Мамедова Х.А.	149, 160	Полотнянщиков К.С.	35
Манафов М.А.	141, 178, 202	Попов С.Н.	188, 189
Мантуров Д.С.	165	Попова Е.Н.	15, 35
Марукович Е.И.	58	Порохня А.А.	167
Марусенко Н.А.	19, 83, 99	Потапов А.А.	190
Марченко Л.Н.	107	Прокопчук Н.Р.	135, 195
Матулис Вит.Э.	168	Протасеня Т.А.	169
Матусевич В.В.	71	Путинцев В.Ю.	45
Махонь А.Н.	66	Рагимова М.Р.	181
Машаева С.С.	179	Раджабова М.Дж.	151
Медяк Г.В.	71, 72	Радюк А.Н.	73
Меледин В.Г.	41	Рамазанов Э.А.	183
Меликсетян Н.Г.	180	Рева О.В.	146, 191
Мельникова Г.Б.	140, 196	Рогачев А.А.	153, 187, 192
Меринов В.К.	86, 112	Рогачев А.В.	145, 192
Мирмехтиева М.К.	181	Рогачев Е.А.	22
Мионов В.Г.	172	Роговой А.Н.	56, 95
Мисюля Д.И.	88	Рубаник В.В.	70
Мудгал Д.	148	Рубаник В.В. мл.	70
Мустафаев А.М.	182	Руденков А.С.	193, 194
Нагиева Ш.Ф.	203	Рудковский А.Т.	195
Назаралиев Х.Г.	183	Саввинова М.Е.	188
Назаров Е.А.	108	Савенко В.И.	171
Негматов С.С.	20, 21	Савич В.В.	48, 94
Негров Д.А.	45	Садырин Е.В.	119
Нейфельд М.А.	184	Сазанков А.П.	23, 50
Николаев А.Л.	119	Салахова С.А.	178
Ничик М.Н.	168	Салиев А.Н.	172
Новиков В.В.	185	Сапсалёв Д.В.	140, 196
Новиков Е.С.	165	Сафарова В.М.	147
Новрузова Г.И.	149	Саховский К.А.	197
Нуралиева Г.Х.	159	Светличный В.М.	35
Овчинников К.В.	68, 92	Селькин В.П.	111
Оганесян К.В.	157	Семченко А.В.	97
Омелюсик А.В.	46	Сергиенко В.П.	86, 112, 113
Оруджева А.Т.	160	Сидорова Д.Н.	25, 59

Сидский В.В.	97	Хабарова А.В.	106, 119
Сингх Дж.	148	Хади А.А.	117
Скобелева Н.С.	198	Халилова С.М.	178
Скорород А.З.	84	Ханбабаева Г.Дж.	177
Скотникова М.А.	60	Хасанов О.Х.	21
Слепцов Н.А.	25	Хе Чаньцзюнь	109
Снежков В.В.	24	Хейфец М.Л.	148
Соколов Д.В.	17	Хилько Д.Н.	148
Соловьев Т.М.	189	Худолей А.Л.	62
Спиридонов А.М.	25, 59	Царенко И.В.	104
Ставров Д.А.	17	Цветкова Е.А.	37
Степанов Д.Ю.	109	Цзян Сяохун	145
Степанюк А.А.	114	Черноус Д.А.	121
Стерехов О.С.	111	Четверик М.М.	57
Стеценко В.Ю.	58	Чжан Цян	121
Стратанович В.А.	49, 115, 122	Чижик С.А.	106, 119, 140, 196
Струк В.А.	135	Чижов И.В.	166
Стручкова Т.С.	143	Чувашов Д.С.	96
Сунь Кай	121	Шаповалов А.В.	101
Сушкевич М.Д.	187	Шаповалов В.М.	68, 69, 75, 92, 110, 136
Сырбу С.А.	185	Шатирова М.И.	202, 203
Сыцко В.Е.	136	Шахгелдиев Ф.Х.	182
Сычев А.А.	102	Шахназарли Р.З.	183
Сычев А.П.	102	Шашерина С.А.	60
Тарайкович А.М.	48, 94	Шевченко В.В.	103, 120
Таран И.И.	100	Шейдаева Ш.К.	203
Тарасова П.Н.	44, 156, 199	Шелестова В.А.	49, 115
Тарутько К.И.	66	Шень Юань	109
Темнов Д.Э.	38, 105	Шилов М.А.	204
Толстая Т.Н.	140, 196	Шилько И.С.	49, 89
Толстопятов Е.М.	116, 122	Шилько С.В.	50, 109, 121
Томашевский А.Г.	56	Ширалиева Н.Т.	177
Торская Е.В.	61, 117	Шкалей И.В.	61
Тулэйко А.С.	112, 113	Шмелев А.В.	46
Умаров Ш.А.	20	Шуляковская М.Б.	205
Усова В.Н.	74, 118	Шумская В.Ю.	24, 84, 122
Усольцева Н.В.	204	Шункевич А.А.	71, 72
Федосенко Н.Н.	173	Шутова Т.Г.	175
Филиппович Л.Н.	153	Юдин В.Е.	15, 35
Фомина Е.К.	200, 201	Южик Л.И.	144
Фомичева И.Н.	154	Юркова Ю.М.	26, 53, 88
Францкевич А.В.	42	Яковлев В.Б.	102
Фролов С.А.	194	Ярмоленко М.А.	192

Научное издание

**Международная научно-техническая конференция
«ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ И ТРИБОЛОГИЯ»
(ПОЛИКОМТРИБ–2025)**

Тезисы докладов

Ответственные за выпуск:

Е.Н. Волнянко, С.М. Мартыненко, В.В. Терехов



Государственное научное учреждение
«Институт механики металлополимерных систем
имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси»



ул. Кирова 32а, 246050, г. Гомель
Телефон: +375 (232) 34 17 12
Факс: +375 (232) 34 17 11
mpri@mail.ru
<http://mpri.org.by>